

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

ALANA LIMA DE SOUSA

DM 12/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALANA LIMA DE SOUSA

ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO VIA ALGORITMO GENÉTICO

DM 12/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALANA LIMA DE SOUSA

ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO VIA ALGORITMO GENÉTICO

Dissertação submetida à Banca examinadora do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica na área de
Sistemas de Energia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALANA LIMA DE SOUSA

ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus que me abençoou com a sabedoria e perseverança necessárias para chegar até aqui, e a minha mãe que sempre esteve ao meu lado como grande incentivadora e cultivadora dos meus sonhos. Minha mãe, este é um sonho que cultivamos juntas e estamos realizando juntas. Obrigada por todas as minhas conquistas e por sempre me mostrar o caminho das boas escolhas.

Agradeço ao meu orientador Prof. João Paulo Abreu Vieira por todo o tempo dedicado, conhecimento passado e o suporte durante o desenvolvimento do trabalho. E a todos os meus professores que sempre foram empenhados em passar seus conhecimentos e formar bons profissionais.

E todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho que me permitiu alcançar mais uma conquista e o título de mestre.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Estado da arte	3
1.3	Objetivo do trabalho	5
2	Geração Distribuída	7
2.1	Introdução	7
2.2	Conceito	7
2.3	GD no Brasil e no Mundo	7
2.4	Resolução Normativa nº 482/2012	12
2.5	Procedimentos de Rede	14
2.6	Normas da concessionária	16
2.7	Conclusão	18
3	Capacidade de Hospedagem da Geração Distribuída	19
3.1	Introdução	19
3.2	Conceito	19
3.3	Impacto da Sobretensão	20
3.4	Determinando a Capacidade de Hospedagem	28
3.5	Métodos para Aumentar a Capacidade de Hospedagem de Geração Distribuída	29
3.6	Conclusão	33
4	Algoritmo Genético	34
4.1	Introdução	34
4.2	Definição	34
4.3	Teoria da evolução	34
4.4	Conceitos básicos de genética	35
4.5	Lógica de um Algoritmo Genético	36
4.6	Componentes de um Algoritmo Genético	37

4.7	Conclusão.....	47
5	Algoritmo Genético para a Estimativa Da Capacidade De Hospedagem Da GD	48
5.1	Introdução	48
5.2	Método Proposto	48
5.3	Algoritmo genético proposto	48
5.3.1	Representação dos indivíduos	48
5.3.2	Método de Newton-Raphson	49
5.4	Conclusão.....	52
6	Resultados.....	53
6.1	Introdução	53
6.2	Sistema IEEE - 33 Barras	53
6.3	Sistema IEEE – 69 Barras.....	58
6.4	Conclusão.....	64
7	Conclusão	65
	Referências	67

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da capacidade total instalada de SFs em GW ao longo dos anos.	12
Figura 2 - Sistema de distribuição com GD.	21
Figura 3 - Variação de tensão em um alimentador radial.	22
Figura 4 - Aumento relativo de tensão é igual para todas as posições indicadas dado ao gerador distribuído.	24
Figura 5 - Impacto do fator de potência da GD na CH.	25
Figura 6 - Impacto do fator de potência da GD sobre a incidência do primeiro limite operacional violado.	26
Figura 7 - Impacto do corte de carga na variação de tensão.	31
Figura 8 - Fluxograma da lógica de um AG.	37
Figura 9 - Exemplo do método da roleta viciada para a Tabela 8.	40
Figura 10 - Método da amostragem estocástica uniforme.	42
Figura 11 - Operador crossover de um ponto de corte.	43
Figura 12 - Fluxograma do algoritmo proposto.	51
Figura 13 - Sistema IEEE 33 barras.	53
Figura 14- Comportamento das potências estimadas para cada caso considerando uma simulação.	56
Figura 15 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-33 barras nas 10 simulações do Caso I.	56
Figura 16-Média de tensão nas barras do sistema IEEE-33 barras nas 10 simulações do Caso II.	57
Figura 17-Média de tensão nas barras do sistema IEEE-33 barras nas 10 simulações do Caso III.	58
Figura 18-Sistema IEEE - 69 barras.	58
Figura 19-Comportamento das potências estimadas para cada caso considerando uma simulação.	61
Figura 20-Comportamento das potências estimadas para cada caso considerando uma simulação.	62
Figura 21 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-69 barras nas 10 simulações do Caso I (fator de potência 0,85 indutivo).	63
Figura 22 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-69 barras nas 10 simulações do Caso I (fator de potência unitário).	63

Figura 23 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-69 barras nas 10 simulações do Caso II (fator de potência 0,85 indutivo).....	63
Figura 24 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-69 barras nas 10 simulações do Caso II (fator de potência unitário).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes de GD instaladas no Brasil.	8
Tabela 2 – Quantidade de GDs insladas no Brasil ao longo dos anos.....	9
Tabela 3 - Quantidade de GDs instaladas por classe de consumidor.	9
Tabela 4 - Dez países com maior capacidade total de SF instalada em 2017.	11
Tabela 5 - Dez países com maior instalação de SF em 2017.	12
Tabela 6 - Limites de variação da tensão de regime permanente nos sistemas de distribuição segundo os Procedimentos de Distribuição.	15
Tabela 7- Requisitos de proteção microgeração distribuída.....	16
Tabela 8 - Ajustes recomendados das proteções.	16
Tabela 9- Ponto de conexão com tensão nominal em baixa tensão.....	17
Tabela 10 - Resposta às condições anormais de tensão.....	17
Tabela 11 - Impacto do nível de curto-circuito e o ângulo de fase da impedância da fonte no aumento de tensão devido a instalação de um gerador eólico de 500 kW (TANDE, 1998). ...	27
Tabela 12 - Exemplo de quatro indivíduos e suas avaliações.	40
Tabela 13 - Cenário crítico para a capacidade de hospedagem do sistema IEEE – 33 barras..	54
Tabela 14 - Resultados da estimativa da capacidade de hospedagem dos três casos propostos.	54
Tabela 15 - Tensão resultante nas barras de conexão da GD para a Capacidade de Hospedagem estimada em cada caso.	55
Tabela 16 - Cenário crítico para a capacidade de hospedagem do sistema IEEE – 69 barras..	59
Tabela 17 - Resultados da estimativa da capacidade de hospedagem dos dois casos propostos.	59
Tabela 18 - Tensão resultante nas barras de conexão da GD para a Capacidade de Hospedagem estimada em cada caso.	60
Tabela 19 - CH das barras 006, 007, 011 e 014 do sistema CIGRÉ de acordo com a metodologia de (CARVALHO, 2015).....	70
Tabela 20 - CH das barras 006, 007, 011 e 014 de acordo com o AG.	70
Tabela 21-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 33 barras (Caso I).	70
Tabela 22-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 33 barras (Caso II).	70
Tabela 23-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 33 barras (Caso III).	71

Tabela 24-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso I – FP 0,85 indutivo).....	71
Tabela 25-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso I – FP unitário).....	72
Tabela 26-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso II – FP 0,85 indutivo) – Parte 1.	72
Tabela 27– Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso II – FP 0,85 indutivo) – Parte 2.	72
Tabela 28-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso II – FP unitário) – Parte 1.	73
Tabela 29-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso II – FP unitário) – Parte 2.	73
Tabela 30-Características técnicas dos transformadores.	82
Tabela 31-Características técnicas dos comutadores de taps dos transformadores.	82
Tabela 32-Características técnicas das cargas.	83
Tabela 33-Características técnicas dos alimentadores.....	83
Tabela 34-Resultados de fluxo de potência para o sistema padrão do CIGRÉ em regime de carga pesada e com a presença do gerador distribuído – Parte 1.	85
Tabela 35-Resultados de fluxo de potência para o sistema padrão do CIGRÉ em regime de carga leve e com a presença do gerador distribuído – Parte 2.	85
Tabela 36-Resultados de fluxo de carga de potência para o sistema do CIGRÉ em regime de carga leve e com a presença do gerador distribuído - Parte 1.	86
Tabela 37-Resultados de fluxo de carga de potência para o sistema do CIGRÉ em regime de carga leve e com a presença do gerador distribuído - Parte 1.	86
Tabela 38– Tensões resultantes da máxima injeção de potência estimada pelo AG no sistema CIGRÉ em regime de carga pesada.	89
Tabela 39-Tensões resultantes da máxima injeção de potência estimada pelo AG no sistema CIGRÉ em regime de carga leve.	90

RESUMO

A utilização de fontes de energia próximas aos centros consumidores na forma de Geração Distribuída (GD) vem ganhando destaque no cenário mundial. A alta penetração de GD mudará o paradigma de operação dos sistemas elétricos de tal forma a afetar a qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores. A potência ativa injetada pela GD provoca diversas consequências para os sistemas de distribuição, sendo a sobretensão a mais impactante delas. A inversão de fluxo de potência causada pela GD eleva as tensões da rede de distribuição, podendo levar a sobretensões e conseqüentemente o desligamento da própria GD. Durante a operação com fator de potência unitário da GD, os operadores de distribuição evitam a sobretensão pela redução de potência ativa da GD. É neste cenário que surge o conceito da Capacidade de Hospedagem (CH) da GD, o qual tem o objetivo de estimar a potência máxima injetada pela GD sem comprometer a qualidade da tensão do sistema. Esta dissertação de mestrado estima a capacidade de hospedagem da GD em sistemas de distribuição de média tensão usando Algoritmo Genético (AG), considerando como principal fator limitante o problema da sobretensão. Os testes de desempenho foram realizados nos sistemas IEEE 33 barras e IEEE 69 barras.

Palavras – chaves: Sistemas de distribuição, sobretensão, geração distribuída, capacidade de hospedagem, algoritmo genético.

ABSTRACT

The use of distributed generation (DG) and distributed energy sources (DER) close to the consumer centers has been gaining prominence around the world. The high penetration level of DG will shift the operation paradigm of electric energy systems, affecting power quality delivered to consumers. The active power injection from DG can cause several consequences to distribution systems, being overvoltage issue the most impacting of them. The reverse power flow from the DG units can cause voltage rise issue on distribution networks and consequently the DG shutdown. During unity power factor (pf) operation of DG, the distribution operators control overvoltage by active power curtailment. In this scenario emerges the GD hosting capacity concept, which consists of estimating the maximum power injected by GD without compromising voltage quality of the distribution system. This dissertation estimates the DG hosting capacity on MV distribution systems using genetic algorithms, considering as main limiting factor the overvoltage issue. Performance tests were performed on IEEE 33-bus and IEEE 69-bus systems..

Keywords: Distributed systems, overvoltage, distributed generation, hosting capacity, genetic algorithm.

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Os sistemas de energia elétrica foram desenvolvidos seguindo um arranjo, cujas grandes centrais geradoras, de variadas fontes de energia, fornecem energia elétrica a uma rede de transmissão interligada a longas distâncias de alta e extra alta tensão. O sistema de transmissão é utilizado para transportar energia elétrica, a qual é por sua vez extraída aos sistemas de subtransmissão e distribuição usando transformadores de subestações e de distribuição conectados aos circuitos de média e baixa tensão para entrega aos clientes. No entanto, recentemente tem havido um considerável interesse pela conexão de unidades geradores de médio e pequeno porte à rede de distribuição, nomeadamente conhecidas como Geração Distribuída (GD) (JENKINS et al., 2000).

A GD pode ser conceituada como uma fonte de geração de energia elétrica conectada ao sistema de distribuição, embora uma definição mais detalhada possa variar de país para país, baseada em critérios técnicos como a capacidade de potência e a tensão operativa que ela fornece.

Frente ao cenário mundial de mudanças climáticas e a crescente preocupação com os impactos ambientais decorrentes do uso de fontes de energia não-renováveis, muitos governos tem incentivado o uso de energias renováveis e a redução da emissão dos gases do efeito estufa, levando a uma maior utilização da GD (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010).

Como parte do Protocolo de Kyoto, tanto a União Europeia como o Reino Unido têm de reduzir substancialmente as emissões de CO₂ para ajudar a combater as alterações climáticas. Por isso, a maioria dos governos tem programas para apoiar a exploração das chamadas novas energias renováveis, recursos naturais que incluem energia eólica, micro-hidroelétrica, energia solar fotovoltaica, gás de aterro, energia proveniente de resíduos municipais e geração de biomassa. Fontes de energia renováveis têm uma densidade de energia muito menor do que os combustíveis fósseis e assim, as usinas de geração são menores e podem ser geograficamente distribuídas. Por exemplo, os parques eólicos devem estar localizados em áreas com muito vento, enquanto as usinas de biomassa são geralmente de capacidade modesta devido ao custo de transporte de combustível com densidade de energia relativamente baixa.

Estas pequenas plantas, normalmente com menos de 50 MW de capacidade nominal, são então conectados ao sistema de distribuição. Em muitos países, as novas usinas de geração renovável não são planejadas por autoridades governamentais, e sim pela iniciativa privada. Tais usinas e não são submetidas ao despacho centralizado comum das usinas de grande porte, e sim geram energia de forma distribuída sempre que a fonte primária estiver disponível (JENKINS *et al.*, 2000).

No Brasil, desde a segunda metade do século passado tem havido um forte crescimento da presença de geradores distribuídos do tipo cogeração de biomassa com bagaço de cana. Desde o fim do século passado houve também um aumento na presença da geração eólica e de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), na matriz energética nacional, estimuladas pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), de acordo com Lora e Nascimento (2004) e Carvalho (2015).

O aumento da instalação de GD's em circuitos de redes de distribuição já existentes pode mudar o cenário tradicional de operação dos sistemas elétricos, que antes operavam com um fluxo de potência saindo dos grandes centros geradores em direção aos centros de carga. As redes de distribuição passarão a operar com um fluxo de potência inverso provocado pela injeção de potência da GD, mudando assim o modo de operação destas redes de passivo para ativo. Esta mudança provoca um impacto na qualidade de energia, uma vez que as tradicionais redes de distribuições não foram projetadas para operar deste modo.

Os níveis de penetração de GD em alguns países são tais que já estão começando a causar problemas operacionais para os sistemas de energia elétrica. Dificuldades têm sido relatadas na Dinamarca, Alemanha e Espanha (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010). Um dos principais problemas que surgem é a sobretensão. Tensões elevadas no sistema podem causar mal funcionamento e queima de equipamentos, e conseqüentemente perdas econômicas significativas a consumidores e concessionárias de distribuição de energia elétrica. Vale destacar que as distribuidoras de energia têm por obrigação garantir e manter um nível aceitável de tensões em seus sistemas.

No Brasil, por exemplo, as concessionárias têm que seguir os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Estes são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Diante deste cenário surge um importante conceito, o da Capacidade de Hospedagem (CH) da GD, que pode ser definido como a potência máxima injetada pela GD sem causar violações dos limites operacionais do sistema e impacto na qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Recentes bibliografias propõem diferentes métodos para determinação da CH. Esta dissertação de mestrado propõe uma metodologia de estimação da CH da GD utilizando o Algoritmo Genético (AG).

Para guiar o AG em direção às melhores regiões do espaço de busca que contêm as melhores soluções para o problema foi necessária a seleção de um método adequado para realizar o cálculo do fluxo de potência. O método Newton-Raphson foi escolhido por ser bastante utilizado comercialmente, e por apresentar resultados com boa acurácia.

O próximo tópico apresenta o estado da arte de métodos que estimam da CH da GD.

1.2 Estado da arte

Para evitar o problema de violação de tensão em decorrência do aumento de penetração da GD nos sistemas de distribuição, recentes referências bibliográficas propõem diferentes métodos para determinação da potência máxima que pode ser injetada pela GD sem causar violações dos limites do sistema e impacto na qualidade da energia elétrica, conceito conhecido como Capacidade de Hospedagem da GD (BOLLEN e HASSAN, 2011).

Na literatura encontramos alguns trabalhos que utilizam métodos estocásticos para estimar a CH de Sistemas Fotovoltaicos (SF) integrados a alimentadores de redes de distribuição em esquema de GD. Os métodos consistem em criar de forma estocástica, diferentes cenários de instalação dos SF's. E a partir da análise do resultado do fluxo de carga de cada cenário, determinar a CH do alimentador (DUBEY e SANTOSO, 2017; JOTHIBASU, SANTOSO e DUBEY, 2016; SARMIENTO *et al.*, 2016; AFRICANO, CELEITA e RAMOS, 2017).

Em Ding e Mather (2017), utiliza-se uma simulação baseada em um método estocástico para estimar a CH e um AG para maximizar este valor buscando-se otimizar as variáveis de controle existentes no sistema, como o chaveamento de bancos de capacitores, mudança de TAP, reconfiguração da rede e ajuste de fator de potência. Esta abordagem considera uma previsão no número de geradores distribuídos instalados no sistema e a localização destes como fator determinante da CH. Realizando, na verdade, uma previsão do problema, ao invés de considerar as condições reais do sistema e determinar a CH do sistema em seu estado atual.

Em Carvalho (2015) o autor apresenta e discute uma metodologia expedita para a avaliação da máxima potência ativa líquida que pode ser injetada por um gerador distribuído em um ponto da rede de distribuição de média tensão e dos níveis associados de perdas elétricas. A metodologia considera também a potência reativa injetada ou absorvida pelo gerador distribuído e a distância entre o ponto de conexão e a subestação distribuidora. Considera ainda que a máxima potência injetada é limitada pela capacidade de condução de corrente dos cabos empregados no alimentador local e pelos limites máximo e mínimo aceitáveis para a tensão no ponto de conexão. A metodologia, porém, considera uma modelagem simplificada da rede e de suas cargas, não contemplando equipamentos de controle de tensão, tais como bancos de capacitores ou reguladores de tensão.

Torquato *et al.*, (2018) propõem um algoritmo baseado no método estocástico de Monte Carlo para estimar a capacidade de hospedagem de sistemas fotovoltaicos em sistemas de distribuição de baixa tensão. O objetivo do método proposto é utilizar as informações disponíveis aos engenheiros das concessionárias de energia para o cálculo da capacidade de hospedagem. O algoritmo utiliza como fatores limitantes da CH a sobretensão, a subtensão, o desbalanço de tensão, a capacidade térmica dos condutores e o carregamento dos transformadores. O trabalho considera em suas simulações como variáveis conhecidas: o perfil de carga dos consumidores nas horas de maior injeção de potência pelos SF, a percentagem de consumidores com SF e o nível de penetração. Os sistemas são modelados como circuitos trifásicos equivalentes de Thévenin e os SFs como geradores injetando potência constante com fator de potência unitário. A localização dos SFs é considerada uma variável randômica que gera centenas de cenários através de Monte Carlo. Então é dado um chute inicial de potência instalada e para cada cenário e calculado o fluxo de carga. O resultado é avaliado segundo os fatores limitantes da CH. Se nenhum limite é violado o chute inicial é incrementado até que haja alguma violação. O valor de potência de violação dos limites é considerado, então, a CH de SF do sistema.

Gomes e Ferreira (2018) propõe o cálculo da CH através de um algoritmo genético. O objetivo do algoritmo é encontrar a capacidade máxima de hospedagem da GD respeitando as seguintes restrições: tensão permitida nas barras, potências admissíveis em alimentadores, transformadores e compensadores estáticos, e a capacidade máxima de geração da GD. O autor considera múltiplos geradores com fator de potência unitário conectados em diferentes pontos do sistema injetando potência em um cenário de carga leve. O AG proposto busca pela posição de TAP, a potência reativa de bancos de capacitores e a potência gerada por cada uma das GDs instaladas. Este trabalho não contempla a variação de fator de potência possível em muitos tipos

de GDs e nem a presença de outros equipamentos na rede como reguladores de tensão, que também influenciam a CH.

Medeiros e Falcão (2018) também utiliza um AG para o cálculo da CH. Em seu trabalho ele considera como restrições a capacidade dos trechos, os limites de tensão e perdas, além de considerar apenas sistemas fotovoltaicos como GD. Devido as variações de carga de geração fotovoltaica durante o dia, o autor escolhe determinados intervalos do dia que são mais críticos para a CH, e assim basear as suas análises. Sendo assim são escolhidos três pontos de operação: Valor médio da carga (50%) e o pico de GD; Valor máximo da demanda (100%) e 10% do pico da GD; Valor mínimo da demanda (25%) e 10% do pico da GDF. E quatro cenários de instalação da GD: instalada em todas as barras de carga; GD somente pode ser instalada nas barras terminais da rede; GD instalada a meio caminho do alimentador e nas barras terminais; GD instalada em uma única barra. No sistema teste utilizado considera a tensão da barra da subestação principal fixa em 1 pu, e não considera a presença de recursos de controle de tensão e redução de perdas como *On Load Tap Changers* (OLTCs), bancos de capacitores, reguladores de tensão e inversores com fator de potência regulável.

