

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

# Alocação Ótima de Unidades Geradoras em Sistemas de Distribuição Utilizando Programação Evolucionária

João Marcelo Cavalcante de Albuquerque

Campina Grande – Paraíba

Novembro de 2006

João Marcelo Cavalcante de Albuquerque

# Alocação Ótima de Unidades Geradoras em Sistemas de Distribuição Utilizando Programação Evolucionária

*Dissertação apresentada à Coordenação do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande, em cumprimento às exigências para  
obtenção do Grau de Mestre em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Benemar Alencar de Souza, D. Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba

Novembro de 2006

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da UFCG

- A345a  
2006
- Albuquerque, João Marcelo Cavalcante de  
Alocação ótima de unidades geradoras em sistemas de  
distribuição utilizando programação evolucionária / João  
Marcelo Cavalcante de Albuquerque. – Campina Grande:  
UFCG, 2006.  
49 f. il.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –  
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de  
Engenharia Elétrica e Informática  
Referências.  
1. Geração distribuída 2. Programação evolucionária  
3. Alocação ótima de geradores I. Título 4. Orientador:  
Souza, Benemar Alencar de, D.Sc.

CDU: 621.3.05

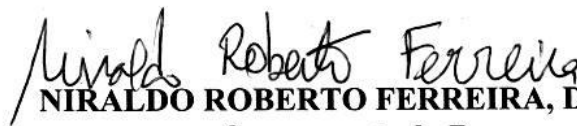
**ALOCAÇÃO ÓTIMA DE UNIDADES GERADORAS EM SISTEMAS  
DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO EVOLUCIONÁRIA**

**JOÃO MARCELO CAVALCANTE DE ALBUQUERQUE**

Dissertação Aprovada em 20.12.2006



**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG**  
Orientador



**NIRALDO ROBERTO FERREIRA, Dr., UFBA**  
Componente da Banca



**WALMERAN JOSÉ TRINDADE JÚNIOR, D.Sc., CEFET-PB**  
Componente da Banca



**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
DEZEMBRO - 2006

Àqueles a quem amo.

## **Agradecimentos**

A jornada torna-se mais alegre ao lado de uma boa companhia. Cerquei-me de muitas delas ao longo do caminho que resultou nesta dissertação. Deus me concedeu a oportunidade de conhecer e receber o apoio de muitos e cada um, ao seu modo, tornou a caminhada mais agradável e o resultado final mais valioso. Minha família, como sempre, foi meu porto seguro, daqueles que restauram os ânimos mesmo após as maiores tormentas. Aos amigos que fiz e àqueles que confirmei, obrigado sempre.

# Sumário

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>viii</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>x</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Revisão Bibliográfica .....	2
1.2 Objetivos .....	7
1.3 Organização do Trabalho .....	7
<b>2. Fundamentação Teórica .....</b>	<b>9</b>
2.1 Geração Distribuída .....	9
2.2 Programação Evolucionária .....	13
<b>3. Implementação Computacional .....</b>	<b>17</b>
3.1 Formulação do problema .....	17
3.2 Método de Solução Proposto .....	19
3.2.1 Modelos de Alimentador e de Carga .....	19

3.2.2	Modelo de Gerador .....	21
3.2.3	Codificação da Solução .....	23
3.2.4	Função <i>Fitness</i> .....	24
3.2.5	Dados de Entrada .....	26
3.2.6	Desenvolvimento do Algoritmo Proposto .....	27
<b>4.</b>	<b>Apresentação e Análise dos Resultados .....</b>	<b>33</b>
4.1	Unidades Geradoras .....	33
4.2	Alimentador de 168 Barras .....	34
4.3	Resultados Obtidos .....	36
<b>5.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>40</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>43</b>
	<b>Apêndice — Dados do alimentador usado no exemplo de aplicação .....</b>	<b>46</b>



## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Fluxograma das etapas da programação evolucionária .....	14
Figura 3.1 – Modelo do $i$ -ésimo trecho de um alimentador .....	20
Figura 3.2 – Discretização das potências ativa e reativa geradas .....	22
Figura 3.3 – Exemplo de indivíduo da população .....	23
Figura 4.1 – Perdas do alimentador antes e após a instalação dos geradores .....	38
Figura 4.2 – Comparativo entre os formadores do custo total da geração distribuída .....	39

## Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Dados dos geradores disponíveis para instalação .....	34
Tabela 4.2 – Parâmetros do método de otimização .....	35
Tabela 4.3 – Níveis da curva de duração de carga segmentada .....	36
Tabela 4.4 – Configuração de geração distribuída proposta .....	36
Tabela 4.5 – Programa de operação dos geradores por patamar de carga .....	36
Tabela 4.6 – Reflexo da operação dos geradores sobre níveis de tensão .....	37
Tabela 4.7 – Reflexo da operação dos geradores sobre as perdas do alimentador .....	38
Tabela 4.8 – Custos operacionais dentro do horizonte de estudo de cinco anos .....	39
Tabela A.1 – Dados do alimentador utilizado como exemplo de aplicação .....	47

# Resumo

A utilização de geração distribuída vem crescendo nos sistemas elétricos atuais, motivado, principalmente, pelos incentivos governamentais visando ampliar a participação de novas fontes de energia na matriz energética dos diversos países. Esta crescente participação motiva o desenvolvimento de métodos que permitam avaliar técnica e economicamente este tipo de investimento em redes de distribuição. Seguindo esta tendência, nessa dissertação trata-se do problema de alocação e dimensionamento de unidades geradoras em redes de distribuição radiais. Um algoritmo que visa maximizar a redução dos custos necessários ao atendimento da carga é proposto. Adicionalmente, o algoritmo estabelece o programa de operação de cada gerador instalado, durante os diferentes níveis de carga do alimentador. Como técnica de otimização, é utilizada a programação evolucionária. A aplicabilidade do método foi avaliada em um alimentador com elevado índice de perdas e a instalação dos geradores resultou em uma significativa redução dos custos totais.