Ding e Mather (2017) aplica Monte Carlo na estimação da capacidade de hospedagem através da criação de cenários que combinam o nível de penetração de sistemas fotovoltaicos, a localização dos painéis ao longo do alimentador e a potência gerada por cada sistema. Os cenários são gerados para os níveis de penetração de 2%, 4%, 6%... até atingir 100%. A capacidade de hospedagem é a potência máxima dos sistemas fotovoltaicos que não causam sobretensões no alimentador. O autor propõe também um algoritmo genético que busca maximizar a CH através do controle do chaveamento de banco de capacitores, controle de Tap (OLTC), de reguladores de tensão, reconfiguração da topologia da rede e reconfiguração do inversor dos SF.

1.3 Objetivo do trabalho

Este trabalho propõe estimar a CH da GD considerando como principal fator limitante a elevação dos níveis de tensão da rede de distribuição, aplicando-se para isto uma técnica metaheurística baseada em AG. O algoritmo busca a máxima injeção de potência ativa pela GD no sistema, considerando os diferentes fatores presentes na rede de distribuição que agravam o problema de sobretensão, como o chaveamento automático de banco de capacitores, o nível de carregamento da rede, a presença de OLTC na subestação principal e o fator de potência dos

geradores. O algoritmo proposto pode ser uma ferramenta de auxílio em estudos que precedem a instalação de novas GDs nos sistemas de distribuição das concessionárias de energia elétrica, determinando a CH da rede e, assim, garantindo a qualidade de energia aos consumidores.

2 Geração Distribuída

2.1 Introdução

Este capítulo introduz os conceitos de GD e CH, mostrando uma visão geral da utilização da GD no Brasil e no mundo através de dados disponibilizados pela Agência Nacional de energia Elétrica (ANEEL). É abordado também através de um breve resumo a Resolução Normativa ANEEL 482/2012 (ANEEL, 2018) que define o que é considerado GD no Brasil e os quesitos que devem ser atendidos. Além disto, são apresentados alguns pontos importantes, quando se fala em GD, dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST).

2.2 Conceito

Os sistemas elétricos convencionais possuem uma filosofia de operação que consiste em grandes centros geradores de energia elétrica, a qual é transmitida através das redes de distribuição, passando por vários níveis de tensão até chegar ao consumidor final. Porém esta filosofia tem mudado, principalmente em resposta aos incentivos governamentais a utilização de energias renováveis como forma de reduzir a emissão dos gases do efeito estufa e, conseqüentemente, os efeitos das mudanças climáticas. Neste cenário, surge o conceito de Geração Distribuída (GD) que são fontes de energias conectadas a rede de distribuição. A crescente instalação destes geradores traz grandes impactos para a operação dos sistemas elétricos, uma vez que as redes de distribuição eram consideradas passivas, projetadas para fluxos de potência unidirecionais, e para acomodar apenas cargas de clientes, sendo controladas pelos grandes centros de geração.

2.3 GD no Brasil e no Mundo

Por volta dos anos 90 estudos passaram a apontar os efeitos nocivos da emissão de gases do efeito estufa para as mudanças climáticas do planeta. Surgindo uma preocupação mundial com o controle da queima de combustíveis fósseis, sendo o setor elétrico visto como uma oportunidade mais simples e imediata para o problema. Governos, então, passaram a incentivar cada vez mais a utilização de fontes de energia renovável. Um exemplo dessas políticas é a

meta de 2007 da União Europeia de até 2020 gerar um total 20% de toda a energia consumida através de fontes de energia renovável (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010). No Brasil Desde 17 de abril de 2012, entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 (ANEEL, 2012), a qual determina que o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade, sendo conceituadas como micro e minigeração distribuídas de energia elétrica (ANEEL, 2018).

Com os incentivos governamentais, diferentes tipos de fontes de energia começaram a ser conectadas nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Na Alemanha, por exemplo, a utilização de painéis fotovoltaicos em residências e prédios comerciais ganhou grande destaque. Cada país define o que é considerado geração distribuída baseado muitas vezes na potência instalada ou no nível de tensão de conexão da fonte. As definições geralmente seguem as especificações técnicas de cada país. No Brasil, é denominado microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para a fonte hídrica), conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2018).

No Brasil, desde a segunda metade do século passado tem havido um forte crescimento da presença de geradores distribuídos do tipo cogeração de biomassa com bagaço de cana. Do fim do século passado para cá cresceu também a presença da geração eólica e de PCHs, pequenas centrais hidrelétricas, na matriz energética nacional, estimuladas pelo PROINFA, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (LORA e NASCIMENTO, 2004; CARVALHO, 2015). Segundo a ANEEL existiam 42685 GDs instaladas no Brasil no final de 2018, totalizando em torno de 500MW, sendo 99,4% destes geradores a partir de sistemas fotovoltaicos. A Tabela 1 apresenta uma lista da quantidade de GD instalada no Brasil por tipo de fonte de geração (ANEEL, 2018). Observando a Tabela 2 é possível identificar o crescimento exponencial do número de GDs instaladas no Brasil desde 2012, e na Tabela 3 nota-se que grande parte das GDs instaladas são referentes a consumidores residenciais.

Tabela 1 - Fontes de GD instaladas no Brasil.

Combustível	Qtd GDs	UCs Rec Créditos	Pot Instalada (KW)
Radiação Solar	42449	51571	426.755,74
Biogás – RA	76	433	9.146,00

Potencial Hidráulico	58	7417	52.079,08
Cinética do Vento	57	100	10.314,40
Biogás – AGR	16	29	2.148,86
Biogás - RU	13	21	3.064,58
Casca de Arroz	4	6	3.700,00
Resíduos Florestais	4	4	8.110,00
Biogás – Floresta	3	6	174,00
Gás Natural	3	4	3.828,68
Gás de Alto Forno - Biomassa	2	9	5.085,00
Total	42685	59600	524.406,34

Fonte: (ANEEL, 2018).

Tabela 2 – Quantidade de GDs instaladas no Brasil ao longo dos anos.

ANO	Qtd GDs	UCs Créditos	Pot Instalada (KW)
2018	20586	27627	265.232,01
2017	13624	22269	173.814,83
2016	6648	7564	68.352,07
2015	1456	1727	11.722,48
2014	296	322	3.407,70
2013	59	72	1.417,06
2011	11	14	44,43
2012	3	3	411,30
2007	1	1	0,50
2008	1	1	3,96
Total	42685	59600	524.406,34

Fonte: (ANEEL, 2018).

Tabela 3 - Quantidade de GDs instaladas por classe de consumidor.

Classe	Qtd GDs	UCs Rec Créditos	Pot Instalada (KW)
Residencial	32364	36541	152.739,52
Comercial	7007	18065	241.969,68
Rural	1802	2998	47.725,41
Industrial	1127	1413	65.083,6
Poder Público	332	526	15.277,522
Serviço Público	48	5	1.556,41
Iluminação Pública	5	5	54,20

Total	42685	59600	524.406,34
--------------	--------------	--------------	-------------------

Fonte: (ANEEL, 2018).

O grande crescimento do número de instalações de GDs no Brasil, principalmente de SFs, deve-se aos incentivos fiscais como (MME, 2016):

- Chamada Pública (CP) ANEEL – De 2014 a 2016 entraram em operação as plantas FV da CP nº 013/2011 - Projetos Estratégicos: “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira” (24,6 MW contratados, ao custo de R\$ 396 milhões).
- Isenção de IPI - De acordo com o Decreto nº 7.212, de 15/06/2010, são imunes à incidência do Imposto sobre Produtos Industrializados, a energia elétrica, derivados de petróleo, combustíveis e minerais.
- Isenção de ICMS - Pelo Convênio ICMS 101/97, celebrado entre as secretarias de Fazenda de todos os estados, há isenção do imposto Sobre Circulação de Mercadorias (ICMS) para as operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica, válido até 31/12/2021.
- Desconto na TUST/TUSD - A RN ANEEL 481/2012, ampliou para 80% o desconto na tarifa de uso do sistema de transmissão/distribuição (TUST/TUSD) para empreendimentos com potência inferior a 30 MW.
- Isenção de ICMS, PIS e Confins na Geração Distribuída – Praticamente todos os estados isentam o ICMS sobre a energia que o consumidor gera. O tributo se aplica apenas sobre o excedente que ele consome da rede, e para instalações inferiores a 1 MW. O mesmo vale para o PIS e Confins (Lei 13.169, de 6/10/2015).
- Redução do Imposto de Importação – A Resolução CAMEX 22, de 24/03/2016, prorroga até 31/12/2017 a manutenção de 2% para a alíquota incidente sobre bens de capital destinados à produção de equipamentos de geração solar fotovoltaica.
- Inclusão no programa “Mais Alimentos” - A partir de novembro de 2015, os equipamentos para produção de energia solar e eólica passaram a fazer parte do programa “Mais Alimentos”, o que possibilita financiamentos a juros mais baixos.

- Apoio BNDES: pela Lei 13.203, de 8/12/2015, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, foi autorizado a financiar, com taxas diferenciadas, os projetos de geração distribuída em hospitais e escolas públicas.
- Plano Inova Energia – Fundo de R\$ 3 bilhões, criado em 2013, pelo BNDES, Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ANEEL, com foco na empresa privada e com o objetivo de pesquisa e inovação tecnológica nas áreas de: redes inteligentes de energia elétrica, linhas de transmissão de longa distância em alta tensão; energias alternativas, como a solar; e eficiência de veículos elétricos.

O crescimento do número de GDs instaladas se intensificou em todo o mundo nos anos recentes, principalmente com a proliferação da geração de base fotovoltaica (VILLALVA e GAZOLI, 2012; CARVALHO, 2015). Na Alemanha, por exemplo, a geração fotovoltaica tem crescido fortemente e vem atingindo patamares impressionantes, tendo registrado em setembro/2012 40 % da demanda total da carga, sendo cerca de 95% desta geração conectada ao sistema de distribuição de média e baixa tensão e cerca de 70% conectada ao sistema de distribuição de baixa tensão (APPEN, BRAUN e STELTZ, 2013; CARVALHO, 2015).

Embora reduzindo o ritmo de crescimento nos últimos dois anos, os sistemas fotovoltaicos na Alemanha atingiram em 2014 a marca de 38.000 MWp de potência instalada, tornando-se a fonte com maior participação individual em termos de capacidade instalada, 37%. Na Itália, outro exemplo de crescimento rápido da penetração da geração fotovoltaica, no ano de 2012 foi registrado o maior crescimento na capacidade instalada de geração fotovoltaica no mundo, de 9 GW, correspondendo a 32 % do total (APPEN, STELTZ e NIEDERMEYER, 2015; MONETA, CARLINI e VIGANÒ, 2014; CARVALHO, 2015). Em 2017 a China se destacou tendo a maior capacidade instalada de SF com um total de 131 GW, mais que o dobro do total do segundo país, EUA. A Tabela 4 apresenta os dez países que se destacaram em 2017 em termos de potência instalada de SF. A Tabela 5 apresenta o rank dos 10 países com mais instalações de SFs em 2017. A Figura 1 apresenta o crescimento exponencial da instalação de SFs no mundo ao longo dos anos (IEA, 2018).

Tabela 4 - Dez países com maior capacidade total de SF instalada em 2017.

Países	Capacidade Total Instalada em GW
China	131
USA	51
Japão	49

Alemanha	42
Itália	19,7
Índia	18,3
UK	12,7
França	8
Austrália	7,2
Espanha	5,6

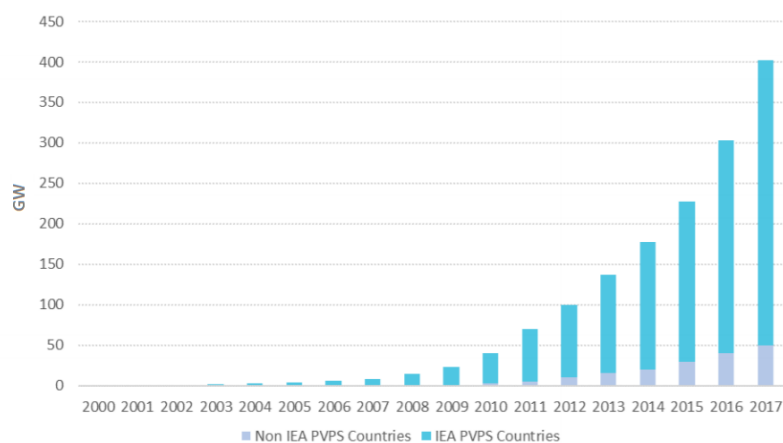
Fonte: (IEA, 2018).

Tabela 5 - Dez países com maior instalação de SF em 2017.

Países	Potência Total Instalada em GW
China	53
USA	10,6
Índia	9,1
Japão	7
Turquia	2,6
Alemanha	1,8
Austrália	1,25
Korea	1,2
AK	0,9
Brasil	0,9

Fonte: (IEA, 2018).

Figura 1 - Evolução da capacidade total instalada de SFs em GW ao longo dos anos.



Fonte: (IEA, 2018).

2.4 Resolução Normativa nº 482/2012

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade (ANEEL, 2018).

Com o objetivo de reduzir os custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração; compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento (Resolução Normativa nº 414/2010); aumentar o público alvo; e melhorar as informações na fatura, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015 revisando a Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2018).

Segundo as novas regras, que começaram a valer em 1º de março de 2016, é permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes, podendo também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora (ANEEL, 2018).

A ANEEL criou ainda a figura da “geração compartilhada”, possibilitando que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados.

- Condições para a adesão

Compete ao consumidor a iniciativa de instalação de micro ou minigeração distribuída – a ANEEL não estabelece o custo dos geradores e nem de eventuais condições de financiamento. Portanto, o consumidor deve analisar a relação custo/benefício para instalação dos geradores, com base em diversas variáveis: tipo da fonte de energia (painéis solares, turbinas eólicas, geradores a biomassa, etc), tecnologia dos equipamentos, porte da unidade consumidora e da

central geradora, localização (rural ou urbana), valor da tarifa à qual a unidade consumidora está submetida, condições de pagamento/financiamento do projeto e existência de outras unidades consumidoras que possam usufruir dos créditos do sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2018).

Por fim, é importante ressaltar que, para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão (grupo B), ainda que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, será devido o pagamento referente ao custo de disponibilidade – valor em reais equivalente a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) ou 100 kWh (trifásico). Já para os consumidores conectados em alta tensão (grupo A), a parcela de energia da fatura poderá ser zerada (caso a quantidade de energia injetada ao longo do mês seja maior ou igual à quantidade de energia consumida), sendo que a parcela da fatura correspondente à demanda contratada será faturada normalmente (ANEEL, 2018).

2.5 Procedimentos de Rede

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Os principais objetivos do PRODIST, conforme definido no Módulo 1 (ANEEL, 2018; CARVALHO, 2015), são:

- garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;
- propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica;
- estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais;
- assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL;
- disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede.

No Módulo 3 (ANEEL, 2018) são definidos os requisitos de projeto de instalações de conexão, que devem ser projetadas observando as características técnicas, normas, padrões e

procedimentos específicos do sistema de distribuição da acessada. Dentre outros estabelece que (CARVALHO, 2015):

- o nível de tensão na conexão dever ser de baixa ou média tensão para potência instalada entre 151 kW e 500 kW, de média ou alta tensão para potência instalada entre 501 kW e 30 MW e de alta tensão para potência instalada maior que 30 MW;
- centrais geradoras com potência instalada acima de 300 kW devem possuir sistemas de controle automático de tensão e de frequência;
- a acessada deve implementar medidas preventivas que impeçam a ocorrência de sobretensões e subtensões sustentadas em seu sistema de distribuição, decorrentes da inserção e retirada de centrais geradoras, até a atuação dos reguladores de tensão em operação.

No Módulo 8 (ANEEL, 2018) são estabelecidos os critérios e procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, dentre os quais destacam-se os listados a seguir.

- o conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deverá compreender o registro de leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, salvo as que eventualmente sejam expurgadas no caso de ocorrência de interrupções de energia, quando as leituras devem ser expurgadas e substituídas por igual número de leituras válidas (CARVALHO, 2015);
- após a obtenção do conjunto de leituras válidas, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária e o índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica, que não devem exceder respectivamente 3 % e 0,5 %;
- as tensões de regime permanente para os pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 1 kV e inferior a 69 kV devem observar as faixas de variação da tensão medida em relação à tensão contratada indicadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites de variação da tensão de regime permanente nos sistemas de distribuição segundo os Procedimentos de Distribuição.

Tensão de Suprimento	Normal	Precário	Crítico
Média Tensão (1 kV > V _n > 69 kV)	0,93 p.u. ≤ V ≤ 1,05 p.u.	0,90 p.u. ≤ V ≤ 0,93 p.u.	V < 0,90 p.u. Ou V > 1,05 p.u.
Baixa Tensão - I (V _n = 380/220 V)	0,92 p.u. ≤ V ≤ 1,05 p.u.	0,87 p.u. ≤ V ≤ 0,92 p.u. Ou 1,05 p.u. ≤ V ≤ 1,06 p.u.	V < 0,87 p.u. Ou V > 1,06 p.u.
Baixa Tensão – II	0,92 p.u. ≤ V ≤ 1,05 p.u.	0,87 p.u. ≤ V ≤ 0,92 p.u.	V < 0,87 p.u.

(V _n = 220/127 V)		Ou 1,05 p.u. ≤ V ≤ 1,06 p.u.	Ou V > 1,06 p.u.
------------------------------	--	---------------------------------	---------------------

Fonte: (CARVALHO, 2015)

2.6 Normas da concessionária

A Centrais Elétricas do Pará (CELPA) é a concessionária de distribuição de energia elétrica para todo o Estado do Pará. Sua norma NT.020.EQTL define diversos fatores para a conexão de microgeração distribuída ao seu sistema. Ela define padrões de proteções necessárias para a GDs conectadas conforme tabela abaixo.

Tabela 7- Requisitos de proteção microgeração distribuída.

REQUISITOS DE PROTEÇÃO	POTÊNCIA INSTALADA ATÉ 75 kW
Elemento de desconexão	Sim
Elemento de interrupção (52)	Sim
Proteção de subtensão (27) e sobretensão (59)	Sim
Proteção de subfrequência (81U) e sobrefrequência (81O)	Sim
Relé de sincronismo (25)	Sim
Anti-ilhamento (78 e 81 df/dt – ROCOF)	Sim
Medição	Sistema de Medição Bidirecional

Fonte: (CELPA, 2017)

Os ajustes de proteção recomendados pela concessionária são:

Tabela 8 - Ajustes recomendados das proteções.

REQUISITO DE PROTEÇÃO	POTÊNCIA INSTALADA ATÉ 75 kW	TEMPO MÁXIMO DE ATUAÇÃO
Proteção de subtensão (27)	0,8 p.u.	5 seg

Proteção de sobretensão (59)	1,1 p.u.	5 seg
Proteção de subfrequência (81U)	59,5 Hz	5 seg
Proteção de sobrefrequência (81O)	60,5 Hz	5 seg
Relé de sincronismo (25)	10° / 10 % tensão / 0,3 Hz	N/A
Anti-ilhamento (78 e 81 df/dt - Rocof)		N/A

Fonte: (CELPA, 2017)

A tensão contratada no ponto de conexão da unidade consumidora atendida em baixa tensão (rede secundária de distribuição), também denominada tensão de referência (TR), poderá sofrer variações conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9- Ponto de conexão com tensão nominal em baixa tensão.

Tensão Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)	
	220 / 127 V	380 / 220 V
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(191 \leq TL \leq 202 \text{ ou } 231 \leq TL \leq 233)$ / $(110 \leq TL \leq 117 \text{ ou } 133 \leq TL \leq 135)$	$(331 \leq TL \leq 350 \text{ ou } 399 \leq TL \leq 403)$ / $(191 \leq TL \leq 202 \text{ ou } 231 \leq TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) /$ $(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) /$ $(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: (CELPA, 2017)

Ainda, quanto a sistemas fotovoltaicos, a concessionária solicita que, quando o sistema perceber uma condição anormal de tensão, ele deve atuar de forma a cessar o fornecimento à rede da concessionária, quando os valores de tensões eficazes no ponto de conexão não estiverem em conformidade com os valores estabelecidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resposta às condições anormais de tensão.