# Abstract

The use of generators in actual distribution electrical systems is increasing mainly due to the government incentives to the use of new power sources in the energetical matrix of many countries. This increasing participation motivates the development of methods which allow technical and economical evaluation of such kind of investment in distribution networks. Thus, it is presented an algorithm for the allocation and sizing of generators in radial distribution networks in order to maximize the reduction on the total load supply costs. Additionally, it is given the operational schedule for each generator installed, in all load levels of the feeder. The evolutionary programming is used as the optimization technique. The applicability of the method was evaluated using a feeder with high losses index and the proposed generators allocation provided a considerable reduction on total costs.

# Capítulo 1

## Introdução

Os estudos, operação e planejamento dos sistemas de distribuição são levados a efeito considerando o fato do fluxo de carga ser normalmente no sentido da subestação para as barras terminais. Entretanto, essa previsibilidade do sentido do fluxo vem deixando de ser geral nos últimos tempos, com a reintrodução da geração próximo às cargas. Esta reconfiguração tem diferentes causas, sendo as de maior destaque: o maior incentivo dado aos investimentos em co-geração e em fontes alternativas por parte das entidades regulamentadoras do setor elétrico; o desenvolvimento tecnológico das unidades geradoras de menor porte, e o custo mais baixo e a modularidade destas unidades, o que permite o planejamento em prazos menores e com incertezas reduzidas.

O termo geração distribuída (GD) refere-se a fontes de potência conectadas diretamente ao sistema de distribuição da concessionária ou no lado de medição do consumidor. Este tipo de geração pode ocorrer em diferentes escalas de potência, desde micromódulos (5 kW) até grandes unidades (300 MW), a depender das condições da rede de distribuição (Ackermann et al., 2001). A interligação destes pontos de geração a

sistemas que, costumeiramente, possuíam apenas uma direção de fluxo de potência traz, paralelamente aos vários benefícios, novos desafios e problemas a serem estudados.

### **1.1. Revisão Bibliográfica**

A utilização de geração distribuída traz algumas vantagens à empresa distribuidora. Além de permitir postergar investimentos em infra-estrutura, necessários para atender o aumento da demanda em uma área, é possível reduzir perdas e melhorar o perfil de tensão dos alimentadores. Através de uma configuração adequada, a geração distribuída pode também aumentar a confiabilidade do sistema e melhorar a qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor final (Short, 2004).

Apesar dos benefícios inerentes à geração distribuída, a integração destes pontos ao sistema exige das empresas distribuidoras novos cuidados, tais como a necessidade de rearranjo dos sistemas de proteção e os procedimentos relativos à operação dos geradores em ilhas (regiões do alimentador que se mantêm energizadas, mesmo com este desconectado da subestação). Adicionalmente, uma das questões que desperta grande interesse dos pesquisadores é o posicionamento e o dimensionamento ótimos das unidades geradoras no sistema, tendo em vista diferentes objetivos. Assim, combinando da melhor forma energia proveniente da subestação e energia dos geradores, é possível reduzir os custos de suprimento de energia aos consumidores, reduzir as perdas totais no alimentador, aumentar a confiabilidade do sistema ou controlar a tensão em determinadas barras do alimentador.

A instalação de unidades geradoras em sistemas de distribuição pode se dar de duas formas (Jenkins, 1995). Existem aqueles geradores que são instalados especificamente para dar suporte à operação do sistema da concessionária, enquanto que outros, principalmente co-geradores, operam independentemente das condições de carregamento e de tensão da

rede. Nos estudos de otimização da geração distribuída considerando-se os geradores com operação controlada pelas condições do sistema, a barra em que existe gerador instalado pode ser considerada do tipo PV, em que são especificados o valor de potência ativa fornecido pela máquina e o valor de tensão que se deseja manter naquela barra. Entretanto, existe também a possibilidade de se modelar a barra com gerador como uma barra do tipo PQ. Neste modelo, a barra torna-se caracterizada por valores líquidos de potência ativa e de potência reativa, ambos definidos como a diferença entre a potência que é demandada pela carga e a que é gerada na barra. Outra forma de representação das barras com geradores instalados foi proposta por Pidre et al. (1992), a qual é conhecida como tipo PX.

Nesta representação, mais comumente utilizada para a representação de geradores assíncronos, a potência ativa injetada é considerada constante e a potência reativa é função da reatância de magnetização da máquina, a qual, por sua vez, depende do módulo da tensão em seus terminais.

Nara et al. (2001) propuseram uma forma de determinar a alocação e o dimensionamento ótimos das unidades geradoras que minimizassem as perdas no sistema de distribuição. O número máximo de geradores, assim como os tipos disponíveis para instalação, relativamente às potências ativas nominais, eram pré-determinados. Como método de otimização, foi utilizada a busca tabu em dois estágios combinados: um, externo, para a alocação, e outro, interno, para o dimensionamento ótimo. O método proposto considera todas as cargas do alimentador com fator de potência unitário e, por isso, trabalha apenas com o fluxo de potência ativa.

Celli & Pilo (2001) apresentaram um procedimento para a alocação ótima de unidades geradoras em redes de distribuição utilizando algoritmos genéticos. O método objetivava otimizar certas condições técnicas relativas a esse tipo de problema, como limites de capacidade das linhas, perfil de tensão e limites de corrente de curto-circuito.

Dugan et al. (2001) apresentaram um método de planejamento para sistemas de distribuição que considerava a utilização de geração distribuída baseada tanto em fontes convencionais quanto não-convencionais de energia. A proposta apresentada é uma extensão de conceitos de planejamento da distribuição já consolidados e avalia a presença da geração distribuída em alternativas para a minimização de custos de atendimento à carga. Nara (2002) também apresentou os efeitos desfavoráveis da implantação de geração em redes de distribuição, tanto do ponto de vista das companhias distribuidoras quanto dos produtores independentes. Entre eles, os efeitos no perfil de tensão do alimentador foram detalhados.

Os impactos da geração distribuída nas perdas elétricas, na confiabilidade e no perfil de tensão dos alimentadores de distribuição foram tratados por Borges & Falcão (2003). Neste trabalho, é apresentada uma metodologia para avaliar a influência do local de instalação dos geradores ao longo do alimentador, bem como de suas capacidades. Tal metodologia baseia-se na avaliação de índices de confiabilidade e na utilização de um método de fluxo de carga em que as barras onde existem geradores são barras PV.

Batrinu et al. (2004) propuseram um método de controle de tensão em sistemas de distribuição com geradores, com vistas à minimização das variações de tensão nas barras de carga e não nas barras onde existem geradores instalados. Para tal, utilizaram programação evolucionária em dois estágios combinados. No laço externo, cada iteração determina uma seção do gráfico de tensão de referência na subestação *versus* tempo. Com esta referência definida, no laço interno, são analisadas as combinações de variáveis independentes do tempo: relação de transformação dos vários transformadores e valores de referência das tensões nos terminais dos geradores.

A alocação e o dimensionamento ótimos de geradores foram tratados por El-Khattam et al. (2004) com o objetivo de tornar a geração distribuída uma opção



economicamente atrativa no mercado de energia elétrica. Em seu trabalho, uma análise heurística de custo-benefício juntamente com um novo modelo de otimização são usados para estimar a alocação e o dimensionamento mais lucrativos para a operação do sistema durante os picos de demanda.

Em 2004, Calderaro et al. desenvolveram um método que permite selecionar, entre diferentes cenários de carregamento e de participação de geração distribuída no sistema, as melhores alternativas em termos de perfil de tensão. Rahman et al. (2004) também propuseram uma metodologia para posicionamento da geração distribuída, mas com vistas à minimização das perdas no sistema. Para a alocação do gerador, é escolhida a barra de maior índice de sensibilidade; já para o seu dimensionamento é proposta a utilização de programação evolucionária, considerando a barra com gerador como sendo do tipo PQ e respeitando-se os limites de tensão do alimentador. No algoritmo de programação evolucionária utilizado, a população em cada geração não inclui indivíduos que desobedeçam às restrições do problema. Como limitações do método se destacam: apenas um gerador é possível em cada alimentador, o qual é dimensionado com base na hipótese simplificativa de que sempre operará com um mesmo fator de potência.

El-Khattam et al. (2005) apresentaram um método de estimação do investimento ótimo em geração distribuída para suprir os picos de demanda do sistema, conjuntamente com alternativas de investimento mais tradicionais. O modelo proposto visa minimizar os custos totais do sistema, sendo eles: investimento em geradores, custo da energia proveniente da subestação e custo das perdas elétricas. As principais restrições técnicas que envolvem a instalação de geração distribuída foram apresentadas por Keane & O'Maley (2005), que também propuseram um algoritmo baseado em programação linear

para maximizar a quantidade de potência proveniente dos geradores instalados, respeitando-se a certas restrições operativas.

Souza et al. (2005) propuseram um algoritmo para controle de tensão nas barras de um alimentador em que existem unidades de geração instaladas. As barras com geradores são consideradas do tipo PV e o método da soma de potências foi utilizado como sub-rotina. O problema foi formulado de modo que a função objetivo a ser minimizada fosse a função erro total no controle das tensões. Essa função é de característica quadrática, o que motivou a escolha do método de Newton como método de otimização

Relativamente às técnicas de fluxo de carga ótimo utilizando programação evolucionária, Yuryevich & Wong (1999) apresentaram os principais requisitos e características deste tipo de problema. Propuseram um algoritmo pouco sensível às estimativas iniciais e com velocidade de convergência aumentada pela adição de informações sobre o gradiente da função objetivo. Rajičić & Dimitrovski (2001) propuseram um novo modelo de barras do tipo PV para sistemas de transmissão e distribuição radiais ou fracamente malhados. Este modelo pode ser facilmente implementado em métodos de fluxo de carga do tipo *backward/forward*, gerando resultados com maior exatidão. Doraiswamy et al. (2005) também desenvolveram um método para resolver o problema de fluxo de carga ótimo, desta vez utilizando programação evolucionária. Neste trabalho, o algoritmo de resolução é baseado apenas nos mecanismos de seleção (competição entre indivíduos através da avaliação da função objetivo) e de mutação (criação de novos indivíduos mediante modificações aleatórias em alguns dos já existentes).

## 1.2. Objetivos

O objetivo do trabalho de pesquisa realizado para efeito de elaboração desta dissertação foi desenvolver um método de planejamento ótimo da geração distribuída, ou seja, de alocação e dimensionamento ótimos de geradores em sistemas de distribuição radiais com vistas a maximizar a redução dos custos necessários ao atendimento da carga. Optou-se por utilizar a programação evolucionária como estratégia de otimização pela facilidade oferecida pelo método em definir uma função objetivo que contemplasse os vários requisitos e restrições do problema, assim como para a codificação no indivíduo de todas as informações necessárias à solução. O método da soma de potências foi escolhido para o cálculo do fluxo de carga devido à prévia implementação computacional de uma versão do algoritmo que possibilitava a consideração de barras de geração no alimentador, sem perder sua eficiência computacional (Souza et al., 2005). Os objetivos específicos foram:

- incorporar ao algoritmo de programação evolucionária conhecimentos específicos do problema, visando reduzir o espaço de busca;
- estudar a influência de diferentes codificações da solução no indivíduo e de diferentes composições da função objetivo no desempenho do método;
- obter um método de análise da geração distribuída que possa ser aplicado a qualquer sistema radial de distribuição de energia elétrica.