TENSÃO NO PONTO DE CONEXÃO COMUM (% em relação à $V_{NOMINAL}$)	TEMPO MÁXIMO DE DESLIGAMENTO (NOTA 5)
$V < 80 \%$	0,4 s
$80 \% \leq V \leq 110 \%$	Regime normal de operação
$110 \% < V$	0,2 s

2.7 Conclusão

Este capítulo apresentou os principais aspectos da GD e introduziu o conceito de CH. Foi apresentado uma visão geral do crescimento das instalações de geradores distribuídos no Brasil e no mundo. E por fim abordou-se a resolução normativa da ANEEL para a instalação de GD nas redes de distribuição brasileiras e os procedimentos de rede (PRODIST). O próximo capítulo apresenta os principais fatores limitantes da CH.

3 Capacidade de Hospedagem da Geração Distribuída

3.1 Introdução

As características dos sistemas de distribuição e os equipamentos presentes nestes podem influenciar diretamente na Capacidade de Hospedagem de Geração Distribuída. Este capítulo discute os principais fatores, já abordados pela literatura atual, que podem minimizar a CH. É abordado com mais ênfase a restrição da elevação do nível de tensão por este ser o fator de maior impacto para os sistemas de distribuição quando o número de GDs presentes nos sistemas é muito grande.

3.2 Conceito

A introdução da geração distribuída nas redes de distribuição impactará no desempenho dos sistemas de energia elétrica. Além de proporcionar a diminuição dos impactos ambientais provenientes da geração de energia elétrica, a geração distribuída também reduz a capacidade de geração centralizada, aumenta a capacidade de utilização do sistema de transmissão de distribuição e aprimora a segurança do sistema (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010). A presença da geração distribuída sinaliza para uma condição mais favorável para a expansão e operação dos sistemas de distribuição, disponibilizando energia mais próxima da carga e, conseqüentemente, melhorando os níveis de tensão do sistema e reduzindo perdas (CHOWDHURY, CHOWDHURY e CROSSLEY, 2009; CARVALHO, 2015).

Todavia, a medida em que aumentam progressivamente suas potências, passando a superar em muitos casos as demandas das cargas instaladas nos alimentadores onde estão conectadas, as gerações distribuídas introduzem novos paradigmas no planejamento e na operação dos sistemas elétricos. Na verdade, todas as mudanças na geração ou na carga afetam o desempenho dos sistemas. Para uma avaliação justa do impacto, que por sua vez é uma base para discussão sobre as medidas a serem tomadas, indicadores de desempenho são necessários. Surgindo assim, o conceito da Capacidade de Hospedagem (CH) (KATIRAEEL e AGUERO, 2011) (CARVALHO, 2015; BOLLEN e HASSAN, 2011).

A capacidade de hospedagem da GD é conceituada como a máxima quantidade de geração distribuída que pode ser conectada sem resultar em uma qualidade ou confiabilidade inaceitável para os consumidores. Podendo usar diversos indicadores como parâmetros. Como por exemplo, a magnitude máxima de tensão experimentada por qualquer um dos clientes em uma rede de distribuição. Adicionar geração ao alimentador resultará em um aumento para essa magnitude máxima de tensão. Para pequenas quantidades de geração o aumento será pequeno, mas para maiores quantidades de geração o nível de tensão pode tornar-se inaceitavelmente alto. Nesse caso, a CH foi excedida (BOLLEN e HASSAN, 2011).

A CH é um parâmetro que pode auxiliar nos estudos que precedem a conexão de uma GD nos sistemas de energia elétrica, indicando os limites da rede. Em alguns países, simples regras de projeto são usadas para indicar a CH de geração distribuída que pode ser conectada em diferentes pontos do sistema de distribuição. Essas regras tendem a ser cálculos bastante restritivos. Resumidamente, a CH depende altamente da escolha do indicador de desempenho e o do modelo utilizado para estimar o impacto da geração distribuída (BOLLEN e HASSAN, 2011; JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010).

Para os autores Bollen e Hassan (2011), por exemplo, quando se considera a sobretensão como principal indicador, a CH se torna a quantidade máxima de geração que resulta em um aumento de tensão equivalente a margem de sobretensão. Então, a CH pode ser facilmente calculada na Equação 1, onde $\delta_{\max} = \Delta_{\max}/U$ é a margem de tensão relativa (em porcentagem), Δ_{\max} é a margem de tensão absoluta (em volt), U a tensão da barra de conexão (em volt), e R a resistência do cabo.

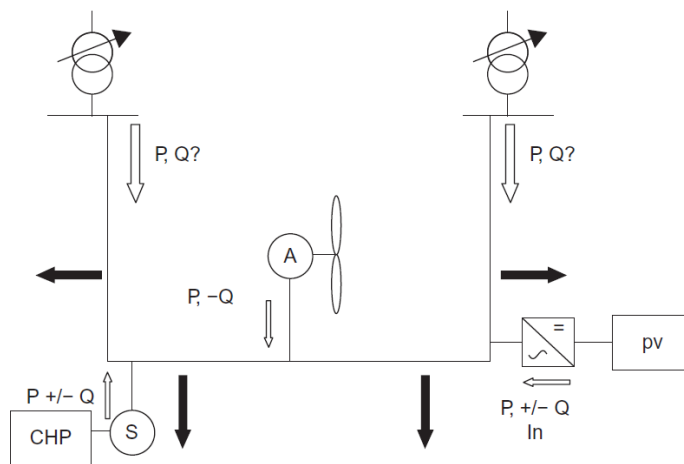
$$P_{\max} = \frac{U^2}{R} \times \delta_{\max} \quad (1)$$

3.3 Impacto da Sobretensão

Tradicionalmente, os sistemas de distribuição foram projetados para receber a energia da rede de transmissão e distribuí-la aos clientes. Assim, o fluxo de potência ativa (P) e potência reativa (Q) acontece do maior nível de tensão para o menor. No entanto, com a significativa penetração da GD, os fluxos de potência podem tornar-se inversos e a rede de distribuição deixar de ser um circuito passivo, que apenas entrega energia as cargas, e passar a ser um sistema ativo com fluxo e tensões determinados pela geração distribuída e cargas. Isso é mostrado esquematicamente na Figura 2. Por exemplo, o esquema

combinado de calor e energia (CHP) com o gerador síncrono (S) irá exportar energia real quando a carga elétrica das instalações fica abaixo da produção do gerador, mas pode absorver ou exportar potência, dependendo da configuração do sistema de excitação do gerador. A turbina eólica de velocidade fixa irá exportar energia real, mas é provável que absorva a energia reativa uma vez que seu gerador de indução (às vezes conhecido como assíncrono) (A) requer uma fonte de potência reativa para operar. O conversor de fonte de tensão do sistema fotovoltaico (PV) permitirá a exportação de potência real com um fator de potência definido, conforme indicado na Figura 2. Assim, a potência que flui através dos circuitos pode estar em qualquer direção, dependendo da potência ativa e reativa das cargas comparadas com as saídas do gerador e quaisquer perdas na rede (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010).

Figura 2 - Sistema de distribuição com GD.



Fonte: (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010).

Os impactos nas redes de distribuição causados pelo fluxo inverso surgem em altos níveis de penetração da geração distribuída, problemas operacionais foram relatados na Dinamarca, Alemanha e Espanha, países que têm altos níveis de penetração de energias renováveis e geração distribuída (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010).

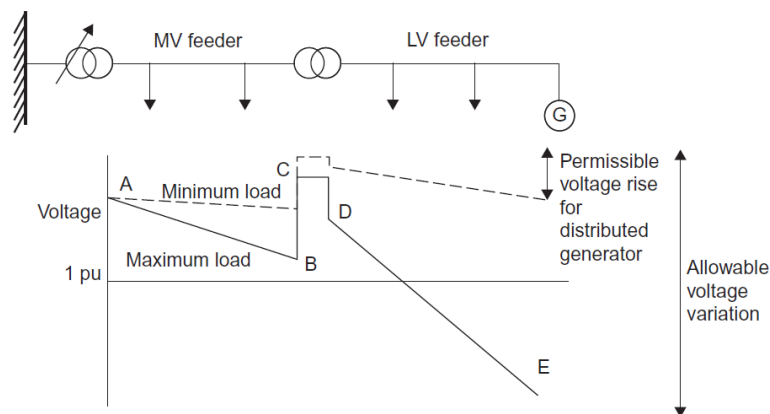
O potencial aumento de tensão, devido a um grande número de painéis fotovoltaicos conectados à rede de baixa tensão, foi calculada para o centro da cidade de Leicester, Reino Unido (INFILD e THOMSON, 2007; BOLLEN e HASSAN, 2011). Modelos estocásticos são usados para a carga de cada residência. Um dia claro e ensolarado é usado para atingir o pior aumento de tensão, embora não seja típico para essa parte da Inglaterra. Quando 50% das casas estão equipadas com energia solar de cerca de 2 kW, a magnitude máxima da tensão aumenta

de 250 para 254V. Com uma sobretensão de 110% (253 V) limite, esse aumento de tensão seria inaceitável. Um limite de sobretensão em 110% definiriam a capacidade de hospedagem para 30% dos domicílios, o que ainda é um nível de penetração significativo (BOLLEN e HASSAN, 2011).

A sobretensão é tradicionalmente menos preocupante em sistema de distribuição. Se a tensão no início de um alimentador de média tensão estiver próxima ao limite superior da faixa de tensão permitida, o risco de sobretensões nos terminais do equipamento do usuário conectado no fim do alimentador será pequeno. A introdução da geração distribuída mudou isso e as sobretensões tornaram-se uma preocupação mais séria. Especialmente para locais distantes de uma subestação principal, o aumento de tensão é o principal fator limitante para a conexão da geração distribuída (BOLLEN e HASSAN, 2011).

As concessionárias de distribuição têm a obrigação de fornecer energia a seus consumidores em um nível de tensão adequado, respeitando limites específicos, que podem variar de país para país. A Figura 3 exemplifica o perfil de tensão de um típico sistema de distribuição em radial (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010).

Figura 3 - Variação de tensão em um alimentador radial.



Fonte: (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010).

A: a tensão é mantida constante por comutador de TAP do transformador de distribuição

A – B: queda de tensão devido a carga no alimentador de média tensão (MV)

B – C: aumento de tensão devido ao TAP do transformador MV / LV

C – D: queda de tensão no transformador MV / LV

D – E: queda de tensão no alimentador de baixa tensão

A Figura 3 mostra que a relação de TAP do transformador MV / LV foi ajustada em sua instalação para que, em momentos de carga pesada mesmo o cliente mais remoto receberá tensão em um nível aceitável. Durante a carga mínima, a tensão recebida por todos os clientes é um pouco abaixo do máximo permitido. Se um gerador de distribuição for, então, conectado ao final do circuito, os fluxos de potência no circuito vão mudar e, portanto, o perfil de tensão. Nos momentos em que a GD está injetando potência na rede de distribuição o nível de tensão do circuito é elevado podendo ultrapassar o limite máximo de tensão permitido. Sendo crítico para o sistema a injeção de potência pela GD em momentos de carga leve (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010).

Para uma rede de distribuição com carga leve, o aumento de tensão aproximado (ΔV) causada por um gerador que exporta energia real e reativa é dada pela Equação 2 (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010):

$$\Delta V = \frac{PR + XQ}{V} \quad (2)$$

Onde P é a potência ativa injetada pelo gerador, Q a potência reativa injetada pelo gerador, R é a resistência do sistema e X a reatância do sistema, e V a tensão nominal do sistema. Em alguns casos, o aumento de tensão pode ser limitado pela reversão do fluxo de potência reativa (Q). Isto pode ser conseguido usando um gerador de indução, subexcitando uma máquina síncrona ou operar um inversor de modo a absorver potência. A inversão do fluxo de potência reativa pode ser efetiva em sistemas de média tensão que tendem a ter uma relação maior de X / R. No entanto, nos circuitos de distribuição de cabos de baixa tensão, o efeito dominante é o de potência ativa (P) e a resistência da rede (R) (JENKINS, EKANAYAKE e STRBAC, 2010).

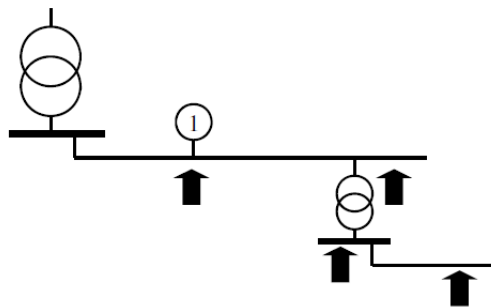
Sendo assim, o aumento de tensão devido a injeção de potência ativa é proporcional a parte resistiva da impedância no ponto de conexão da GD. Em barras distantes da subestação supridora o aumento de tensão pode ser mais significante. Em (BOLLEN e HASSAN, 2011), a quantidade de energia ativa necessária para o aumento de 1% na tensão é calculado para diferentes seções transversais e comprimentos de alimentadores. Para 10 kV, aumento de tensão de 1,7% é obtido pela conexão de uma unidade de 1 MW a 5 km da barra principal de um alimentador de seção transversal de 50 mm². Para um alimentador de seção transversal de 240 mm², o aumento é de apenas 0,4%. Em sistemas de baixa tensão, pequenas unidades geradoras dão um aumento significativo de tensão. Conectando uma unidade de 10 kW em um alimentador de 50 mm², a 500 m do transformador de distribuição, resulta em um aumento de

tensão de 3%. Esses tamanhos de unidade são muito menores que a carga máxima do alimentador.

A conexão de geradores distribuídos nos sistemas de distribuição resulta em um aumento de tensão na barra de conexão que pode ser calculada aproximadamente pela Equação 3, onde R é a resistência da fonte nos terminais do gerador, P_{ger} é a potência injetada e U a tensão nominal. E essa variação de tensão pode ser experimentado por todas as barras a jusante do ponto de conexão do gerador, como mostra a Figura 4 (BOLLEN e HASSAN, 2011).

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R \times P_{gen}}{U^2} \quad (3)$$

Figura 4 - Aumento relativo de tensão é igual para todas as posições indicadas dado ao gerador distribuído.



Fonte: (BOLLEN e HASSAN, 2011).

O que determina o aumento de tensão experimentado por um determinado cliente devido a um gerador distribuído instalado em um determinado local é a resistência da fonte no ponto de acoplamento comum entre o gerador e o cliente. O ponto de acoplamento comum é um ponto importante porque é a parte resistiva da impedância da fonte no ponto de acoplamento comum que determina o aumento de tensão experimentado por um determinado cliente devido a um determinado gerador. É esta a resistência usada na Equação (3) para calcular o aumento de tensão. Quando o transformador da subestação principal está equipado com comutadores de TAP automáticos, a voltagem no barramento principal é mantida constante. Nesse caso, a resistência em (3) é a resistência R entre o ponto comum de acoplamento e o barramento principal (BOLLEN e HASSAN, 2011).

A diferença de tensão do maior nível de tensão de todo o sistema e o limite de sobretensão pode ser identificado como margem de sobretensão. Cada cliente tem uma margem

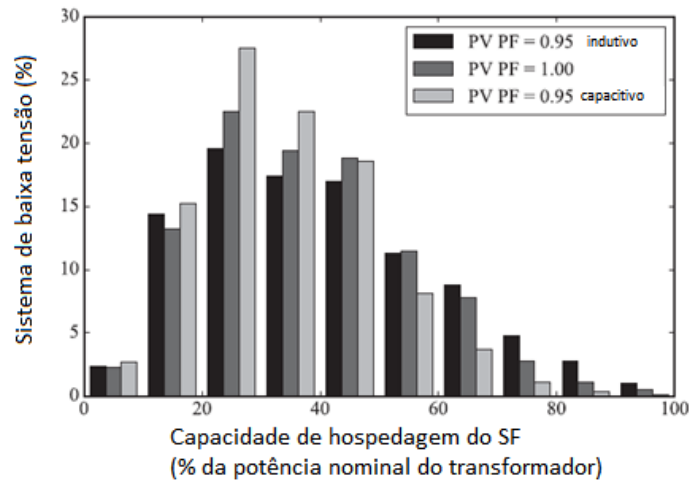
de sobretensão diferente. A conexão de um gerador para um alimentador de distribuição dá o mesmo aumento relativo de tensão para cada localização a jusante do gerador. O que importa, portanto, é o menor valor de margem de sobretensão a jusante do local em que o gerador está ligado para a determinação da capacidade de hospedagem (BOLLEN e HASSAN, 2011).

- Fator de potência

O fator de potência tem grande influência na CH em termos de sobretensão. O maior aumento de tensão é obtido para geradores operando com fator de potência unitário. Geradores consumindo potência reativa (fator de potência indutivo), semelhante a geradores de indução, resulta em menor aumento de tensão. Já um fator de potência capacitivo irá agravar o problema de sobretensão, reduzindo a capacidade de hospedagem. Quando escolhido um fator indutivo equivalente a relação R/X , o aumento de tensão pode ser reduzido a zero. Quando o gerador está equipado com uma interface eletrônica de potência, um fator de potência de atraso constante pode ser escolhido de tal forma que o aumento de tensão é zero para qualquer quantidade de energia produzida (BOLLEN e HASSAN, 2011).

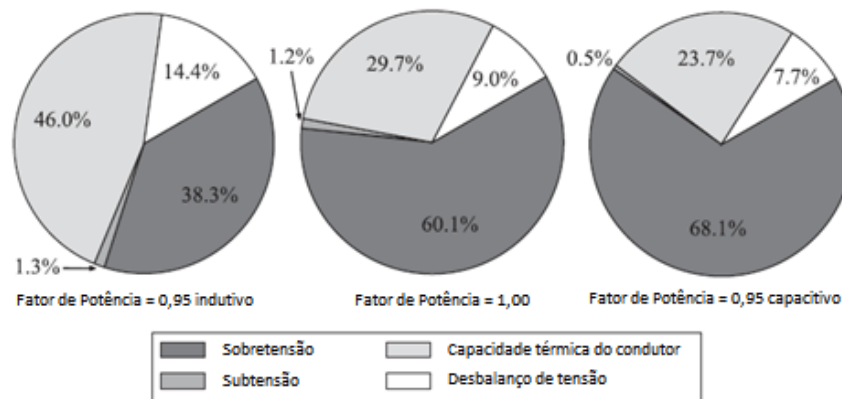
A referência Torquato et al. (2018) faz um estudo do impacto de um fator de potência diferente de um no aumento do nível de tensão e na capacidade de condução dos cabos e, conseqüentemente, na CH. Pode-se observar nas Figuras 5 e 6 que quando a GD opera com fator de potência indutivo, a CH média aumenta cerca de 6,1% e a capacidade de condução se torna um impacto mais restritivo. O consumo de potência reativa neutraliza o aumento de tensão causado pela injeção de potência ativa e o nível de tensão se torna um impacto menos restritivo, porém as correntes se elevam, como pode ser visto na Figura 10. A injeção de potência reativa (fator de potência capacitivo) agrava o aumento de nível de tensão, resultando em uma redução mais significativa da CH (11,6% de redução para um fator de potência capacitivo no exemplo da Figura 5)

Figura 5 - Impacto do fator de potência da GD na CH.



Fonte: (TORQUATO *et al.*, 2018).

Figura 6 - Impacto do fator de potência da GD sobre a incidência do primeiro limite operacional violado.



Fonte: (TORQUATO *et al.*, 2018).

A referência Tande (1998) apresenta a estimativa do aumento de tensão devido a uma turbina eólica de 500 kW operando com fator de potência 0,95. O aumento de tensão depende do nível de curto-circuito e do ângulo de fase da impedância da rede. Os resultados estão resumidos na Tabela 7. O maior aumento na tensão (positivo na tabela) ocorre para um pequeno ângulo de fase (baixa relação R/X) e um baixo nível de curto-circuito (gerador distante ao longo de um alimentador). Para um alto ângulo de fase (alta relação R/X), o consumo de energia reativa pela turbina eólica resultará em uma queda de tensão (BOLLEN e HASSAN, 2011).

Tabela 11 - Impacto do nível de curto-circuito e o ângulo de fase da impedância da fonte no aumento de tensão devido a instalação de um gerador eólico de 500 kW (TANDE, 1998).

Ângulo	2MVA	5MVA	10MVA	50MVA
85°	-12%	-4%	-2%	-1%
70°	-3%	0	0	0
50°	+6%	+3%	+2%	0
30°	+13%	+6%	+3%	+1%

Fonte: (TANDE, 1998; BOLLEN e HASSAN, 2011).

- Múltiplos geradores distribuídos

Quando mais de um gerador é conectado em um alimentador, é necessário compartilhar a capacidade de hospedagem entre eles. Se mais de uma unidade está conectada na mesma localização, a regra é bem clara: a capacidade de hospedagem total dos geradores não pode ultrapassar a capacidade de hospedagem do local. Porém, para mais de um gerador distribuído conectado em diferentes localizações de um alimentador, a situação se torna mais complicada. De acordo com a Equação 4, a capacidade de hospedagem é inversamente proporcional a localização de cada geração distribuída. Utilizando esta informação, os autores Bollen e Hassan (2011) propõe a seguinte regra:

$$P_i \leq \frac{P_{HC}}{\lambda_i \times N} \quad (4)$$

Onde, P_i é a capacidade de hospedagem de um dado gerador distribuído conectado à uma certa distância λ_i , P_{HC} é a capacidade de hospedagem para uma unidade conectada no fim do alimentador, e N é o número de geradores conectados. Sendo assim, quanto mais próximo da barra principal, maior a capacidade de instalação de um gerador distribuído.

- Equipamentos de controle de tensão

Comumente são utilizados equipamentos de controle de tensão nas redes de distribuição afim de manter o nível de tensão de todos os consumidores dentro de uma faixa adequada, uma vez que quanto mais longe da subestação supridora, menor a magnitude de tensão em alimentadores de média e baixa tensão. Uma forma de compensar essa queda de tensão é a utilização de transformadores com diferentes relações em seus enrolamentos, conhecidos como off-load tap changers (OLTC). Quanto menor a relação, maior a tensão no secundário do transformador, elevando a tensão de todo o sistema, até o consumidor mais distante.

A utilização de OLTCs diminui a margem de sobretensão e a potência ativa injetada por um gerador distribuído diminui a queda de tensão ao longo dos alimentadores. A combinação desses fatores pode causar sobretensões no sistema. Por tanto, a presença de OLTCs é considerado um fator limitante para a capacidade de hospedagem de geração distribuída.

O chaveamento de bancos de capacitores, por exemplo, é muito comum em redes de distribuição. São utilizados com a finalidade de corrigir o fator de potência, de reduzir as perdas ativas e reativas, compensar a reatância indutiva de linhas de transmissão com o propósito de aumentar a capacidade de transporte de energia, como componente de filtros harmônicos e de sustentar a tensão do sistema. O chaveamento de bancos de capacitores pode ser manual ou automático dependendo do tipo de aplicação, e são importantes para as redes de distribuição, porém a potência reativa injetada por eles eleva os níveis de tensão da rede, sendo assim um fator limitante para a capacidade de hospedagem da GD.

3.4 Determinando a Capacidade de Hospedagem

Para poder estimar a capacidade de hospedagem, a margem de sobretensão deve ser conhecida. Uma medição de longo prazo das variações de magnitude de tensão para um grande número dos clientes seriam o método mais adequado. Este poderia ser um método demorado e caro, a menos que um equipamento de medição avançado esteja disponível. Tal equipamento permitiria o registro da magnitude da tensão e da corrente em intervalos, por exemplo, uma vez a cada minuto. Esses dados são extremamente valiosos, não apenas para determinar a capacidade de hospedagem, mas também para coordenação de tensão de redes de distribuição em geral. Operadores de rede e clientes em vários países começaram a instalar medidores de energia que permitem a gravação de tensão, corrente, potência ativa, e potência reativa com uma resolução de tempo considerável, mesmo para clientes domésticos. Dentro de alguns anos, grandes quantidades de dados podem estar disponíveis para permitir estimativas precisas da capacidade de hospedagem. O processamento desses dados, no entanto, ainda é um desafio (BOLLEN e HASSAN, 2011).

Devido esta dificuldade de processamento de um grande número de dados, muitos autores trabalham com amostragens estocásticas das propriedades dos sistemas de distribuição, como por exemplo, o perfil de carga e tensão dos alimentadores das redes de distribuição. Por tanto, muito dos métodos existentes hoje na literatura abordam a estimativa da capacidade de hospedagem através de soluções estocásticas, como apresentado na seção 1.2 deste trabalho.

3.5 Métodos para Aumentar a Capacidade de Hospedagem de Geração Distribuída

- Alimentadores novos ou com mais cobre

Adicionando mais cobre nos cabos dos alimentadores, em quase todos os casos, pode resultar em uma maior capacidade de hospedagem. Ou construir um novo alimentador por completo, com cabos subterrâneos, poderia ser mais fácil do que fortalecimento de um alimentador existente, em alguns casos. O uso de alimentadores exclusivos para o caso de unidades geradoras muito grandes, também pode ser uma solução viável. Porém, sobretensões ainda podem ocorrer, mas por se tratar de um alimentador exclusivo, somente a unidade geradora é exposta à sobretensão (BOLLEN e HASSAN, 2011).

- Métodos alternativos de controle de tensão

Os vários cálculos neste capítulo mostraram que uma das principais limitações para a capacidade de hospedagem é o fato de que o aumento de tensão utilizado é independente da carga. Um método de reforço dependente da carga seria capaz de aumentar a tensão durante alta carga, sem afetar a tensão durante carga baixa. A compensação de queda de linha é usada para controle de tensão com um grande parque eólico conectado a 230 kV, onde o ponto de conexão fica a 75 km da subestação do parque eólico (ZAVADIL *et al.*, 2007). Um relé de compensação de queda de linha é apresentado na referência (HISCOCK, HISCOCK e TAYLOR, 2003). O relé usa como entrada não apenas o total corrente através do transformador, mas também a corrente do barramento principal no alimentador com geração distribuída. Conhecendo a diferença entre os alimentadores e os perfis históricos de carga, a quantidade de geração é estimada. Isso é usado para calcular um termo de correção para o compensador de queda de linha (BOLLEN e HASSAN, 2011).

Compensação série concentrada é mais eficaz quando localizado perto do início do alimentador, pois compensa apenas queda de tensão a jusante da carga. Mas isso resulta em um módulo de tensão alto no início do alimentador durante intervalos de carga pesada. Enquanto estes estiverem abaixo do limite de sobretensão, a capacidade de hospedagem para geração distribuída pode ser alta. A compensação série compensa apenas a queda de tensão devido à potência reativa. Quando esta queda é uma parte substancial da queda de tensão total, a compensação em série é uma opção adequada.

Em alimentadores com pequena seção transversal, a queda de tensão é devida, principalmente, à potência ativa, e a compensação de série não é eficaz (BOLLEN e HASSAN, 2011).

A compensação shunt é mais efetiva quando conectada no final do alimentador. É necessário um esquema de chaveamento para evitar sobretensões. Para evitar o chaveamento excessivo, uma grande histerese é preferida. Um esquema SVC ou um capacitor fixo com um reator shunt regulável pode ser uma alternativa, resultando em variações de magnitude de tensão ao longo do alimentador (BOLLEN e HASSAN, 2011).

Outra solução possível é a instalação de um reator no lado secundário do transformador de distribuição. Quando a magnitude da tensão excede um limiar, o reator é chaveado e seu consumo de energia reativa resulta em uma queda de tensão. Como todos os esquemas baseados em energia reativa, este é mais efetivo quando a queda de tensão devido à potência reativa é uma parte substancial da queda de tensão total (BOLLEN e HASSAN, 2011).

- Medidas exatas da variação de tensão

A capacidade de hospedagem é determinada pela margem de sobretensão de clientes individuais. No entanto, este valor não é conhecido pelo operador da rede e terá que ser estimado. Para evitar sobretensões excessivas e possíveis reclamações e penalidades, a margem de sobretensão é subestimada, resultando em uma baixa ou mesmo zero capacidade de hospedagem. Uma medição precisa da margem de sobretensão para clientes individuais possibilitará determinar a capacidade de hospedagem com mais precisão. Isso fortemente reduz o risco de sobretensões inesperadas; também na maioria dos casos permitirá mais geração distribuída a ser conectada ao alimentador (BOLLEN e HASSAN, 2011).

- Proteção por sobretensão

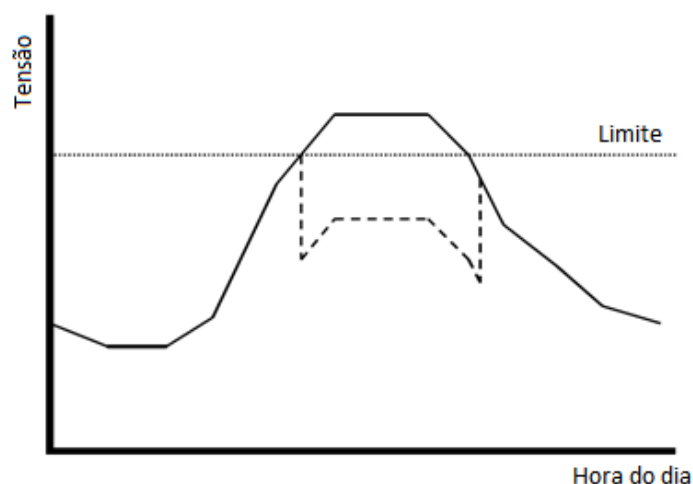
Corte de geração distribuída quando a tensão do terminal chega muito perto do limite de sobretensão é uma maneira muito eficaz de evitar sobretensões. O limite de proteção pode ser ajustado próximo a característica de voltagem, isto é, a voltagem máxima real permitida na rede. O gerador só precisa ser acionado quando a tensão fica muito alta para os clientes. Mesmo quando o tamanho da unidade excede a capacidade de hospedagem com base no planejamento, casos reais em que o corte de carga é necessário podem ser muito limitados em número ou nem sequer ocorrem. A unidade é acionada somente quando a tensão é alta, ou seja, durante períodos de baixa consumo e,

ao mesmo tempo, alta produção. A quantidade de energia produzida pela unidade não é influenciada por estimativas sobre a queda mínima de tensão ou produção. Este é obviamente um enorme ganho em comparação a uma produção máxima limitada (tamanho máximo da unidade) com base no pior cenário (BOLLEN e HASSAN, 2011).

- Redução por sobretensão

Um esquema de contingenciamento no qual a produção é reduzida mais quando a voltagem fica mais perto do limite é um esquema mais eficiente. O impacto do disparo de sobretensão na tensão e na produção de energia está ilustrado na Figura 7. A diferença entre a curva sólida (perfil de tensão sem corte de geração) e a curva tracejada é proporcional à quantidade de energia que é desarmada. Isto implica que a área entre as duas curvas é proporcional à energia não produzida. A quantidade máxima possível de produção a qualquer momento é aquela que resultaria em uma tensão exatamente igual ao limite de sobretensão, ou seja, a linha pontilhada da Figura 7. A área entre a linha pontilhada e a curva sólida é, portanto, a “perda de energia necessária”, enquanto a área entre a linha pontilhada e a curva de linha tracejada é a “perda de energia necessária”. O “algoritmo de contingenciamento perfeito” mantém a tensão exatamente na linha pontilhada e faz uso do sistema para transportar a energia renovável, tanto quanto possível. Tal algoritmo ainda não existe, mas algoritmos já estão sendo discutidos na literatura e, sem dúvida, mais estão sendo desenvolvidos (BOLLEN e HASSAN, 2011).

Figura 7 - Impacto do corte de carga na variação de tensão.



Fonte: (BOLLEN e HASSAN, 2011).

- Geradores de distribuição com controle de tensão

Geradores distribuídos com máquina síncrona têm a capacidade de controlar a quantidade de energia reativa consumida ou injetada na rede. Isso permite que seu uso controle a tensão na tensão média ou baixa rede. A maioria das turbinas eólicas existentes, mesmo quando elas têm capacidade de controle de potência reativa, são desconectados quando a velocidade do vento cai abaixo da velocidade de corte. Como resultado, a capacidade de energia reativa não está disponível durante 20 a 40% do tempo. A decisão de ter suporte de energia reativa disponível continuamente deve ser feita antes nas discussões entre o operador da rede e o proprietário da turbina eólica.

- Aumentando a carga mínima

O aumento do consumo de eletricidade pode parecer um método estranho para permitir energia renovável a ser conectada. No entanto, existem casos em que isso faz sentido. A energia de alguns tipos de geração distribuída não será usada quando não produzindo. Vento, sol, onda e fluxo de rio são exemplos óbvios. Em outros casos, não é possível ou prático desligar a unidade. CHP é um exemplo onde desligar o gerador significa que a demanda de calor não é atendida. Alguns tipos de consumo de eletricidade podem ser alterados no tempo sem um enorme impacto no processo que é alimentado pela eletricidade. O carregamento de carros elétricos é frequentemente mencionado nas discussões, mas isso obviamente vale para todos os tipos de carregamento. Além disso, com processos de aquecimento e resfriamento, o uso da eletricidade pode ser deslocado no tempo. O armazenamento de energia em baterias foi proposto como uma maneira de evitar sobretensões (BOLLEN e HASSAN, 2011).

Outra opção é usar a tensão diretamente para controlar a carga, de forma semelhante ao controle de frequência realizado com geradores convencionais. Uma alta tensão aponta para um excedente de energia, que é compensado por um aumento no consumo. Além disso, as subtensões poderiam também ser mitigadas desta forma. Como por exemplo, o carro elétrico, o carregamento iria mais rápido quando a tensão estivesse alta e mais lenta quando a tensão estivesse baixa. Algoritmos de controle similares podem ser implementados em outros carregadores e na carga de aquecimento e resfriamento. Como resultado, a temperatura interna dependeria da tensão da rede (BOLLEN e HASSAN, 2011).

3.6 Conclusão

Este capítulo abordou o conceito de capacidade de hospedagem. Ganhando destaque o impacto da sobretensão, por ser mostrar ser o maior fator de restrição da CH. Sendo assim, este o principal foco deste trabalho na determinação da capacidade de hospedagem. O próximo capítulo introduz a filosofia dos algoritmos genéticos para melhor entendimento da metodologia proposta.

4 Algoritmo Genético

4.1 Introdução

Este capítulo aborda a teoria do Algoritmo Genético (AG), apresentando sua definição, os conceitos básicos que são a base da teoria, a lógica geral do algoritmo e seus componentes, detalhando cada um deles.

4.2 Definição

O termo algoritmo genético, quase universalmente abreviado nos dias de hoje como AG, foi usado pela primeira vez por John Holland. Seu livro “Adaptação em sistemas natural e artificial” de 1975 foi o instrumento na criação do que é hoje um rico campo de pesquisa e aplicação que vai muito além do AG original (GLOVER, 2003).

O Algoritmo Genético (AG) é uma técnica heurística que busca soluções ótimas para um dado problema e pertence a área da Computação Evolutiva (CE). O AG pode ser definido como uma técnica de busca baseada numa metáfora do processo biológico de evolução natural (LINDEN, 2006). E opera sobre população de soluções em potencial para um problema, aplicando o princípio de sobrevivência do mais apto, reprodução e mutação para produzir sucessivamente aproximações melhores para a solução (ZALZALA e FLEMING, 1997).

4.3 Teoria da evolução

Durante sua viagem a bordo do HMS Bleagle no século XIX, Darwin ficou impressionado com as variações entre espécies. Ele notou que em quase todos os organismos há um grande potencial para a produção de descendentes, como por exemplo, ovos e esporos, mas apenas uma pequena porcentagem sobrevive a vida adulta. Também observou que dentro de uma mesma população há uma grande variação. Isso o levou a deduzir que aquelas variantes, que sobreviveram às dificuldades da vida adulta, são, presumidamente, aqueles mais aptos. Supondo que as variações individuais podem ser herdadas por descendência, Darwin viu a evolução como uma seleção de variações hereditárias (ZALZALA e FLEMING, 1997).

A teoria da evolução diz que na natureza todos os indivíduos dentro de um ecossistema competem entre si por recursos limitados, tais como comida e água. Aquele dentre os indivíduos (animais, vegetais, insetos etc.) de uma mesma espécie que não obtêm êxito tendem a ter uma prole menor e esta descendência reduzida faz com que a probabilidade de ter seus genes propagados ao longo de sucessivas gerações seja menor, processo denominado seleção natural

(LINDEN, 2006). Os indivíduos sobreviventes geram novos indivíduos, ligeiramente diferentes de seus pais e mais adaptados ao meio ambiente em que vivem, processo chamado de evolução natural.

4.4 Conceitos básicos de genética

Na época de Darwin eram desconhecidos os mecanismos que levavam a adaptação dos seres vivos às características do meio ambiente em que vivem. Até que no início do século XX, um padre chamado Gregor Mendel compreendeu que este processo de transmissão de características positivas estava associado a uma unidade básica de informação, o gene (LINDEN, 2006). Mendel reconheceu que a natureza armazena a informação genética completa de um indivíduo em alelos emparelhados. A informação genética que determina as propriedades, aparência e forma de um indivíduo é armazenada por um número de *strings*. Mais tarde, foi descoberto que a informação genética é formada por uma *string* dupla de quatro nucleóides, chamado de ácido desoxirribonucleico (DNA) (ROTHLAUF, 2006).

Os genes formam cromossomos, que estão armazenados no núcleo das células de um indivíduo, e controlam uma característica hereditária específica, como cor do cabelo, altura, cor dos olhos e algumas outras características que nos tornam os indivíduos que somos (LINDEN, 2006). Todas as informações guardadas a nível de genes são chamadas de genótipo. E a manifestação visual destas informações é o fenótipo do indivíduo. Através da reprodução, sexuada ou assexuada, as informações dos pais são transmitidas para os filhos.

A reprodução sexuada é a base do AG. Neste tipo de reprodução, cada progenitor fornece um pedaço de material genético chamado gametas. Estes gametas são resultado de um processo denominado *crossover*, que permite que os filhos herdem características de seus pais, mas não sejam exatamente iguais a estes. O processo se inicia com a duplicação dos cromossomos. Após serem duplicados, os cromossomos realizam o *crossover*, processo pelo qual um pedaço de cada cromossomo é trocado com seu par. Após este processo, tem-se quatro cromossomos potencialmente diferentes que são separados para os gametas (LINDEN, 2006). Através do *crossover*, o novo indivíduo tende a ser mais apto que seus pais, levando a espécie a evolução. Sendo este um processo não direcionado, já que o *crossover* é totalmente aleatório.

É importante considerar também que o processo de replicação do DNA é extremamente complexo. Pequenos erros podem ocorrer ao longo do tempo, gerando mutações dentro do código genético, boas, ruins ou neutras (LINDEN, 2006).

4.5 Lógica de um Algoritmo Genético

O AG imita o princípio básico da vida e aplicam os operadores genéticos como mutação, *crossover*, e seleção natural a uma sequência de alelos. A sequência de alelos é equivalente ao cromossomo na natureza e é construído por uma representação a qual combina uma *string* de símbolos a cada solução possível do problema de otimização (ROTHLAUF, 2006). A cada iteração de um AG, uma nova geração de aproximação é criada pelo processo de seleção e reprodução levando à evolução da população de indivíduos, os quais são bem mais adaptados ao meio ambiente – o problema principal – que os indivíduos que os criaram, exatamente como acontece na adaptação natural (ZALZALA e FLEMING, 1997).