## 1.3. Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- O capítulo 2 traz uma fundamentação teórica sobre os dois principais temas da pesquisa: geração distribuída e programação evolucionária. Serão apresentados aspectos técnicos e econômicos da implantação de geradores próximo às cargas,

assim como os princípios de programação da técnica de algoritmos evolucionários utilizada;

- No capítulo 3 é descrita a implementação computacional do método. São apresentados o modelo de sistema de distribuição utilizado, a codificação da solução, as diferentes fases do algoritmo de programação evolucionária, a composição da função objetivo e as restrições do problema;
- No capítulo 4 encontra-se a validação do método proposto, sendo analisados os resultados de sua aplicação a um alimentador de distribuição real;
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões. São também indicadas possibilidades de continuidade da pesquisa como propostas para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

### 2.1. Geração Distribuída

As companhias distribuidoras de energia elétrica estão continuamente planejando a expansão e a reforma de suas redes com o objetivo de suprir o crescimento da carga e prover seus consumidores com uma fonte confiável de energia. Tradicionalmente, para atender ao crescimento da demanda, as alternativas mais consideradas são: construção de novas subestações, expansão da capacidade das já existentes, construção de novos alimentadores ou reforma dos já existentes (recapacitação ou novo roteamento). Entretanto, com os incentivos criados pelos governos de vários países com vistas a ampliar a participação das novas fontes de energia no parque de geração, as empresas passaram a investigar a possibilidade técnica e econômica de novas formas de expansão de capacidade, como a geração distribuída.

Considera-se como geração distribuída aquela que é levada a efeito com unidades geradoras dispersas ao longo de um sistema de distribuição (Short, 2004). Os tipos de tecnologia utilizados neste tipo de geração são vários: fontes renováveis de

energia, como turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos; turbinas a gás natural e a biogás; pequenas centrais hidrelétricas; geradores a diesel; e células a combustível. Em princípio, tanto empresas de distribuição quanto consumidores podem investir e operar unidades de geração distribuída.

A importância econômica da geração nos sistemas de distribuição vem aumentando nos últimos anos e as estimativas indicam crescimento ainda maior para o futuro. As principais razões para tal são (Celli et al., 2001; Calderaro et al., 2004 & El-Khattam et al., 2004):

- incentivo dado aos investimentos de co-geração e de fontes alternativas por parte das entidades regulamentadoras do setor elétrico;
- menor custo e menor tempo para instalação, assim como para a amortização do investimento, o que favorece a entrada no sistema de novos agentes;
- alta eficiência de certas tecnologias, como as plantas de co-geração;
- menor impacto ambiental das fontes renováveis;
- menor risco dos investimentos, devido ao menor custo e à modularidade das unidades de geração distribuída, o que permite o planejamento em prazos menores e com incertezas reduzidas;
- menores custos com o transporte da energia, devido à maior proximidade entre geração e carga.

Além de permitir que as empresas posterguem investimentos em infraestrutura e diversifiquem suas fontes de energia, investindo em alternativas à geração em grande escala, a instalação de pontos de geração no sistema tende a reduzir as perdas totais, melhorar o perfil de tensão do alimentador e aliviar a sobrecarga da subestação nos horários de pico. Coordenadas corretamente, as unidades de geração podem ter um impacto positivo sobre a confiabilidade do sistema. Da forma mais simples, o gerador pode ser

usado como fonte de energia reserva, no caso de interrupção do fluxo de potência vindo da subestação. No caso de autoprodutores, a geração consegue suprir o consumo local e injeta na rede de distribuição ou transmissão a energia excedente. Desta forma, é comum que as unidades de geração distribuída operem em conjunto com a subestação para suprir a demanda do sistema.

Apesar dos benefícios trazidos, integrar pontos de geração ao sistema de distribuição não é tarefa fácil, considerando que tal sistema foi originalmente projetado para receber energia em um dado ponto e distribuí-la pelos pontos de carga dos consumidores. A introdução da geração distribuída traz um novo conjunto de condições ao sistema, não só relativamente à direção dos fluxos de potência ativa e reativa, mas também à quantidade de potência necessária a ser transportada. Como pontos que merecem a atenção da companhia distribuidora ao utilizar a geração distribuída, pode-se citar: possível deterioração da qualidade da energia entregue ao consumidor; necessidade de rearranjo do sistema de proteção, visto a possível modificação no sentido dos fluxos nas linhas; e os cuidados necessários a possível operação dos geradores em ilhas. A instalação de geradores em um alimentador também pode causar elevação indevida de tensão, visto que o controle de regulação de tensão feito tradicionalmente, através de mudança de tape dos transformadores da subestação e instalação de reguladores de tensão e bancos de capacitores, supõe que o fluxo de potência acontece sempre da subestação para as barras terminais (Borges & Falcão, 2003).

Em um modelo institucional que incentiva a competição entre os agentes na compra e venda de energia, o acesso e o uso das redes elétricas indistintamente se torna uma condição essencial para viabilizar o transporte da energia (ANEEL, 2005). Entretanto, o livre acesso aos sistemas de distribuição e transmissão não significa que este se dará da forma pretendida pelo acessante. Na verdade, o livre acesso às redes elétricas é um direito

de todo usuário interessado, porém, implementado de forma planejada. Os pontos de conexão de novas usinas ao sistema elétrico são definidos pelo planejamento setorial, em acordo com o Operador Nacional do Sistema (ONS), observando critérios técnicos e econômicos para encontrar a melhor forma de integrar a nova usina, congregando interesses do acessante e da operação ótima sistema elétrico.

A localização e o dimensionamento de unidades de geração distribuída são muito importantes para o planejamento do sistema, pois a sua instalação em determinados pontos pode trazer apenas pouco ou nenhum alívio de capacidade para a rede da empresa. Ou seja, é necessário se analisar todos os cenários possíveis de alocação e capacidade das máquinas para que a empresa consiga ter disponível o máximo possível da potência aparente instalada. Dado um conjunto de possíveis alternativas de investimento e restrições a serem obedecidas, a avaliação para alocação e dimensionamento ótimos de unidades geradoras utiliza comumente um algoritmo de fluxo de carga com uma adequada representação dos geradores e uma determinada técnica de otimização.