A lógica de um AG pode ser descrita através dos seguintes passos:

Passo 1: Inicializa randomicamente uma população de cromossomos (indivíduos) que serão o conjunto de soluções iniciais do problema;

Passo 2: Avalia cada indivíduo da população atual. Os mais aptos à solução do problema terão as melhores avaliações;

Passo 3: Seleciona os pais para gerar novos indivíduos;

Passo 4: Aplica os operadores genéticos de recombinação e mutação de forma a gerar os indivíduos de uma nova população;

Passo 5: Avalia os novos cromossomos e os substitua pelos da população anterior;

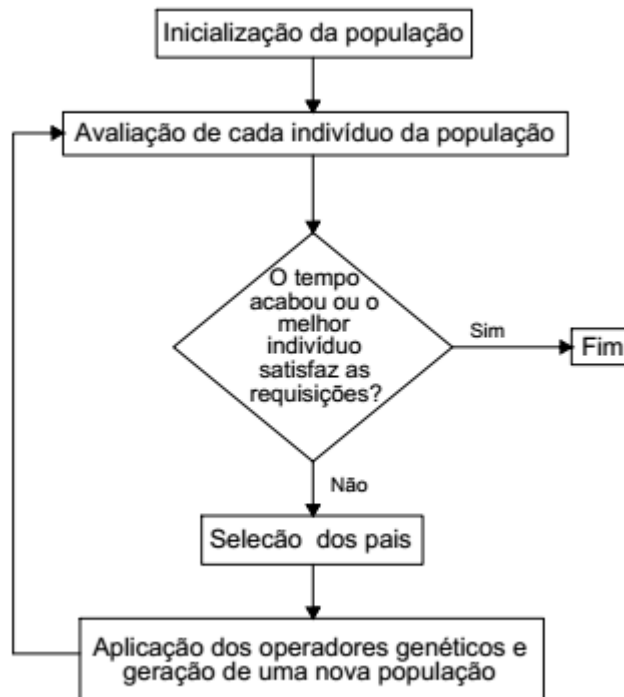
Passo 6: Se o tempo acabou, ou o melhor cromossomo satisfaz os requisitos de desempenho, retorna-o, caso contrário vá para o passo 3.

Estes passos estão representados no fluxograma da Figura 8 para melhor entendimento:

É importante ressaltar que a evolução natural não é um processo dirigido à obtenção da solução ótima. Na verdade, o processo simplesmente consiste em fazer competir uma série de indivíduos e pelo processo de sobrevivência do mais apto, os melhores indivíduos tendem a

sobreviver. Assim, o AG não constitui um algoritmo de busca da solução ótima de um problema, mas uma heurística que encontra boas soluções a cada execução, não necessariamente a mesma todas às vezes (pode-se encontrar máximos ou mínimos locais, próximos ou não do máximo global) (LINDEN, 2006).

Figura 8 - Fluxograma da lógica de um AG.



Fonte: Autor.

4.6 Componentes de um Algoritmo Genético

a) Representação Cromossômica

Os cromossomos representam as possíveis soluções para o problema, logo o tipo de representação cromossômica adotada é de extrema importância para o problema, ficando a critério do programador qual usar. A representação deve ser adequada, incluir o maior número de informações e restrições do problema e a mais simples possível. Levando à maior qualidade dos resultados obtidos pelo AG.

Existem várias formas de representação cromossômica: binária, decimal, números inteiros, cadeia de *string* etc.

A representação binária de tamanho fixo tem dominado a pesquisa de AG desde o seu início. Entretanto, as boas características do AG e seu bom desempenho na busca de soluções não têm relação direta com o fato de se usar uma representação binária. Logo, seria mais razoável buscar uma representação mais adequada para o problema que se enfrenta. Em muitos problemas do cotidiano, o mais natural seria usar cromossomos que representam diretamente os parâmetros sendo otimizados como números reais, de forma que espaços de busca contínuos (em \mathbb{R}^n) sejam representados de forma mais direta e, espera-se, mais eficiente (LINDEN, 2006).

Além disso, quando se usa a representação real o cromossomo tem tamanho mínimo, igual ao número de parâmetros que estão sendo otimizados, cada número real do cromossomo representa um gene, ou seja, a variável de interesse. A representação real também aumenta os domínios de busca, levando a uma melhor precisão sem aumentar o tamanho do cromossomo, como aconteceria na representação binária. Na Equação 2, tem-se um exemplo de representação cromossômica real da função $f: A \subset \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$, Equação 3, onde os genes c_1 , c_2 e c_3 de cada cromossomo representam as variáveis x , y e z , respectivamente.

$$C_i = (c_1, c_2, c_3) \quad (2)$$

$$f(x, y, z) = \frac{xy+y^2z}{xz+y} \quad (3)$$

b) Criação da população

A população inicial de um AG é criada de forma pseudoaleatória, de tal forma a inserir o maior número possível de diversidade genética, fazendo com que o AG faça uma busca por uma maior área no início do espaço solução. O tamanho da população é um parâmetro muito importante para o desempenho do AG. Ela deve ser grande o suficiente para gerar diversidade nos materiais genéticos entre cada um dos indivíduos e, ao mesmo tempo, não ser grande demais ao ponto de deixar o programa lento (VIDAL, 2014). A cada *loop* do algoritmo uma nova população é criada substituindo a anterior. Cada uma das repetições do *loop* é chamada de geração em comparação com a teoria da evolução em que o algoritmo é baseado.

c) Função de avaliação

A função de avaliação é a maneira utilizada pelo AG para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema em questão. Pode-se entendê-la mais facilmente olhando para a função de avaliação como sendo a nota dada ao indivíduo na resolução do problema (LINDEN, 2006).

A função de avaliação em como entrada os valores armazenados no cromossomo e retorna um valor que indica a qualidade da solução do problema. Portanto, a função escolhida deve refletir todo o conhecimento e restrições do problema, e os objetivos de qualidade das resoluções para assim classificar adequadamente os indivíduos da população, pois sua nota irá influenciar nas escolhas dos pais que reproduzirão a próxima geração e na evolução dos indivíduos.

d) Seleção de pais

É o processo que determina quantas vezes um indivíduo é escolhido para a reprodução e também o número de descendentes que um indivíduo irá reproduzir (ZALZALA e FLEMING, 1997). Esta seleção é similar a seleção natural em que os indivíduos mais capazes tendem a ser mais escolhidos para reprodução e geram mais filhos. Por este motivo, é tão importante fazer uma escolha adequada para a função de avaliação.

É importante ressaltar, que na natureza os indivíduos menos capazes também se reproduzem. Portanto, deve-se privilegiar os indivíduos com função de avaliação alta, sem desprezar completamente aqueles indivíduos com função de avaliação extremamente baixa (LINDEN, 2006). Além disso, os indivíduos com baixa avaliação podem não ser os mais capazes, mas podem possuir características da solução procurada. Incluindo os indivíduos menos capazes na seleção de pais, pode-se evitar a convergência genética prematura. Fenômeno no qual os indivíduos das próximas gerações tendem a ficar cada vez mais parecidos, diminuindo a diversidade da população. Sendo assim, a seleção deve ocorrer de forma justa, onde os mais capazes têm maior probabilidade de reprodução, mas também há chances para aqueles menos capazes.

Existem diversos métodos na literatura para a seleção dos pais, como por exemplo, o método da roleta viciada, do torneio e amostragem estocástica uniforme, que serão explanados a seguir:

I. Método da roleta viciada

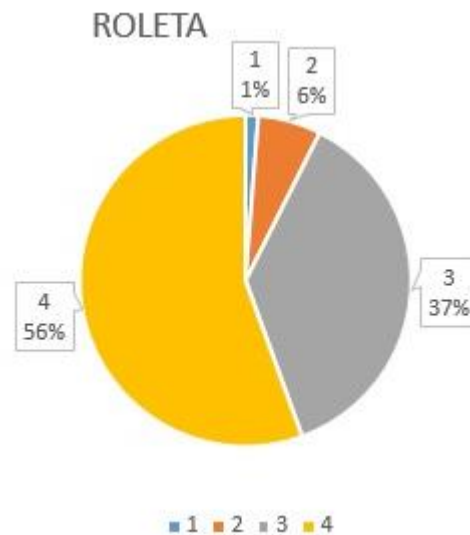
Um intervalo de valor real, *Soma*, é determinado pela soma das probabilidades dos indivíduos de serem selecionados, ou pela soma do vetor dos valores de avaliação de todos os indivíduos da população atual. Os indivíduos são então mapeados um a um em intervalos contíguos dentro do espaço $[0, Soma]$. O tamanho do intervalo de cada indivíduo corresponde ao valor de avaliação do indivíduo correspondente (ZALZALA e FLEMING, 1997). Por exemplo, a Tabela 8 mostra os indivíduos de uma população com seus determinados valores de avaliação e o pedaço correspondente da roleta da Figura 9. A circunferência da roleta representa a soma dos valores da avaliação de todos os indivíduos. O indivíduo quatro é o que ocupa o maior pedaço da roleta por ser o indivíduo mais apto, e o indivíduo 1 ocupa o menor pedaço, sendo o indivíduo de menor avaliação. Para selecionar o indivíduo aleatoriamente, um número é sorteado dentro do intervalo $[0, Soma]$ e o indivíduo selecionado é aquele cujo o número sorteado pertence a seu intervalo. O sorteio ainda pode ser feito escolhendo-se aleatoriamente um número entre 0 e 100, que representa a porcentagem da roleta que pertence a cada indivíduo, ou um número entre 0 e 360, que representa uma posição do círculo da roleta.

Tabela 12 - Exemplo de quatro indivíduos e suas avaliações.

Indivíduo	Avaliação	Pedaço da roleta (%)
1	5	1%
2	25	6%
3	150	37%
4	225	56%
Soma	396	100%

Fonte: Autor.

Figura 9 - Exemplo do método da roleta viciada para a Tabela 8.



Fonte: Autor.

II. Método do torneio

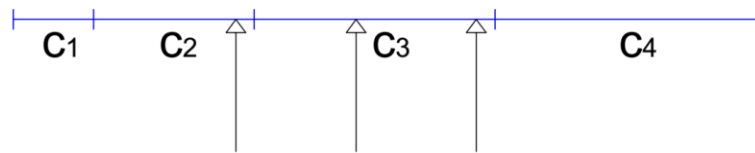
O método do torneio, como o próprio nome diz, consiste em selecionar uma série de indivíduos da população e fazer com que eles entrem em competição direta pelo direito de ser pai, usando como arma a sua avaliação (LINDEN, 2006). Deve-se determinar quantos competidores serão escolhidos aleatoriamente para a disputa, este parâmetro é denominado tamanho do torneio t . O valor mínimo de t é 2, e o máximo seria o valor do tamanho da população x . Neste caso ($t = x$), o indivíduo vencedor sempre será o melhor indivíduo da população. Para um t muito alto, os $x - t$ indivíduos tenderão a predominar na seleção. Logo, deve-se ter cuidado ao escolher o valor de t , pois quanto menor o tamanho do torneio, menor a predominância dos melhores indivíduos na seleção, e conseqüentemente, maior a diversidade da população.

A seleção dos indivíduos participantes do torneio é completamente aleatória para que não haja nenhum favorecimento aos melhores indivíduos, e nenhum impedimento de um indivíduo ser escolhido mais de uma vez para o mesmo torneio. Com estas possibilidades, há chances de o pior indivíduo de uma população participar de uma reprodução, porém a probabilidade é mínima. Pois isto só irá ocorrer, se este indivíduo for o único competidor selecionado para participar do torneio. Este problema pode ser minimizado escolhendo-se um valor de t baixo.

III. Método da amostragem estocástica uniforme

Neste método, todos os indivíduos de uma população são mapeados para segmentos de reta contíguos. O tamanho de cada segmento é proporcional a avaliação do indivíduo correspondente. Para selecionar os n indivíduos para a reprodução, sorteia-se um número i entre 0 e $1/n$ que serve como base do sorteio. Então, são atribuídos n ponteiros espaçados uniformemente que apontam para os segmentos nas posições $i, i + 1/n, i + 2/n, \dots, n - 1/n$, correspondentes aos indivíduos selecionados, Figura 10.

Figura 10 - Método da amostragem estocástica uniforme.



Indivíduos selecionados: c_2 e c_3

Fonte: Autor.

e) Taxa de reprodução

Após a seleção dos pais, estes deverão produzir novos indivíduos através da combinação de seus materiais genéticos. Porém, na natureza muitas vezes a escolha de pais aptos a reprodução não significa que estes irão reproduzir. A taxa de reprodução é uma probabilidade que tende a imitar este fenômeno da natureza.

f) Operadores genéticos

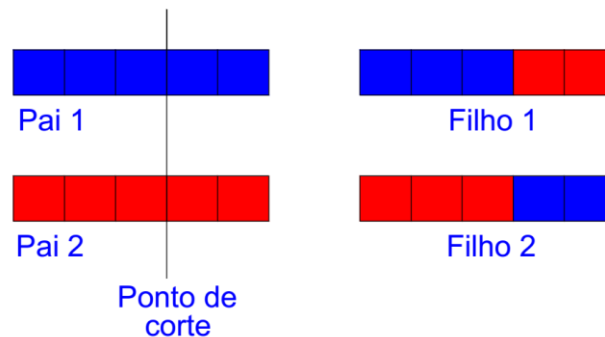
Os operadores genéticos de *crossover* e mutação são os responsáveis pela reprodução de indivíduos mais aptos e a diversidade das populações. Eles imitam a evolução das espécies através da recombinação genética dos indivíduos de uma população. Para este trabalho, utilizou-se os operadores atuando em conjunto, logo depois que é feito o *crossover*, aplica-se o operador mutação, que pode ou não causar uma mutação no indivíduo. Assim, os indivíduos de uma nova geração mantêm algumas características dos pais e também uma certa diversidade que evita uma convergência genética prematura.

I. Operador *crossover*

Existem diferentes tipos de operadores *crossovers* e a eficiência destes depende do tipo de problema e representação utilizada. O operador *crossover* mais simples é o chamado *crossover* de um ponto, comumente usado na representação binária. Para uma representação de um problema combinatório, por exemplo, o *crossover* de um ponto não funcionaria desta forma e receberia algumas adaptações, assim como para uma representação real.

O operador *crossover* de um ponto funciona da seguinte forma. Depois de selecionados dois pais pelo módulo de seleção, um ponto de corte é selecionado. Um ponto de corte constitui uma posição entre dois genes de um cromossomo. Cada indivíduo de n genes contém $n - 1$ pontos de corte, e este ponto de corte é o ponto de separação entre cada um dos genes que compõem o material genético de cada pai (LINDEN, 2006). Após a escolha aleatória do ponto de corte, é feita a união da parte esquerda ao corte do primeiro pai com a parte direita do segundo pai, gerando um filho. O segundo filho é gerado pela junção das partes que sobraram como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Operador *crossover* de um ponto de corte.



Fonte: Autor.

Para a representação real existem diversos tipos de operadores *crossovers*. Os operadores aritméticos, por exemplo, realizam algum tipo de combinação linear entre os cromossomos pais. Nas Equações de (4) a (6) tem-se a representação para os cromossomos pais e filho, onde $\mathbf{p}_y \in \mathfrak{R}$ e $\mathbf{c}_t \in \mathfrak{R}$ (HAUPT e HAUPT, 2004; MICHALEWICZ, 1996).

$$\mathbf{p}_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1l}) \quad (4)$$

$$\mathbf{p}_2 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1l}) \quad (5)$$

$$\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_l) \quad (6)$$

- *Crossover* média: para este tipo de operador, o cromossomo filho \mathbf{c} é gerado pela Equação 2.5:

$$\mathbf{c} = (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)/2 \quad (7)$$

- *Crossover* média geométrica: cada gene c_i do cromossomo filho \mathbf{c} é dado por:

$$c_i = \sqrt{p_{1i}p_{2i}} \quad (8)$$

- *Crossover* BLX- α ou *crossover* mistura: para este operador utiliza-se a Equação 9, onde $\beta \in U(-\alpha, 1 + \alpha)$.

$$\mathbf{c} = \mathbf{p}_1 + \beta(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \quad (9)$$

Um único valor β é escolhido para todos os genes. Quando $\alpha = 0$ o filho \mathbf{c} situa-se sobre um intervalo \mathbf{I} que está entre dois pontos que representam os pais \mathbf{p}_1 e \mathbf{p}_2 . O parâmetro α estende este intervalo $\alpha\mathbf{I}$ à esquerda e à direita de \mathbf{I} . Desta forma, por exemplo, o BLX-0,5 tem tendência de gerar filhos próximos ao centro do intervalo \mathbf{I} , evitando a perda de diversidade.

- *Crossover* linear: Para este operador obtém-se a reprodução de três filhos \mathbf{c}_1 , \mathbf{c}_2 e \mathbf{c}_3 a partir dos pais \mathbf{p}_1 e \mathbf{p}_2 , onde apenas o melhor destes filhos é escolhido e os outros descartados, Equações de (10) a (12).

$$\mathbf{c}_1 = 0,5\mathbf{p}_1 + 0,5\mathbf{p}_2 \quad (10)$$

$$\mathbf{c}_2 = 1,5\mathbf{p}_1 - 0,5\mathbf{p}_2 \quad (11)$$

$$\mathbf{c}_3 = -0,5\mathbf{p}_1 + 1,5\mathbf{p}_2 \quad (12)$$

- *Crossover* aritmético: Dados dois cromossomos p_1 e p_2 dois cromossomos c_1 e c_2 são produzidos de acordo com as Equações (13) e (14):

$$c_1 = \beta p_1 + (1 - \beta)p_2 \quad (13)$$

$$c_2 = (1 - \beta)p_1 + \beta p_2 \quad (14)$$

II. Operador mutação

Depois de compostos os filhos, entra em ação o operador de mutação que opera da seguinte forma: ele tem associada uma probabilidade extremamente baixa (da ordem de 0,5%). Então, sorteia-se um número entre 0 e 1. Se ele for menor que a probabilidade pré-determinada, então o operador atua sobre o gene em questão, alternando-lhe o valor aleatoriamente. Repete-se o processo para todos os genes componentes dos dois filhos (LINDEN, 2006). O operador de mutação insere novos cromossomos na população, permitindo que o AG busque soluções fora dos limites da população inicial. Desta forma o AG evita convergências prematuras, evitando ficar preso em máximos e mínimos locais. A probabilidade deste operador deve ser baixa para evitar que o AG perca as informações obtidas pelo cruzamento dos indivíduos e se torne um algoritmo aleatório. Por outro lado, se a probabilidade for muito baixa, a população poderá não ter diversidade depois de um certo número de gerações.

A seguir são apresentadas outras técnicas de mutação presentes na literatura (HAUPT e HAUPT, 2004; MICHALEWICZ, 1996):

- *Mutação Uniforme*: essa técnica seleciona aleatoriamente umas das variáveis j do problema, ou seja, um dos genes do indivíduo. A variável é, então, igualada a um número randomico uniforme $U(a_i, b_i)$. Onde a_i e b_i são os limites inferior e superior, respectivamente, do intervalo de busca de cada variável i .

$$x'_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{se } i = j \\ x_i, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (15)$$

- *Mutação limite*: este operador seleciona aleatoriamente uma variável j , e igualada ou ao limite superior, ou inferior do intervalo $U(a_i, b_i)$. Onde $r = U(0,1)$:

$$x'_i = \begin{cases} a_i, & \text{se } i = j, r < 0,5 \\ b_i, & \text{se } i = j, r \geq 0,5 \\ x_i, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (16)$$

- Mutação não-uniforme: seleciona aleatoriamente uma variável, j , e iguala ela a um número randômico não-uniforme:

$$x'_i = \begin{cases} x_i + (b_i - x_i)f(G) & \text{se } r_1 < 0,5 \\ x_i - (x_i - a_i)f(G) & \text{se } r_1 \geq 0,5 \\ x_i, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (17)$$

Onde

$$f(G) = \left(r_2 \left(1 - \frac{G}{G_{máx}} \right) \right)^b \quad (18)$$

$r_1, r_2 =$ um número randômico uniforme ente 0 e 1

$G =$ a geração atual

$G_{máx} =$ número máximo de gerações

$b =$ parâmetro de modelagem

- Mutação multi-não-uniforme: aplica o operador não-uniforme a todas as variáveis j do indivíduo.

g) Elitismo

O elitismo consiste em manter em cada nova geração os melhores indivíduos da geração anterior, no intuito de fazer com que as características dos melhores indivíduos de uma geração não se percam na próxima, e assim, o melhor indivíduo da próxima geração sempre terá avaliação melhor ou igual ao melhor indivíduo da geração anterior. Isto garante que a avaliação dos melhores indivíduos seja uma função crescente no decorrer das gerações.