Em muitos casos, é certo que não será possível que a empresa somente instale geradores em seu sistema nos locais indicados pelo algoritmo de otimização, visto que produtores independentes ou autoprodutores podem solicitar a conexão à rede em outros locais. Adicionalmente, pode não haver potencial de geração nos locais sugeridos pelo algoritmo. Quando a geração distribuída é feita por meio de fontes renováveis de energia, como através de biomassa e energia eólica, o problema de alocação das máquinas depende fortemente do potencial de geração disponível na área. Entretanto, quando a geração é feita por pequenos geradores síncronos em plantas térmicas, por exemplo, o potencial local não é tão relevante e a tarefa de alocação e dimensionamento ganham maior importância. Assim, as empresas estão cada vez mais interessadas em métodos que lhes permitam avaliar o impacto produzido em seu sistema pela instalação de geradores



independentes e lhes oriente nas negociações com novos acessantes sobre os possíveis pontos de instalação ao sistema, objetivando sempre a operação ótima relativamente a certos índices de qualidade, tais como: níveis de tensão, perdas técnicas, confiabilidade do suprimento e sobrecarga de subestações e linhas.

## 2.2. Programação Evolucionária

A variedade de técnicas clássicas de otimização é grande. De maneira geral, são métodos eficientes e de robustez comprovada. Entretanto, são restritos a determinados modelos matemáticos do problema e podem ser muito sensíveis à escolha das estimativas iniciais. Por vezes, também exigem uma formulação matemática relativamente complexa, sem ainda garantir que o ótimo global do problema seja encontrado. Os algoritmos evolucionários emergiram como uma abordagem eficiente para resolver problemas de otimização, baseando-se em mecanismos da seleção natural na busca da solução ótima (Lee & Yang, 1998).

Entre os algoritmos evolucionários estão os algoritmos genéticos, as estratégias evolucionárias e a programação evolucionária. Estas técnicas visualizam a evolução como um processo de otimização, visto que a seleção natural conduz os fenótipos o mais próximo possível do ótimo, considerando-se as condições e restrições do ambiente (Fogel, 1994). Como outras técnicas heurísticas utilizadas para resolver problemas de otimização combinatória, os algoritmos evolucionários não garantem que a melhor solução encontrada é o ótimo global da função objetivo; entretanto, ela tem grandes chances de ser uma aproximação deste ótimo. O interesse nestes algoritmos cresceu devido, principalmente, a suas relativas vantagens sobre outros métodos de otimização, tais como: ausência de imposições ou restrições quanto ao tipo de função objetivo; robustez, sendo eficaz na obtenção da solução ótima em espaços de busca relativamente grandes; maior

adaptabilidade a mudanças nas variáveis do problema, não sendo necessário reformular todo o problema do seu início (Fogel, 2000).

A programação evolucionária é uma das técnicas de abordagem evolutiva. Nela, cada solução possível é considerada um indivíduo de uma população e, ao longo das gerações, perpetuar-se-ão aqueles mais bem adaptados às características do problema, isto é, as soluções que apresentarem os melhores valores da função objetivo. Neste processo, são utilizadas geralmente duas regras: a combinação e a seleção. Na Figura 2.1 é apresentado um fluxograma com as principais etapas da programação evolucionária.

De forma geral, há quatro passos para se montar um algoritmo de programação evolucionária, a saber (Fogel, 2000): determinar a forma como a solução do problema será codificada em um indivíduo; formar a população inicial; determinar o operador para gerar descendência (regra de combinação); e determinar o esquema de competição entre indivíduos (regra de seleção). A forma de codificação da solução deve levar em consideração que todas as informações necessárias ao cálculo da função objetivo e das restrições do problema devem estar encerradas no indivíduo. As características de cada indivíduo da população inicial são criadas, em geral, de forma aleatória.

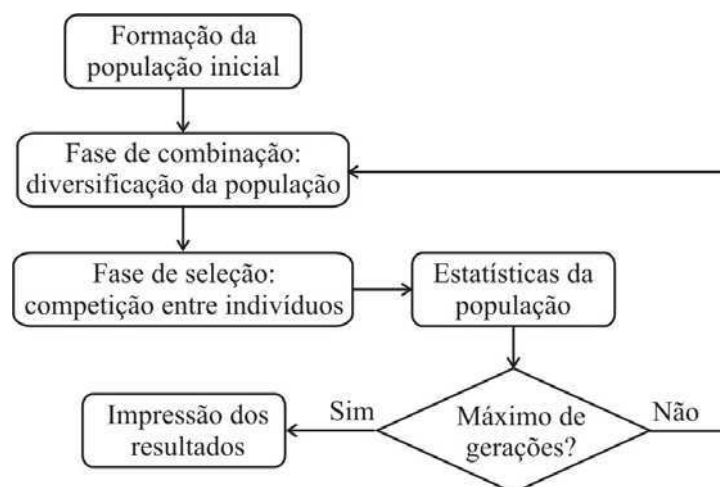


Figura 2.1 – Fluxograma das etapas da programação evolucionária

A regra de combinação opera em alguns indivíduos para produzir descendentes que aumentem o tamanho da população a cada geração. Geralmente, um algoritmo de programação evolucionária usa apenas um operador no processo de combinação, sendo o mais comumente utilizado a mutação. Este operador produz um novo indivíduo através da perturbação aleatória nas características de um indivíduo já existente. Outros dois tipos de operadores de combinação são a reprodução assexuada e a reprodução sexuada. No primeiro, um novo indivíduo é formado pela troca de posições entre características de um indivíduo existente; já no segundo, características de dois indivíduos são recombinadas para se formar um ou mais descendentes.

A regra de seleção é usada para determinar quais indivíduos de uma geração irão passar para a próxima; em regra, os mais bem adaptados. O nível de aptidão de cada indivíduo é medido por sua *fitness*, definida como o valor da função objetivo para a solução nele codificada. Através de um esquema de competição, os indivíduos disputam entre si e aqueles com maior número de vitórias passam para a próxima geração. Para que a otimização ocorra, o esquema de competição deve ser tal que as melhores soluções tenham maior chance de sobrevivência. Entretanto, deve haver uma pequena probabilidade de que indivíduos menos adaptados passem para a próxima geração, pois, embora menos aptos no geral, podem possuir características isoladas excepcionais que ajudem a formar indivíduos melhores nas gerações seguintes.