Este pequeno ato, apesar de sua simplicidade, normalmente colabora de forma dramática para a melhoria do desempenho de uma execução de um AG. Isto ocorre pois mantem-se dentro da população os esquemas responsáveis pelas boas avaliações das melhores soluções. Conseqüentemente, é aumentada a componente de aproveitamento sem prejudicar o desempenho da componente de exploração, que continua a atuar livremente (LINDEN, 2006).

h) Critério De Parada

Diferente dos métodos simples de buscas de vizinhança que terminam quando um ótimo local é encontrado, o AG é um método de busca estocástica que pode, em princípio, rodar para sempre. Na prática, um critério de parada é preciso. Uma abordagem comum é definir um limite para as avaliações ou usar o relógio do computador, ou acompanhar a diversidade da população e parar quando ela cair até um limiar predefinido. Neste último caso, o significado de diversidade não é sempre óbvio, e pode estar relacionado ao genótipo ou fenótipo, ou ainda, a avaliação do indivíduo (GLOVER,2003; GOLDBERG, 1989).

4.7 Conclusão

Este capítulo apresentou a definição e teoria base do AG, apresentando detalhadamente todos os seus componentes: indivíduo, população, seleção dos pais, operadores genéticos, função avaliação e critério de parada. O próximo capítulo tem o objetivo de explicar o AG proposto para a estimativa da CH.

5 Algoritmo Genético para a Estimativa Da Capacidade De Hospedagem Da GD

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta o método proposto para a estimativa da CH, abordando as características dos componentes do AG proposto

5.2 Método Proposto

O objetivo deste trabalho é estimar a capacidade de hospedagem da GD em redes de distribuição focando no impacto dos níveis de tensão. Para tanto utiliza-se um AG que busca a potência máxima injetada pela GD analisando os níveis de tensão das barras do sistema.

O método proposto busca determinar a potência máxima injetada (P_{GD}) nas barras de conexão de GD's instaladas em sistemas de distribuição sem que ocorram sobretensões. O AG busca a P_{GD} de cada barra de forma que a tensão das barras de conexão (V_{GD}) atinjam o limite superior de tensão ($V_{máx}$), mas não o ultrapasse, indicando, assim, a CH.

5.2.1 Representação dos indivíduos

Cada n indivíduo do AG é representado por um vector (ID_n) composto pelos valores de potências P_{GD} injetadas nas k barras de conexão de geração distribuída, como formulada em (20). Os n indivíduos são gerados dentro de um espaço de busca delimitado pela capacidade de geração das GD's.

$$ID_n = [P_{GD1}, P_{GD2}, P_{GD3}, \dots, P_{GDk}] \quad (20)$$

5.2.2 Método de Newton-Raphson

A cada geração do AG, realiza-se o fluxo de carga do sistema considerando cada indivíduo inserido na rede. Na prática, em grandes sistemas elétricos é necessário rodar muitas vezes o fluxo de carga para a determinação de operação ou planejamento do sistema. Para isto é preciso levar em conta a impedância complexa e os limites de capacidade dos circuitos, e o nível de tensão satisfatório dos nós do sistema. Assim como, deve-se considerar também a os diferentes estados possíveis de operação do sistema. Além disso, o fluxo de carga de grandes sistemas tem que ser solucionado em um tempo razoável e com boa precisão nos resultados. Um sistema de 3000 barras, por exemplo, com 6000 circuitos e 500 geradores pode ter que ser solucionado de 1 a 2 minutos com uma precisão de 32 ou 64 bits de estabilidade numérica (WEEDY *et al.*, 2012).

Para grandes sistemas, o método de Newton-Raphson ou o desacoplado rápido são os mais comumente utilizados. A velocidade de convergência desses métodos é de extrema importância quando utilizados em sistemas com controle automático e em casos de sistemas elétricos que exigem a solução de fluxos de carga rápido, como no caso deste trabalho, uma vez que o AG depende dos valores de tensão resultantes na sua busca pela potência máxima injetada pelas GDs presentes no sistema (WEEDY *et al.*, 2012).

- Função avaliação

A partir dos valores de tensão resultantes do fluxo de carga rodado para cada indivíduo, os indivíduos recebem um valor de avaliação AV dado pela função-avaliação formulada em (21), a qual reflete o objetivo do problema, a injeção máxima de potência pela GD sem violar o limite de sobretensão. μ , α , β são valores absolutos, k é o número de barras de conexão de geração distribuída, $V_{m\acute{a}x}$ é o limite de sobretensão, V_{GD_i} é a tensão da barra de conexão, e P é o valor de penalidade que o indivíduo recebe se alguma barra do sistema violar o limite de sobretensão.

Isto porque, apesar da potência injetada por uma GD não violar o limite de sobretensão da barra de conexão, o fluxo de potência inverso injetado pelas GDs e a iteração destes fluxos com outros equipamentos presentes no sistema podem causar sobretensões em barras adjacentes a barra de conexão. Então, a fim de considerar o limite de sobretensão de todas as barras do sistema uma restrição do problema refletida na função-avaliação, adicionou-se a função

penalidade P descrita em (22), onde θ é um valor absoluto e m o número de barras do sistema, e V_i é o módulo de tensão das barras.

$$AV = 1 / \left[\sum_{i=1}^k \alpha \times (V_{máx} - V_{GD_i})^\mu + \beta \times P \right] \quad (21)$$

$$P = \sum_{i=1}^m (V_i - V_{máx} / V_{máx})^\theta \quad (22)$$

A função penalidade (22) compara a tensão das m barras do sistema com o limite superior de tensão. Quanto mais barras violarem o limite de sobretensão, e maior a violação, maior será a penalidade na avaliação do indivíduo, diminuindo o valor AV atribuído a ele.

- Seleção dos pais

A maioria dos métodos de seleção consistem em atribuir uma probabilidade de seleção para cada indivíduo baseada na avaliação destes, como no caso da roleta viciada e da amostragem estocástica uniforme. Neste trabalho optou-se por utilizar a classificação geométrica normalizada. Os métodos de classificação utilizam a avaliação dos indivíduos para classificá-los em uma ordem. A classificação geométrica normalizada atribui uma probabilidade de seleção P para cada indivíduo baseada na classificação dele de acordo com a Equação (23). Então, uma série de números são gerados aleatoriamente e comparados com a probabilidade acumulada da população (Equação 24). O indivíduo n é selecionado e copiado para a nova população se $U(0,1) \leq C_n$.

$$P = q'(1 - q)^{r-1} \quad (23)$$

onde q é a probabilidade de selecionar o melhor indivíduo, r é a classificação do indivíduo

(sendo 1 a melhor), p é o tamanho da população e $q' = \frac{q}{1 - (1 - q)^p}$.

$$C_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad (24)$$

- Reprodução

Novos indivíduos são, então, gerados através dos operadores genéticos *Crossover* aritmético e mutação. O *Crossover* aritmético gera dois novos indivíduos ID_1 e ID_2 através de

dados dois indivíduos-pais, ID_1 e ID_2 , de acordo com as Equações (26) e (27), onde β é um número aleatório gerado através de uma distribuição uniforme.

$$ID_1 = \beta ID_1 + (1 - \beta) ID_2 \quad (25)$$

$$ID_2 = (1 - \beta) ID_1 + \beta ID_2 \quad (26)$$

O operador mutação utilizado é o mutação não-uniforme. Este operador iguala o valor de uma das variáveis do indivíduo ID a um número aleatório gerado através de uma distribuição não-uniforme $U(a_i, b_i)$. Onde a_i e b_i são os limites inferior e superior, respectivamente, do intervalo de busca de cada variável i .

$$P'_{GDi} = \begin{cases} P_{GDi} + (b_i - P_{GDi})f(G) & \text{se } r_1 < 0,5 \\ P_{GDi} - (P_{GDi} - a_i)f(G) & \text{se } r_1 \geq 0,5 \\ P_{GDi}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (27)$$

Onde:

$$f(G) = \left(r_2 \left(1 - \frac{G}{G_{m\acute{a}x}} \right) \right)^b \quad (28)$$

$r_1, r_2 =$ um número randômico uniforme ente 0 e 1

$G =$ a geração atual

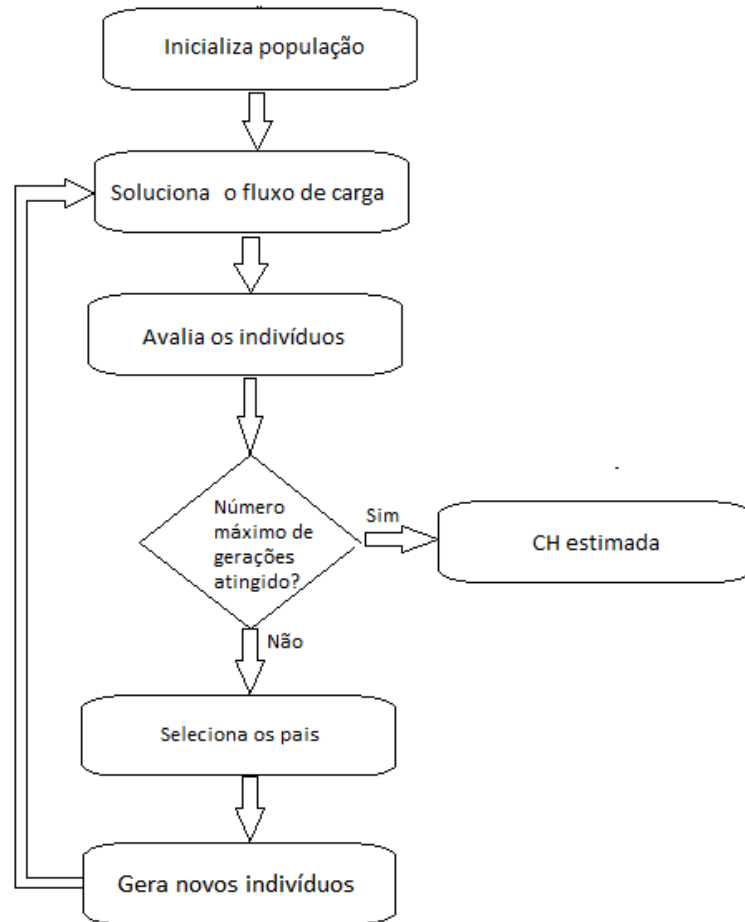
$G_{m\acute{a}x} =$ número máximo de gerações

$b =$ parâmetro de modelagem

- Critério de parada

O critério de parada utilizado no AG proposto é o número máximo de gerações. A Figura 12 apresenta um fluxograma do algoritmo completo para melhor entendimento.

Figura 12 - Fluxograma do algoritmo proposto.



Fonte: Autor.

5.3 Conclusão

Este capítulo apresentou o algoritmo genético proposto para estimar a capacidade de hospedagem da geração distribuída de sistemas de distribuição. O próximo capítulo apresenta as simulações realizadas para validação do algoritmo.

6 Resultados

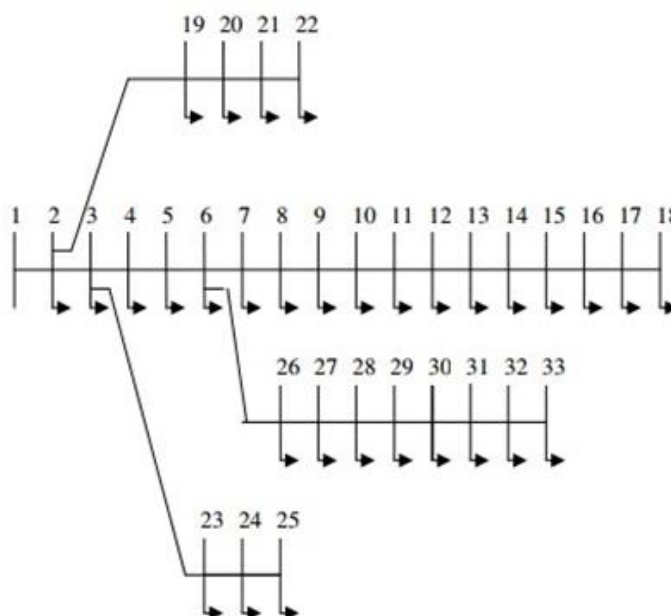
6.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas simulações dos sistemas testes para a validação do método proposto. Foram utilizados sistemas de distribuição de média tensão do IEEE de 33 e 69 barras, e estimada a capacidade de hospedagem dos sistemas considerando-se a conexão de múltiplos geradores injetando potência ativa simultaneamente.

6.2 Sistema IEEE - 33 Barras

Para a validação do algoritmo utilizou-se o sistema de distribuição IEEE de 33 barras apresentado na Figura 13. Para considerar as variáveis que agravam o problema de sobretensão, optou-se por fazer algumas modificações no sistema original. Inseriu-se um banco de capacitores de chaveamento automático na barra 13, o qual eleva os níveis de tensão das barras adjacentes.

Figura 13 - Sistema IEEE 33 barras.



Fonte: (DOS SANTOS, 2009)

Considerando o sistema IEEE - 33 barras modificado, estimou-se a capacidade de hospedagem para a instalação de GDs nas barras 18 e 33 (Caso I). Considerando também o

cenário mais crítico em termos de nível de tensão, o qual teria a menor margem de variação de tensão, uma vez que o principal parâmetro limitante da capacidade de hospedagem é a sobretensão.

Neste caso, o nível de carregamento do sistema é baixo, o banco de capacitores está chaveado e o nível de tensão da barra principal é o maior permitido (Tabela 9). Além disso, tendo em vista a possibilidade de muitas tecnologias possibilitarem o ajuste do fator de potência dos geradores distribuídos, utilizou-se um fator de potência de 0,85 indutivo, minimizando assim o impacto nos níveis de tensão do sistema, e conseqüentemente, aumentando a capacidade de hospedagem.

Tabela 13 - Cenário crítico para a capacidade de hospedagem do sistema IEEE – 33 barras.

Cenário Crítico para o sistema IEEE – 33 barras	
Parâmetro	Valor
Carregamento	40%
Tensão na barra principal	1,05 p.u.
Banco de capacitores	Chaveado na barra 13

Fonte: Autor.

Considerando o mesmo cenário da Tabela 13, foi também estimada a capacidade de hospedagem para quatro geradores distribuídos (Caso II) conectados nas barras 18, 22, 25 e 33, e seis geradores (Caso III) conectados nas barras 9, 18, 22, 25, 28 e 33. A Tabela 14 apresenta os valores estimados pelo AG em uma média de dez simulações para cada um dos três casos. A Tabela 15 apresenta o nível de tensão resultante nas barras de conexão da GD nos três casos (uma média das 10 simulações). Nota-se que os níveis de tensão das barras de conexão estão bem próximos do limite de sobretensão, mas não há violação.

Tabela 14 - Resultados da estimativa da capacidade de hospedagem dos três casos propostos.

Simulação	Quantidade de barras com GD	Barras de conexão da GD	CH estimada pelo AG
Caso I	2	18 33	1,4 MW
Caso II	4	18 22 25 33	1,9 MW

Caso III	6	9 18 22 25 28 33	2,5 MW
----------	---	------------------	--------

Fonte: Autor.

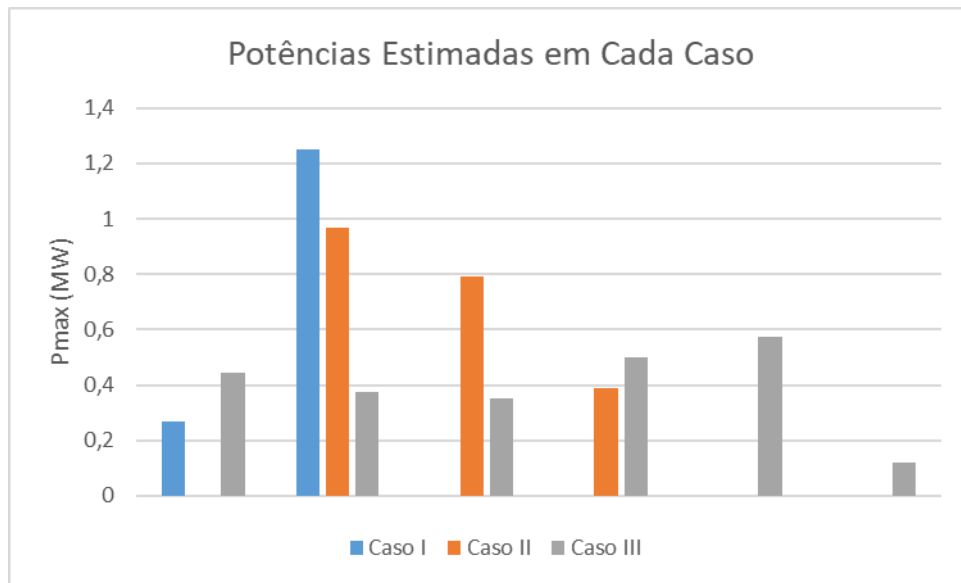
Tabela 15 - Tensão resultante nas barras de conexão da GD para a Capacidade de Hospedagem estimada em cada caso.

Simulação	Barras de conexão da GD	Tensão resultante
Caso I	18	1,038
	33	1,047
Caso II	18	1,03
	22	1,048
	25	1,05
	33	1,035
Caso III	9	1,046
	18	1,046
	22	1,051
	25	1,047
	28	1,045
	33	1,043

Fonte: Autor.

A Figura 14 apresenta as potências estimadas para cada caso em uma das dez simulações. Nota-se que com o aumento do número de barras de conexão dos geradores distribuídos, neste sistema, resultou em uma potência máxima individual de cada barra menor, em contrapartida a capacidade de hospedagem do sistema aumentou. No caso I, a maior potência estimada é acima de 1,2 MW, já no caso II a maior potência estimada não chega nem a 1 MW, e para o caso III a maior potência é aproximadamente 0,6 MW.

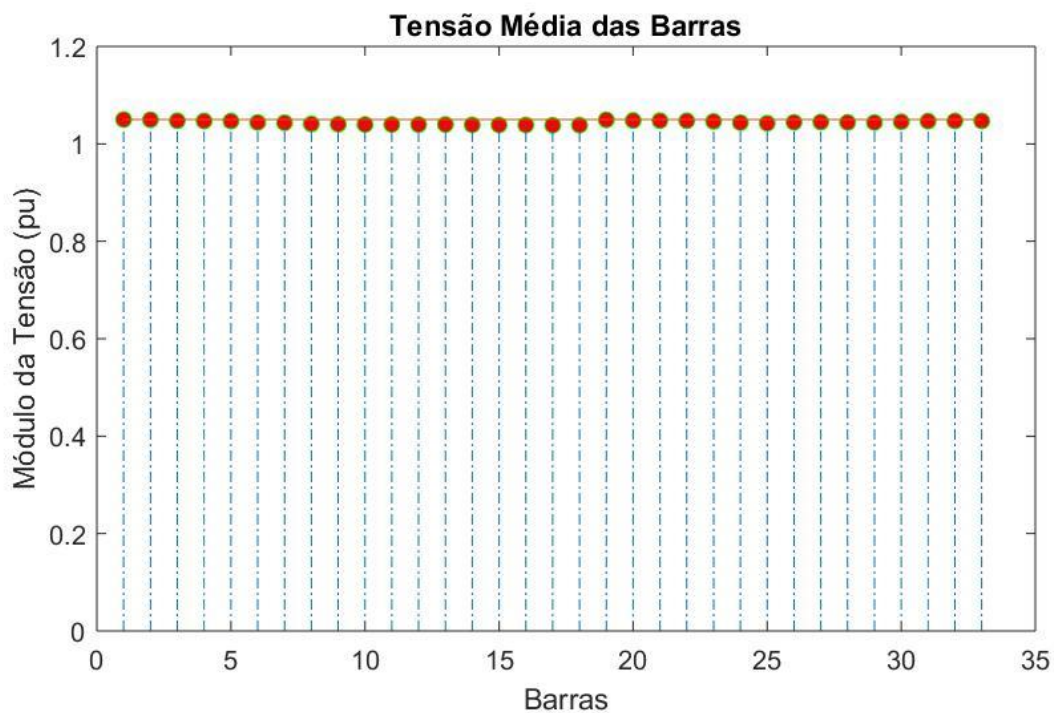
Figura 14- Comportamento das potências estimadas para cada caso considerando uma simulação.



Fonte: Autor.