A técnica de programação evolucionária é iterativa e o processo deve ter um critério de parada, sendo o mais usual parar após um número especificado de iterações. Não há limites de tipos de esquemas de competição e de operadores de combinação que podem ser escolhidos e nem há necessidade de que a escolha seja restrita à inspiração na natureza. Diferentemente dos algoritmos genéticos, que procuram emular com máxima fidelidade o processo de evolução no nível dos genes, a programação evolucionária

localiza-se no nível das características dos indivíduos e é baseada na relação entre pais e descendência. Além disto, nela não se tem necessariamente uma emulação fidedigna dos processos evolucionários existentes na natureza, havendo flexibilidade na formulação dos processos que irão levar os indivíduos ao ótimo do problema.

# Capítulo 3

## Implementação Computacional

### 3.1. Formulação do problema

O problema de alocação e dimensionamento das unidades geradoras em sistemas de distribuição é abordado com o objetivo de minimizar os custos de suprimento, assim denominados os custos totais para a concessionária relativos ao atendimento da carga do alimentador. Assim, dois cenários são comparados dentro de um dado horizonte de tempo:

- 1) a energia necessária para suprir as cargas e as perdas do alimentador provém unicamente da subestação e o custo de suprimento dependerá da tarifa com que a energia é comercializada;
- 2) a energia necessária para suprir as cargas e as perdas do alimentador terá uma parcela proveniente da subestação e outra dos geradores instalados, cada qual com diferentes custos associados.

A energia proveniente das unidades de geração distribuída, sendo comumente mais cara que a das grandes centrais geradoras, faz com que o segundo cenário somente seja

vantajoso se a alocação e o dimensionamento das unidades permitirem uma significativa redução das perdas do alimentador.

As potências ativa e reativa geradas por cada unidade devem permanecer dentro dos limites operacionais próprios de cada máquina. Outra restrição operativa neste tipo de problema é que a entrada dos geradores no sistema não deve provocar alterações significativas nos níveis de tensão de barra pré-existentes. Ao evitar que isto ocorra, a regulação de tensão da rede não se torna vinculada à operação dos geradores. Além disto, devem ser previstas restrições aos locais de instalação das máquinas, seja por limitações de espaço, como também por ausência de potencial de geração em determinadas barras.

Os dados dos geradores comercialmente disponíveis para instalação, com base nos quais o problema é resolvido, são: potência ativa nominal (MW), fatores de potência mínimo e máximo de operação, custo de aquisição (\$) e custo de operação (\$/MWh). Estes dados são cadastrados em um arquivo de entrada e consultados durante o processo para a obtenção do valor da função objetivo para cada possível solução considerada. O número máximo de geradores a serem instalados no alimentador é previamente estabelecido.

Uma solução do problema é o conjunto de parâmetros que possibilitem estabelecer por completo a configuração de geração distribuída no alimentador e seu programa de operação. Desta forma, consiste nos dados de cada gerador a ser instalado e número da barra de instalação correspondente, bem como o *modo operante* de cada um. O modo de operação de cada gerador a ser instalado é função dos diferentes patamares da curva de carga do alimentador. O programa de operação define as potências ativa e reativa que cada gerador deverá produzir de acordo com os diferentes níveis de carregamento do sistema ao longo do dia.

A entrada em operação dos geradores implicará em custos de aquisição e de instalação, a parcela considerada fixa nos custos totais, e em custos operacionais que, de forma simplificada, são proporcionais à quantidade de potência ativa gerada pela máquina. A operação das unidades terá impacto sobre os fluxos ativo e reativo nas linhas do sistema, impacto este que poderá ser benéfico para a rede, a depender dos locais escolhidos para alocação e do programa de operação dos geradores instalados.

Uma configuração adequada da geração distribuída poderá render a diminuição das perdas totais no alimentador. Assim, a diminuição da energia perdida no atendimento à carga pode compensar os custos mais elevados da produção local de energia. Na avaliação de cada solução, os custos de suprimento do cenário codificado no indivíduo serão comparados com os custos do cenário atual, no qual não há participação de geração distribuída. A solução ótima é aquela em que a redução dos custos de suprimento é máxima.

## **3.2. Método de Solução Proposto**

### **3.2.1. Modelos de Alimentador e de Carga**

O modelo de alimentador de distribuição adotado é o esquematizado na Figura 3.1, com possibilidade de existência de carga e de geração em suas barras, conforme sugerido em Souza et al. (2005). Cada trecho é caracterizado pelas seguintes informações: barra de origem, barra de destino, impedância por unidade de comprimento, comprimento, potência aparente instalada e fator de potência da carga. O modelo adotado para a representação das cargas é o de potência constante.

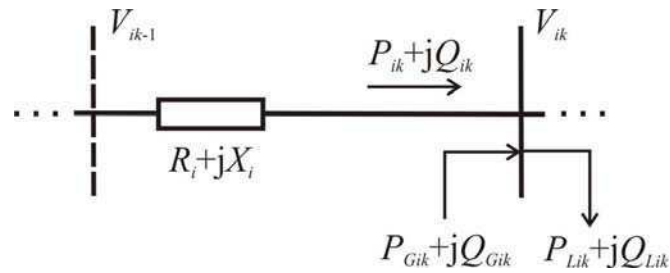


Figura 3.1 – Modelo do  $i$ -ésimo trecho de um alimentador

A variação da carga do alimentador ao longo do dia é considerada mediante a curva de duração de carga segmentada, como definida em Souza et al. (2002). Este tipo de curva caracteriza-se por níveis de demanda diária do alimentador e por suas correspondentes durações. Geralmente, três níveis de carga são considerados: de pico, intermediário e leve; entretanto, dois e quatro níveis também são utilizados. A razão entre o valor de potência aparente (ou ativa) em um determinado patamar da curva e a potência aparente (ou ativa) total instalada no alimentador indicará o seu fator de demanda em cada patamar. Este fator é aplicado a todas as barras, considerando-se, portanto, um fator de diversidade unitário.