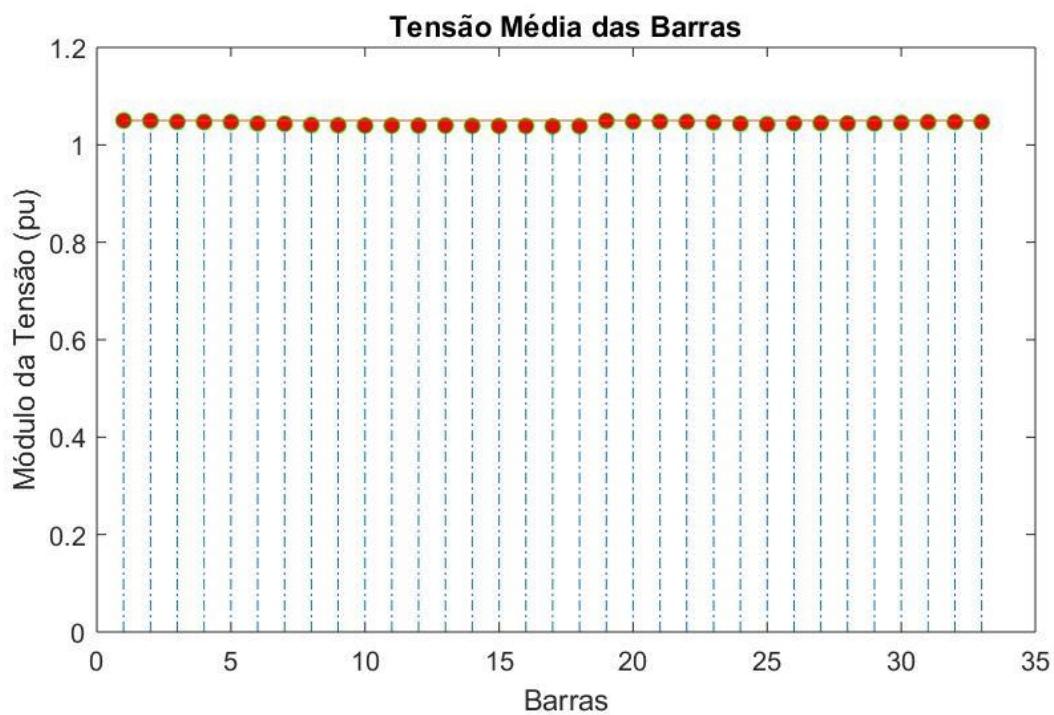
O Anexo A apresenta os resultados mais detalhados de todas as simulações realizadas. Em nenhuma das simulações encontra-se violação do limite de sobretensão determinado. As Figuras 15, 16 e 17 apresentam a média das tensões das barras nas dez simulações de cada caso, respectivamente, sendo o limite de sobretensão indicado pela linha em vermelho em 1,05 p.u. As potências máximas injetadas pelos geradores distribuídos tendem a elevar o nível de tensão de todas as barras do sistema, e não apenas das barras de conexão. Contudo, a estimativa da capacidade de hospedagem realizado pelo AG também respeita o limite de sobretensão de todas as barras do sistema dada a penalidade da função avaliação.

Figura 15 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-33 barras nas 10 simulações do Caso I.



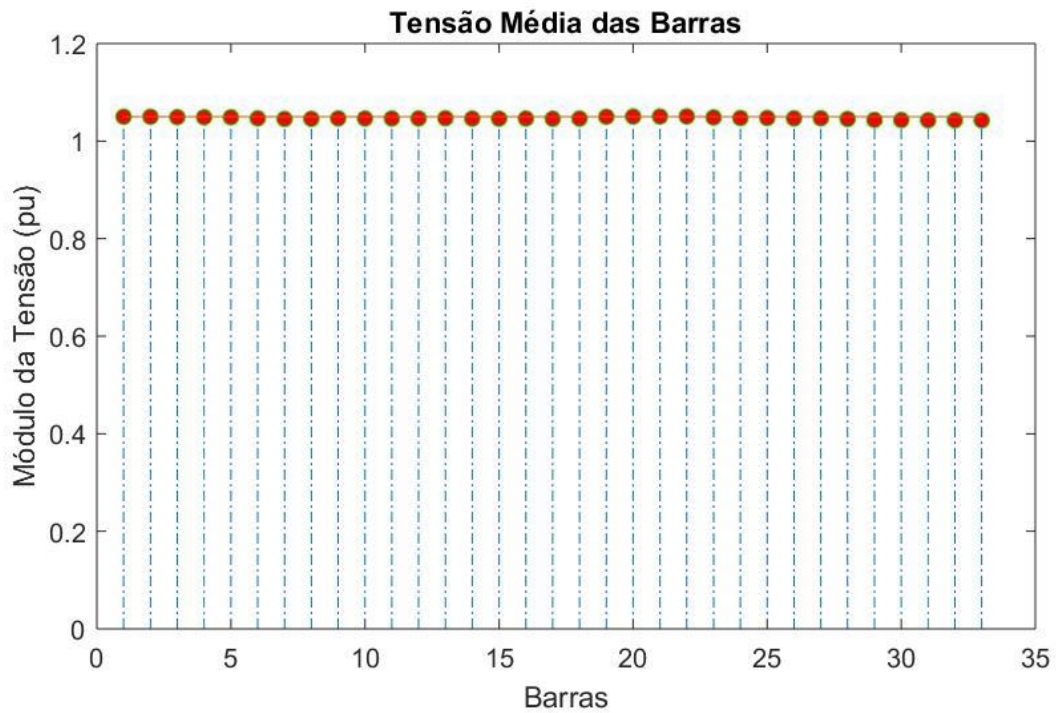
Fonte: Autor.

Figura 16-Média de tensão nas barras do sistema IEEE-33 barras nas 10 simulações do Caso II.



Fonte: Autor.

Figura 17-Média de tensão nas barras do sistema IEEE-33 barras nas 10 simulações do Caso III.

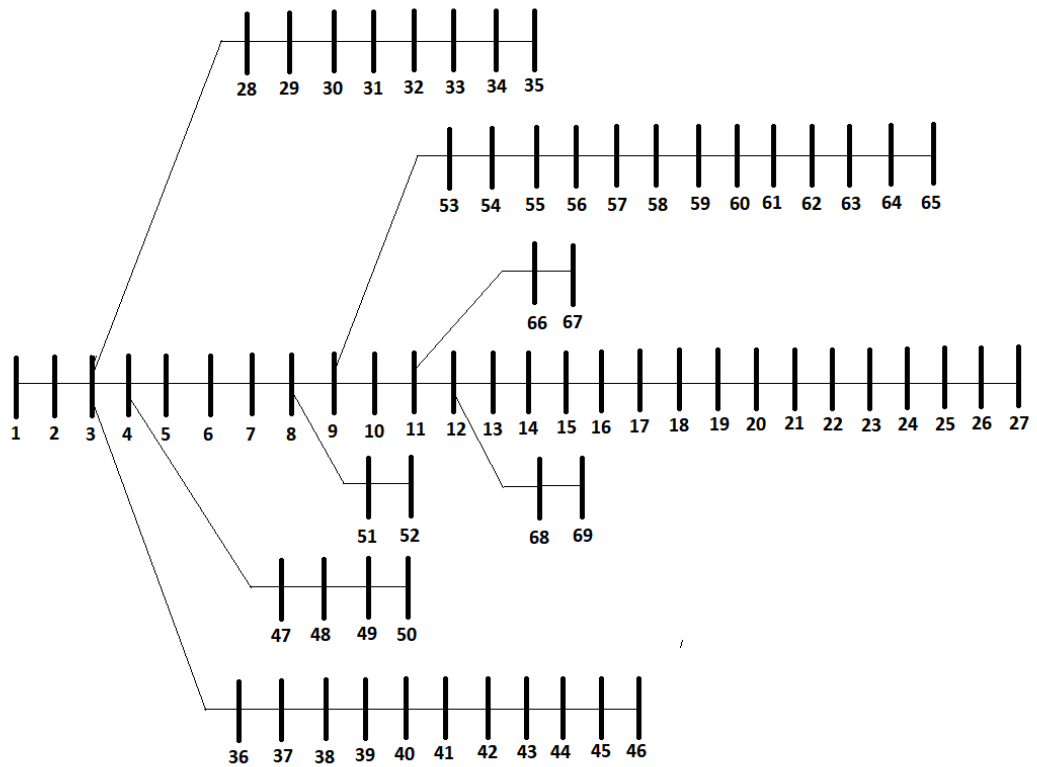


Fonte: Autor.

6.3 Sistema IEEE – 69 Barras

A Figura 18 apresenta o diagrama do sistema do IEEE - 69 barras e a Tabela 16 apresenta o cenário crítico utilizado nas simulações. Neste sistema, foi considerado a instalação de GDs nas barras 46, 27, 65 e 50 para o Caso I. No Caso II, as barras de instalação são as barras 19, 69, 52, 67, 35, 46, 27, 65 e 50. Foram realizadas simulações para o fator de potência dos geradores distribuídos, inicialmente, adotou-se um fator de potência de 0,85 indutivo. Posteriormente adotou-se um fator de potência unitário. A capacidade de hospedagem estimada pelo AG (média de 10 simulações) em cada caso consta na Tabela 17. Através dos resultados pode-se constatar que a adoção do fator de potência indutivo na GD tende a aumentar a capacidade de hospedagem. E para este sistema, o aumento do número de barras de conexão de geração distribuída diminuiu a capacidade de hospedagem.

Figura 18-Sistema IEEE - 69 barras.



Fonte: Autor.

Tabela 16 - Cenário crítico para a capacidade de hospedagem do sistema IEEE – 69 barras.

Cenário Crítico para o sistema IEEE – 69 barras	
Parâmetro	Valor
Carregamento	30%
Tensão na barra principal	1,05 p.u.

Fonte: Autor.

Tabela 17 - Resultados da estimativa da capacidade de hospedagem dos dois casos propostos.

Simulação	Fator de potência das GDs	Quantidade de barras com GD	Barras de conexão da GD	CH estimada pelo AG
Caso I	0,85 indutivo	4	27 46 50 65	5,9 MW
	1,0			1,8 MW
Caso II	0,85 indutivo	9	19 27 35 46 50 52 65 67 69	2,6 MW
	1,0			1,6 MW

Fonte: Autor.

A Tabela 18 contém os valores de tensão resultantes nas barras de conexão para cada capacidade de hospedagem estimada, demonstrando que o AG respeitou o limite de sobretensão estipulado na função avaliação. As Figuras 19 e 20 apresentam o comportamento da potência máxima estimada pelo AG com o aumento do número de barras de conexão da GD, considerando uma das dez simulações realizadas. A Figura 19 mostra as potências estimadas para os casos I e II com fator de potência indutivo, nota-se que a maior potência estimada no caso II é muito menor que a maior potência estimada no caso I, uma vez que a capacidade de hospedagem estimada para o caso II (2,6MW) é quase a metade da estimada para o caso I (5,9MW).

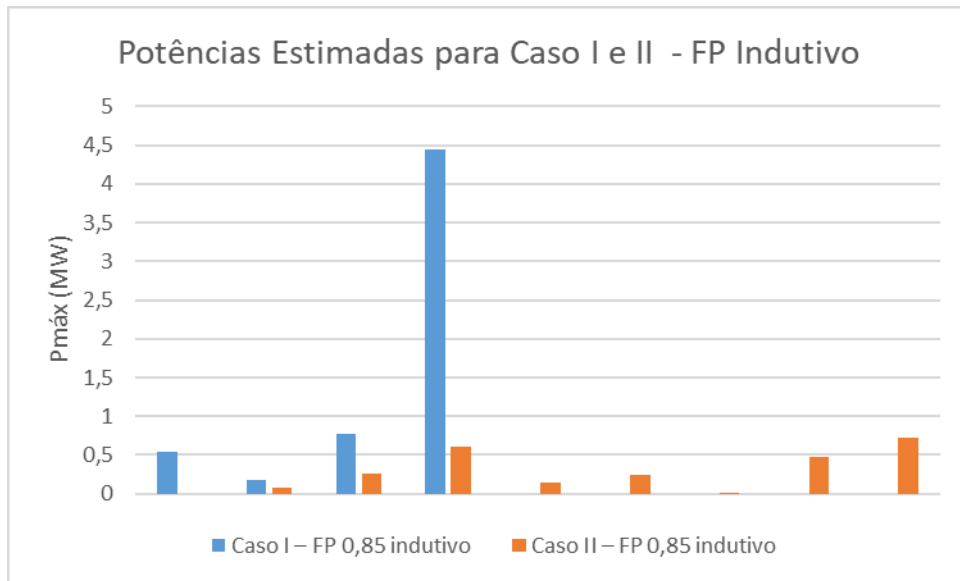
Tabela 18 - Tensão resultante nas barras de conexão da GD para a Capacidade de Hospedagem estimada em cada caso.

Simulação	Barras de conexão da GD	Tensão resultante
Caso I (FP 0,85 indutivo)	27	1,048
	46	1,051
	50	1,041
	65	1,044
	27	1,045

Caso I (FP unitário)	46	1,052
	50	1,05
	65	1,038
Caso II (FP 0,85 indutivo)	19	1,048
	27	1,048
	35	1,05
	46	1,05
	50	1,048
	52	1,049
	65	1,041
	67	1,05
	69	1,05
Caso II (FP unitário)	19	1,045
	27	1,046
	35	1,053
	46	1,051
	50	1,049
	52	1,049
	65	1,037
	67	1,048
	69	1,048

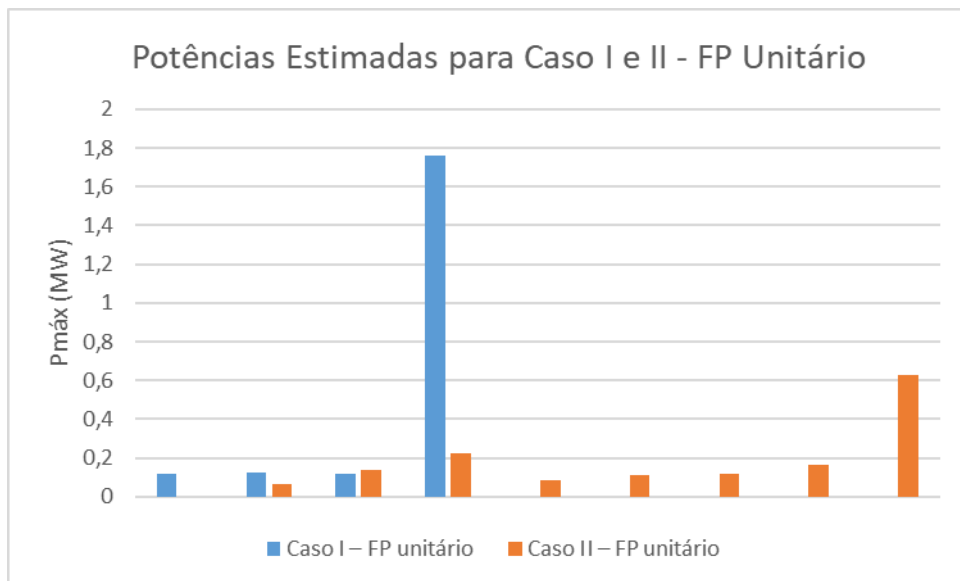
Fonte: Autor.

Figura 19-Comportamento das potências estimadas para cada caso considerando uma simulação.



Fonte: Autor.

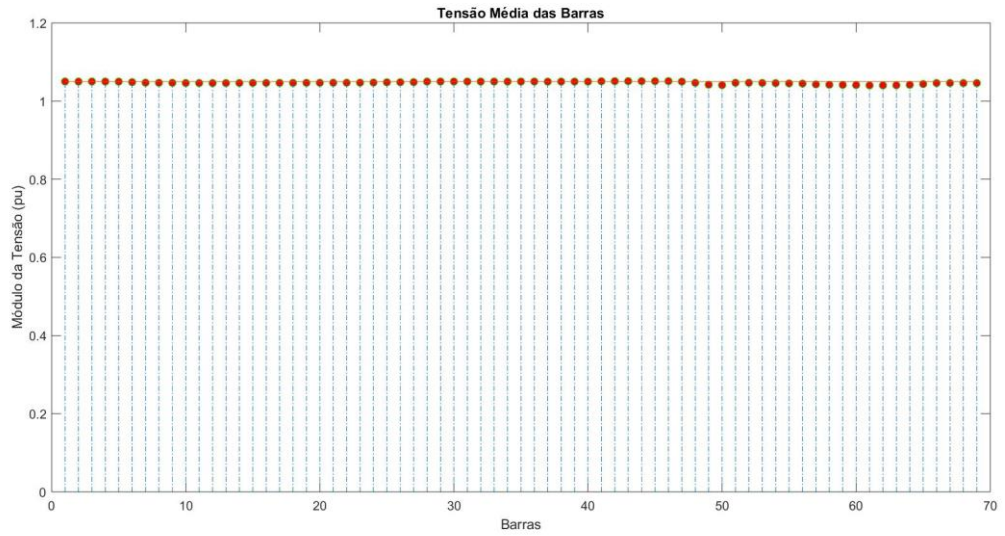
Figura 20-Comportamento das potências estimadas para cada caso considerando uma simulação.



Fonte: Autor.

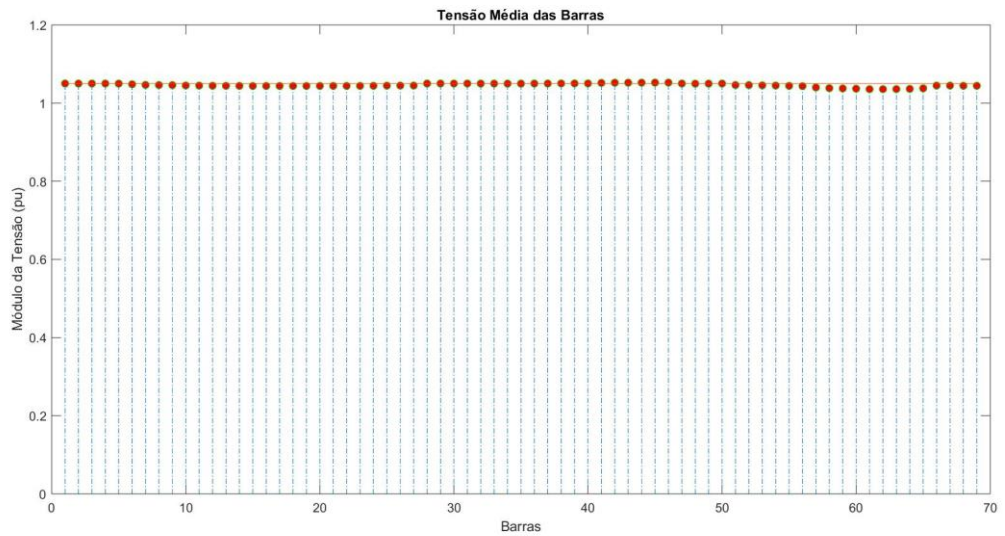
As Figuras de 21 a 24 apresentam as tensões resultantes em todas as barras para a capacidade de hospedagem estimada em cada caso (média do resultado das 10 simulações realizadas), demonstrando que o AG respeitou o limite de sobretensão em todas as barras do sistema, e não só nas barras de conexão.

Figura 21 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-69 barras nas 10 simulações do Caso I (fator de potência 0,85 indutivo).



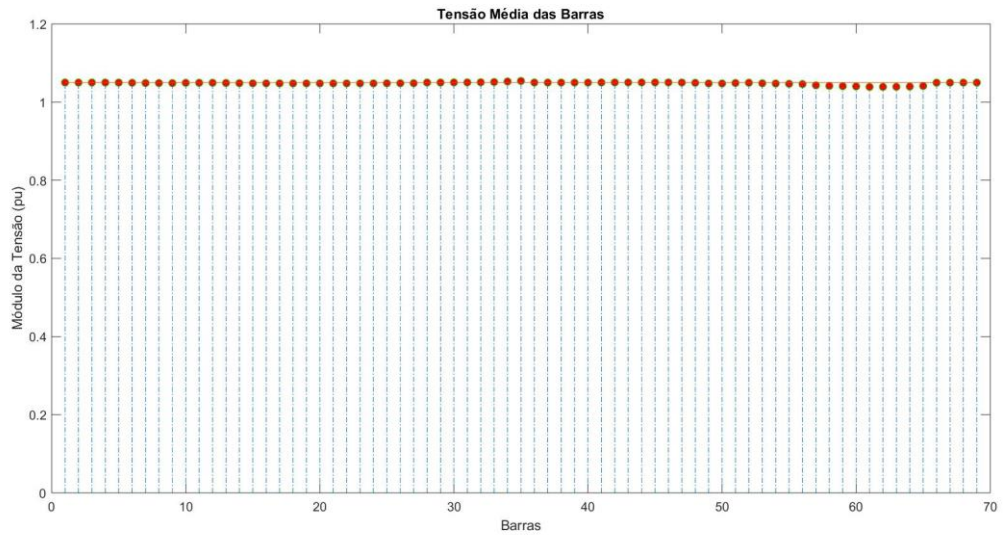
Fonte: Autor.

Figura 22 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-69 barras nas 10 simulações do Caso I (fator de potência unitário).



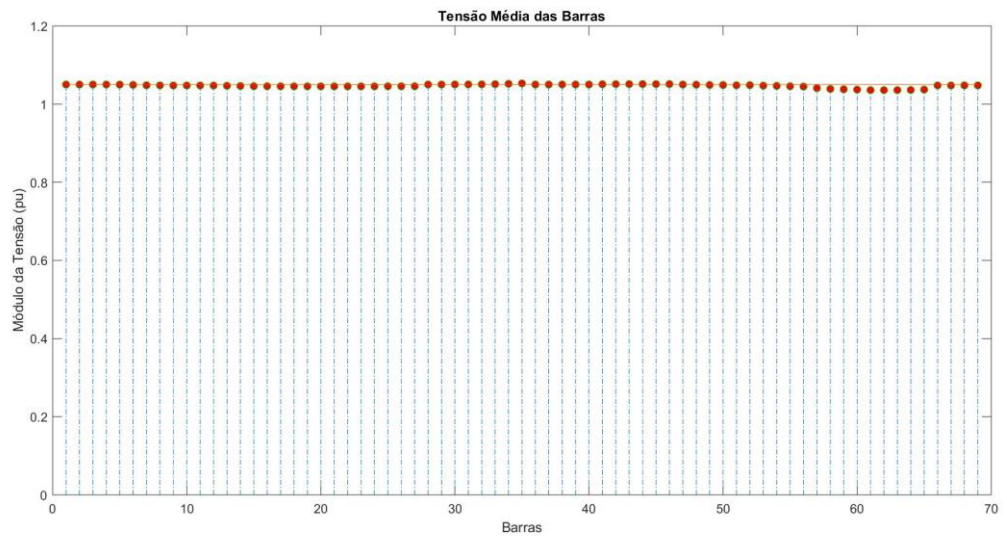
Fonte: Autor.

Figura 23 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-69 barras nas 10 simulações do Caso II (fator de potência 0,85 indutivo).



Fonte: Autor.

Figura 24 - Média de tensão nas barras do sistema IEEE-69 barras nas 10 simulações do Caso II (fator de potência unitário).



Fonte: Autor.

6.4 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados obtidos pelo AG para a estimativa da capacidade de hospedagem de diferentes sistemas de distribuição. Além de comparar o AG proposto com outra metodologia. Análises e discursão dos resultados apresentados aqui serão abordados no capítulo de conclusão deste trabalho.

7 Conclusão

Este trabalho apresentou uma aplicação da metaheurística Algoritmo Genético para a estimativa da capacidade de hospedagem da geração distribuída em redes de distribuição de energia elétrica, tendo como fator limitante a sobretensão. Sendo este critério traduzido para o AG através da função de avaliação elaborada, a qual se baseia no resultado do fluxo de carga. Para validação do algoritmo, utilizou-se sistemas testes do IEEE e CIGRÉ, considerando os cenários mais críticos em termo de margem de variação de tensão.

Para o sistema de 33 barras do IEEE, considerou-se como cenário crítico um carregamento de 40% da carga do total, um banco de capacitores chaveado na barra 13 e a tensão da barra de referência em 1,05 p.u. Inicialmente, estudou-se a possibilidade de conexão de geradores distribuídos com fator de potência de 0,85 indutivo em duas barras do sistema (barras 18 e 33), calculando a potência máxima que poderia ser injetada por eles sem que nenhuma das barras ultrapassasse o limite de sobretensão estabelecido em 1,05 p.u. Estudou-se também a possibilidade de conexão simultânea de GDs em quatro barras (18, 22, 25 e 33) e em seis barras (9, 18, 22, 25, 28 e 33).

Para o sistema de 69 barras do IEEE, considerou-se um nível de carregamento de 30% da carga máxima e a tensão da barra principal igual a 1,05 p.u. Para este sistema optou-se por analisar a influência do fator de potência dos geradores distribuídos para a capacidade de hospedagem. Primeiramente, estudou-se a conexão de quatro GDs (barras 27, 46, 50 e 65) com um fator de potência indutivo, e então, com o fator de potência unitário. Comparando os resultados obtidos, constata-se uma diminuição de 70% na capacidade de hospedagem do sistema para o caso do fator de potência unitário. Isso se deve a influência da absorção de potência reativa pelos geradores distribuídos em reduzir a tensão do sistema.

Ainda para os sistemas IEEE-69 barras, considerou-se a conexão simultânea de GDs em nove barras e o AG estimou uma capacidade de hospedagem por volta de 60% menor que para o caso da conexão em seis barras. Também foram comparados os resultados em que a GD operou com fatores de potência indutivo e unitário. Neste caso, a capacidade de hospedagem é 40% menor quando a GD opera com fator de potência unitário.

Como o AG é um algoritmo pseudoaleatório devido ao método de criação da sua população inicial, 10 simulações foram realizadas para cada caso analisado a fim de se avaliar a qualidade dos resultados do método proposto. Verificou-se que as respostas do AG tendem a convergir para um resultado próximo da média, garantindo confiabilidade ao método. Além disso, verificou-se também que os perfis de tensão das barras dos dois sistemas testes utilizados

respeitam o limite de sobretensão determinado para as capacidades de hospedagem estimadas ao longo das simulações realizadas.

O algoritmo mostrou atender ao seu objetivo, e pode ser uma ferramenta para estudos necessários para que as distribuidoras tomem ciência dos impactos que uma nova geração distribuída pode causar aos seus sistemas em termos de qualidade de tensão. Possibilitando assim, a tomada de decisão de permissão, ou não, da conexão de um novo gerador distribuído aos seus sistemas, ou exigir do requerente as adequações necessárias, como a potência máxima gerada e proteções, a fim de garantir o funcionamento pleno de sua rede dentro dos padrões exigidos de qualidade de energia.

Referências

- AFRICANO, Y.; CELEITA, D.; RAMOS, G. Co-simulation strategy of PV hosting capacity. IEEE, 2017. 6.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, A. N. D. E. E. Resolução Normativa ANEEL 482/2012. [S.l.]: [s.n.], disponível em <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em 25 de setembro de 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 1 –Introdução, disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/>. Acesso em 25 de setembro de 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição, disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/>. Acesso em 25 de setembro de 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/>. Acesso em 25 de setembro de 2018.
- APPEN, J.; BRAUN, M.; STELTZ, T. Time in the Sun – The Challenge of High Penetration in the German Electric Grid. IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 11, No. 2, p. 55-64, 2013.
- APPEN, J.; STELTZ, T.; NIEDERMEYER, F. Twilight of the Grids: The Impact of Distributed Solar on Germany’s Energy Transition. IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 13, No. 2, p. 50-61, 2015.
- BOLLEN, M.; HASSAN, F. Integrations of Distributed Generation in the Power System. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- CARVALHO, R. C. UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE EXPEDITA DA MÁXIMA INJEÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA POR GERADOR DISTRIBUÍDO. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DO PARÁ (CELPA). Conexão de Minigeração Distribuída ao Sistema de Distribuição. Elaborado em 13 de novembro de 2017. Disponível em: <<http://www.celpa.com.br>>. Acessado em 19 de fevereiro de 2019.
- CIGRÉ Technical Brochure No. 575, “Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources”, K. Strunz Convenor, WG C6.04, 2014.
- CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P. Microgrids and Active Distribution Networks. IET, Londres, 2009.

DE PAULA, R. R. Método de Monte Carlo e Aplicações. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.

DING, F.; MATHER, B. On Distributed PV Hosting Capacity Estimation, Sensitivity Study, and Improvement. IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, Vol 8, 03 jul. 2017. 11.

DOS SANTOS, E. C. Utilização dos Coeficientes de Sensibilidade das Perdas (ITL) na Determinação das Melhores Barras para Localização de Unidades de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição Radiais. Brasília: [s.n.], 2009.

DUBEY, A.; SANTOSO, S. On Estimation and Sensitivity Analysis of Distribution Circuit's Photovoltaic Hosting Capacity. IEEE Transactions on Power Systems, 04 jul. 2017. 11.

GOMES, C. A. M.; FERREIRA, H. P. Hosting Capacity Evaluation of Distributed Generation Systems with Genetic Algorithm. IEEE, Rio de Janeiro. 6.

HISCOCK, J.; HISCOCK, N.; TAYLOR, P. 11 kV voltage controller: practical considerations. International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Barcelona, 2003.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, Snapshot Of Global Photovoltaic Markets. Report IEA PVPS T1-33:2018, 2018.

INFILD, D. G.; THOMSON, M. Impact of widespread photovoltaics generation on distribution. IET Renewable Power Generation, 2007. 33–40.

JENKINS, N. et al. Embedded Generation. Primeira. ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2000.

JENKINS, N.; EKANAYAKE, J.; STRBAC, G. Distributed Generation. Primeira. ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010.

JOTHIBASU, S.; SANTOSO, S.; DUBEY, A. Determining PV Hosting Capacity without Incurring Grid Integration Cost. IEEE, 2016. 6.

KATIRAEI, F.; AGUERO, J. R. Solar PV Integration Challenges. IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 9, No. 3, p. 62-71, 2011.

LINDEN, R. “Algoritmos genéticos. Uma importante ferramenta da inteligência computacional”. 2ª ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2006.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. Geração Termelétrica - Planejamento, Projeto e Operação. Rio de Janeiro: Editora Interciência, v. Volume 1, 2004.

MEDEIROS, N. D. O.; FALCÃO, D. M. Photovoltaic Micro and Mini Generation Hosting Capacity Assessment in Distribution Grids. IEEE, Rio de Janeiro, 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA -MME. SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO. DEPARTAMENTO DE INFORMAÇÕES E

ESTUDOS ENERGÉTICOS. Energia Solar no Brasil e Mundo. Ano de referência - 2016. Publicado em 16/10/2017.

MONETA, D.; CARLINI, C.; VIGANÒ, G. Active MV Distribution Networks: Functional Validation of the Advanced Voltage Controller in the Grid4EU Italian Demonstrator. CIGRÉ Session 2014, França, Agosto 2014.

PAVELLA, M.; MURTHY, P. G. Transient Stability of Power Systems: Theory and Practice. Chichester, UK: Wiley, 1994.

ROTHLAUF, Franz. “Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms”. Second edition. The Netherlands: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

SARMIENTO, et al. Increase in the PV Hosting Capacity with OLTC Technology and PV VAR Absorption in a MV/LV Rural Brazilian Distribution System. IEE, 2016. 5.

SKM SYSTEM ANALYSIS, INC., Power*Tools for Windows, Electrical Engineering Analysis Software for Windows, DAPPER Reference Manual, 2014.

TANDE, J. O. G. Impact of wind turbines on voltage quality. In 8th International Conference, October 1998. 1158-1161.

TORQUATO, R. et al. A Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 33, NO. 2, abr. 2018. 11.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações. São Paulo: Editora Érica, 2012.

WEEDY, B. M. et al. Electric Power Systems. Fifth edition. ed. [S.l.]: [s.n.], 2012.

ZALZALA, A. M. S.; FLEMING, P. J. “Genetic algorithms in engineering systems”. IEE Control Engineering Series 55. London, United Kingdom: The Institutions of Electrical Engineers, 1997.

ZAVADIL, R. et al. Interconnecting wind generation into the power system. IEEE Power and Energy Magazine, 2007. 47-58.

APÊNDICE A – RESULTADOS PARA OS SISTEMAS IEEE – 33 BARRAS E 69 BARRAS

Este apêndice apresenta os resultados das 10 simulações realizadas para cada caso dos sistemas IEEE – 33 barras e 69 barras.

Tabela 19-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 33 barras (Caso I).

Simulações	Potência estimada para cada barra		Soma das potências
	Barra 18 (MW)	Barra 33 (MW)	CH estimada (MW)
01	0	1,4967	1,4967
02	0,0631	1,2934	1,3565
03	0	1,3140	1,314
04	0	1,4262	1,4262
05	0,6425	0,739	1,3815
06	0,2688	1,250	1,5191
07	0	1,3886	1,3886
08	0,2422	1,2147	1,4569
09	0,0817	1,2792	1,3609
10	0,0142	1,5729	1,5871
Média			1,42875

Fonte: Autor.

Tabela 20-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 33 barras (Caso II).

Simulações	Potência estimada para cada barra				Soma das potências
	Barra 18 (MW)	Barra 33 (MW)	Barra 22 (MW)	Barra 25 (MW)	CH estimada (MW)
01	0	0,5005	0,1398	1,039	1,6794
02	0,5572	0,2204	0,388	0,3099	1,4755
03	0	1,0588	0,6666	0,6222	2,3476
04	0	0,7209	0,1761	1,0616	1,9586
05	0	0,7206	0,5687	0,4725	1,7618
06	0,4658	0,1004	0,3342	1,2655	2,1659
07	0	0,9682	0,791	0,3893	2,1485
08	0,654	0,3409	0,0546	0,5859	1,6354
09	0	0,5482	0,6483	0,6609	1,8574
10	0,168	0,7536	0,1798	0,9128	2,0142
Média					1,90443

Fonte: Autor.

Tabela 21-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 33 barras (Caso III).

Simulações	Potência estimada para cada barra						Soma das potências
	Barra 09 (MW)	Barra 18 (MW)	Barra 22 (MW)	Barra 25 (MW)	Barra 28 (MW)	Barra 33 (MW)	CH estimada (MW)
01	0,4432	0,3764	0,3500	0,4994	0,5747	0,1183	2,3620
02	0,0000	0,5686	0,3874	0,5368	0,0438	0,6765	2,2130
03	1,0000	0,1117	0,2798	0,4373	0,2131	0,6721	2,7141
04	0,4003	0,2995	0,2949	0,4392	0,4589	0,3815	2,2743
05	0,7135	0,0638	1,2032	0,4915	0,0720	0,9174	3,4613
06	0,0000	0,0059	1,2153	0,0106	0,8367	0,8444	2,9130
07	0,9986	0,0696	0,0535	0,1936	0,4256	0,0545	1,7954
08	0,2246	0,4597	0,6494	1,1062	0,2189	0,2569	2,9157
09	0,0000	0,2354	0,0225	0,2096	0,8499	0,8198	2,1373
10	0,0000	0,2927	0,4340	0,9134	0,9770	0,1233	2,7404
Média							2,5526

Fonte: Autor.

Tabela 22-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso I – FP 0,85 indutivo).

Simulações	Potência estimada para cada barra				Soma das potências
	Barra 46 (MW)	Barra 27 (MW)	Barra 65 (MW)	Barra 50 (MW)	CH estimada (MW)
01	2,7597	0,2771	0,5946	3,1010	6,7323
02	0,6956	0,1894	0,7060	4,9405	6,5315
03	1,0083	0,1769	0,7143	4,8692	6,7687
04	0,5161	0,2197	0,5723	4,6503	5,9584
05	0,7689	0,2786	0,0822	4,1327	5,2624
06	0,0000	0,0433	0,5679	4,4774	5,0886
07	1,2537	0,1898	0,7230	4,5048	6,6713
08	0,2723	0,2085	0,7045	4,9175	6,1029
09	0,7841	0,2308	0,3534	2,7515	4,1198
10	0,5333	0,1737	0,7671	4,4451	5,9192
Média					5,9155

Fonte: Autor.

Tabela 23-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso I – FP unitário).

Simulações	Potência estimada para cada barra				Soma das potências
	Barra 46 (MW)	Barra 27 (MW)	Barra 65 (MW)	Barra 50 (MW)	CH estimada (MW)
01	0,1313	0,0414	0,4899	0,9915	1,6541
02	0,2780	0,1667	0,2377	0,9301	1,6126
03	0,1178	0,1227	0,1153	1,7592	2,1150
04	0,4180	0,0364	0,5789	1,3128	2,3461
05	0,0000	0,0646	0,1006	1,7662	1,9314
06	0,3286	0,1291	0,3336	1,3644	2,1557
07	0,6258	0,1187	0,0775	0,6025	1,4245
08	0,7059	0,0300	0,2384	0,3932	1,3675
09	0,1902	0,0622	0,0963	0,9268	1,2754
10	0,8646	0,0840	0,4422	0,9397	2,3305
Média					1,8212

Fonte: Autor.

Tabela 24-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso II – FP 0,85 indutivo) – Parte 1.

Simulações	Potência estimada para cada barra				
	Barra 19 (MW)	Barra 69 (MW)	Barra 52 (MW)	Barra 67 (MW)	Barra 35 (MW)
01	0,0010	0,0757	0,5178	0,1701	0,0931
02	0,0000	0,0378	0,2402	0,4202	0,1773
03	0,0002	0,1250	0,3484	0,3462	0,4695
04	0,0000	0,1121	0,2856	0,2432	0,0318
05	0,0000	0,1688	0,7869	0,1816	0,2232
06	0,0000	0,2010	0,3245	0,2766	0,1768
07	0,0000	0,1461	0,4950	0,1632	0,1748
08	0,0000	0,0844	0,2605	0,6094	0,1437
09	0,0000	0,1073	0,6537	0,3088	0,1454
10	0,0000	0,6368	0,1503	0,0202	0,2524

Fonte: Autor.

Tabela 25– Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso II – FP 0,85 indutivo) – Parte 2.

Simulações	Potência estimada para cada barra				Soma das potências
	Barra 46 (MW)	Barra 27 (MW)	Barra 65 (MW)	Barra 50 (MW)	CH estimada (MW)
01	0,5053	0,2771	0,5946	3,1010	2,1193

02	0,5248	0,1894	0,7060	4,9405	2,3790
03	0,3558	0,1769	0,7143	4,8692	2,9428
04	0,5020	0,2197	0,5723	4,6503	2,3190
05	0,1713	0,2786	0,0822	4,1327	2,7168
06	0,2439	0,0433	0,5679	4,4774	2,2059
07	0,2504	0,1898	0,7230	4,5048	3,0800
08	0,2392	0,2085	0,7045	4,9175	2,5489
09	0,5873	0,2308	0,3534	2,7515	3,4369
10	0,3547	0,1737	0,7671	4,4451	2,1590
Média	2,5908				

Fonte: Autor.

Tabela 26-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso II – FP unitário) – Parte 1.

Simulações	Potência estimada para cada barra				
	Barra 19 (MW)	Barra 69 (MW)	Barra 52 (MW)	Barra 67 (MW)	Barra 35 (MW)
01	0,0000	0,0826	0,4586	0,1530	0,0446
02	0,0000	0,0860	0,3549	0,1280	0,0905
03	0,0000	0,0918	0,1583	0,0541	0,1573
04	0,0000	0,2255	0,0867	0,0899	0,0637
05	0,0000	0,1100	0,5357	0,0446	0,2026
06	0,0000	0,1515	0,2049	0,0686	0,1414
07	0,0000	0,0187	0,3003	0,0561	0,0556
08	0,0000	0,0681	0,1416	0,2275	0,0862
09	0,0000	0,2579	0,2610	0,0052	0,0413
10	0,0000	0,1210	0,0414	0,0941	0,1851

Fonte: Autor.

Tabela 27-Resultados obtidos pelo AG nas 10 simulações realizadas para o sistema IEEE – 69 barras (Caso II – FP unitário) – Parte 2.

Simulações	Potência estimada para cada barra				Soma das potências
	Barra 46 (MW)	Barra 27 (MW)	Barra 65 (MW)	Barra 50 (MW)	CH estimada (MW)
01	0,2214	0,0091	0,4192	0,6208	2,0093
02	0,0583	0,0205	0,0036	0,1511	0,8929
03	0,2540	0,0522	0,3387	0,2265	1,3330
04	0,0701	0,0692	0,7635	0,5078	1,8765
05	0,1294	0,0205	0,3274	0,0114	1,3816
06	0,2183	0,0073	0,2660	0,2911	1,3492
07	0,3447	0,0248	0,2678	0,7260	1,7939
08	0,1112	0,1183	0,1634	0,6290	1,5452
09	0,1525	0,0091	0,4055	0,7125	1,8450

10	0,3399	0,0504	0,2656	0,7550	1,8525
Média	1,5879				

Fonte: Autor.