Na Figura 3.1,  $V_{ik}$  é o módulo da tensão na barra  $i$  durante o  $k$ -ésimo patamar da curva de duração de carga segmentada do alimentador;  $R_i + jX_i$  representa a resistência e a reatância do trecho  $i$ ; por fim,  $P_{ik} + jQ_{ik}$  representa o fluxo de potência ativa e reativa ao final do trecho  $i$  durante o  $k$ -ésimo patamar da curva segmentada. Para o cálculo do fluxo de carga, é utilizado o método da soma de potência modificado proposto por Souza et al. (2005). Segundo o modelo, em cada barra  $i$  do alimentador e a cada patamar  $k$  da sua curva de duração de carga segmentada, podem coexistir carga ( $P_{L_{ik}} + jQ_{L_{ik}}$ ) e geração de potência ( $P_{G_{ik}} + jQ_{G_{ik}}$ ). A barra da subestação é a barra de balanço do alimentador, enquanto que todas as demais, inclusive aquelas em que existem geradores, são barras do tipo PQ, com potências ativa e reativa especificadas e tensão a determinar.



As cargas ativa ( $P_{Lik}$ ) e reativa ( $Q_{Lik}$ ) da barra  $i$  durante o  $k$ -ésimo patamar da curva de duração de carga segmentada são expressas do seguinte modo:

$$P_{L_{ik}} = S_i^{\text{nom}} fd_k fp_{L_i} \quad (3.1)$$

e

$$Q_{L_{ik}} = S_i^{\text{nom}} fd_k \text{sen}(\arccos(fp_{L_i})), \quad (3.2)$$

em que  $S_i^{\text{nom}}$  é a potência aparente instalada na barra  $i$  e  $fd_k$  e  $fp_{L_i}$  são, respectivamente, o fator de demanda do alimentador no  $k$ -ésimo patamar e o fator de potência da barra  $i$ . A escolha deste modelo para a carga baseou-se no fato de que, na maioria dos alimentadores, não há disponíveis os registros exatos de demanda ativa e reativa em cada uma das barras, mas sim, a potência nominal do transformador instalado. Por outro lado, este tipo de medição é realizado na subestação, na saída do alimentador, permitindo o cálculo do fator de demanda do mesmo.

### 3.2.2. Modelo de Gerador

O gerador é modelado como uma carga negativa constante. Uma dada unidade geradora instalada na barra  $i$  é caracterizada por uma potência ativa nominal ( $P_{G_i}^{\text{nom}}$ ) e limites máximo ( $fp_{G_i}^{\text{max}}$ ) e mínimo ( $fp_{G_i}^{\text{min}}$ ) de fator de potência de operação. Ao injetar no sistema uma potência ativa ( $P_{G_{ik}}$ ), a potência reativa ( $Q_{G_{ik}}$ ) gerada por esta unidade deve ser tal que:

$$Q_{G_{ik}}^{\text{min}} \leq Q_{G_{ik}} \leq Q_{G_{ik}}^{\text{max}}, \quad (3.3)$$

sendo

$$Q_{G_{ik}}^{\text{min}} = P_{G_{ik}} \cdot \text{tg}(\arccos(fp_{G_i}^{\text{max}})) \quad (3.4)$$

e

$$Q_{G_{ik}}^{\max} = P_{G_{ik}} \cdot \text{tg}(\arccos(\text{fp}_{G_i}^{\min})). \quad (3.5)$$

Ou seja, para cada valor de potência ativa injetada pelo gerador, haverá um intervalo de potência reativa dentro do qual a máquina poderá operar em regime permanente.

Para enquadrarem-se à natureza discreta do método de otimização escolhido, os intervalos de potências capazes de serem geradas por cada unidade são divididos em níveis discretos, conforme é esquematizado na Figura 3.2. Assim, tem-se:

$$P_{G_{ik}} = c_P \frac{P_{G_i}^{\text{nom}}}{n_P} \quad (3.6)$$

e

$$Q_{G_{ik}} = Q_{G_{ik}}^{\min} + c_Q \frac{(Q_{G_{ik}}^{\max} - Q_{G_{ik}}^{\min})}{n_Q}, \quad (3.7)$$

sendo o índice de geração ativa ( $c_P$ ) e o índice de geração reativa ( $c_Q$ ), números inteiros localizados entre 0 e  $n_P$  e entre 0 e  $n_Q$ , respectivamente. Os números  $n_P$  e  $n_Q$  são inteiros previamente definidos para discretizar os intervalos de geração. Quanto maiores estes números, mais exata é a solução, porém, maior o esforço computacional.

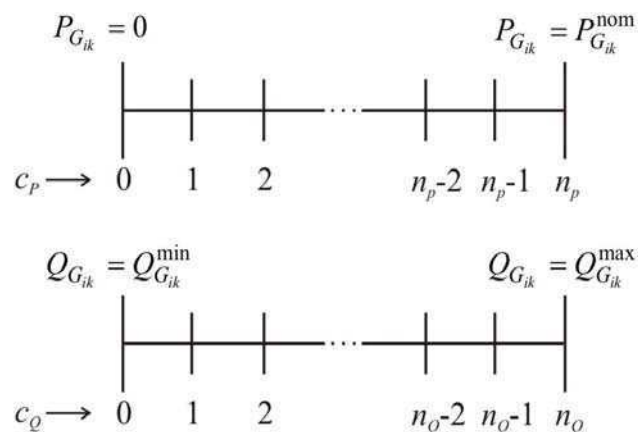


Figura 3.2 – Discretização das potências ativa e reativa geradas

### 3.2.3. Codificação da Solução

O código de uma solução completa, denominado de *indivíduo*, deve conter as seguintes informações: número da barra de instalação, tipo de gerador e índices de geração ativa e reativa em cada um dos patamares da curva segmentada. Este conjunto de informações se repete no indivíduo para cada um dos geradores que se cogita instalar. As informações são organizadas em partes distintas do indivíduo, denominadas de *características*. Um exemplo de indivíduo é mostrado na Figura 3.3, para o caso de uma curva com três patamares e com até dois geradores instalados. Esse indivíduo possui cinco características que se aplicam a cada um dos geradores: barra, tipo e os três pares de índices de geração ativa e reativa para cada um dos patamares da curva segmentada.

Conforme a Figura 3.3, o número da barra de instalação e o tipo de gerador são codificados no indivíduo através de números inteiros. Se as barras são identificadas por números inteiros seqüenciais, o valor da característica *barra* é o próprio número da barra em que o gerador deve ser instalado. Se a identificação das barras é alfanumérica, o valor da característica *barra* é uma identificação indireta. Ou seja, *barra* mapeia as barras do alimentador. A característica *tipo* funciona como uma chave de acesso à tabela de dados técnicos e de custos associados das unidades comercialmente disponíveis. Assim, *tipo* é um armazenamento compacto de todos os dados associados ao gerador que se pretende instalar, aos quais a rotina de otimização tem acesso mediante uma consulta simples.

		alto		médio		baixo		
32	2	5	4	4	4	3	2	gerador 1
81	4	5	5	4	3	0	2	gerador 2
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
barra	tipo	$c_p$	$c_Q$	$c_p$	$c_Q$	$c_p$	$c_Q$	

Figura 3.3 – Exemplo de indivíduo da população

Uma vez escolhidos os geradores e definidos seus pontos de instalação, resta saber como eles devem operar. Isto significa ter resposta para a seguinte questão: quais as potências ativa e reativa a serem despachadas por cada gerador nos diferentes patamares da curva segmentada. Esta informação é codificada através dos índices de geração ativa e reativa, existindo um par deles para cada um dos patamares. Este par é considerado uma única característica do indivíduo, de forma que os processos de criação de novos indivíduos, tal como a mutação, operam nos dois índices simultaneamente. Os índices são ordenados daqueles referentes ao patamar de carga pesada para aqueles referentes ao de carga leve, e o conjunto completo destas características é o chamado programa de operação do gerador.

De forma geral, o número de características ( $n_c$ ) de cada indivíduo é:

$$n_c = n_g^{\max} (2 + n_l), \quad (3.8)$$

em que  $n_g^{\max}$  é o número máximo de geradores que se cogita instalar e  $n_l$  é o número de patamares da curva segmentada.

#### 3.2.4. Função *Fitness*

A *fitness* de cada indivíduo é determinada pela redução dos custos de suprimento quando o cenário de geração distribuída nele codificado é comparado com a situação atual do alimentador. A função *fitness* é dada por:

$$f = C_T^A - C_T^D - \lambda_v P_v. \quad (3.9)$$

A primeira parcela, a qual representa o custo de suprimento da carga antes da instalação dos geradores, é expressa do seguinte modo:

$$C_T^A = n_d C_S \sum_{k=1}^{n_l} P_{S_k}^A \Delta t_k, \quad (3.10)$$

em que  $n_d$  é o número de dias do horizonte de estudo;  $C_S$  é o custo da energia proveniente da subestação (\$/MWh);  $n_l$  é o número de patamares da curva segmentada;  $P_{S_k}^A$  é a potência ativa na saída da subestação durante o  $k$ -ésimo patamar da curva segmentada, antes da inclusão dos geradores (MW); e  $\Delta t_k$  é a duração do  $k$ -ésimo patamar (h).

O custo de suprimento depois da alocação dos geradores, que corresponde à segunda parcela da equação (3.9), é fornecido pela seguinte expressão:

$$C_T^D = n_d C_S \sum_{k=1}^{n_l} P_{S_k}^D \Delta t_k + \sum_{i \in \Omega_G} [n_d C_{G_i}^{op} \sum_{k=1}^{n_l} (P_{G_{ik}} \Delta t_k) + C_{G_i}^{aq}], \quad (3.11)$$

onde  $P_{S_k}^D$  é a potência ativa na saída da subestação durante o  $k$ -ésimo patamar, depois da inclusão dos geradores (MW);  $\Omega_G$  é o conjunto de barras onde existem geradores instalados;  $P_{G_{ik}}$  é a potência ativa gerada pela  $i$ -ésima unidade durante o patamar  $k$ ;  $C_{G_i}^{op}$  é o custo de operação do  $i$ -ésimo gerador instalado e  $C_{G_i}^{aq}$  o seu custo de aquisição e instalação.

Por fim, a última parcela da equação (3.9) é uma função de penalidade que se aplica àquelas soluções em que a entrada em operação dos geradores causa uma variação de tensão nas barras de geração maior que uma certa tolerância especificada, em todos os patamares da curva segmentada. A adição desta função de penalidade visa favorecer configurações de geração distribuída que resultam em baixo impacto sobre a regulação de tensão do alimentador. Com todas as unidades operando simultaneamente, procura-se garantir que a tensão em cada uma das barras de geração variará até um certo limite máximo, relativamente ao valor de tensão encontrado na mesma barra antes da

entrada em operação simultânea das unidades. Desta forma, sempre que os geradores forem desligados, os ajustes de tapes dos transformadores de distribuição e também do transformador da subestação não necessitarão ser reajustados.

Na função de penalidade adotada, enquanto  $\lambda_v$  é um fator de conversão da penalidade em custo operativo (\$),  $P_v$  é um valor proporcional às violações da tolerância, fornecido por:

$$P_v = \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{i \in \Omega_G} \xi_{ik} . \quad (3.12)$$

Na equação (3.12),  $\xi_{ik}$  é dado por:

$$\xi_{ik} = 0, \quad \text{caso } \left| \frac{V_{ik}^D}{V_{ik}^A} - 1 \right| \leq \frac{l_v}{100} \quad (3.13)$$

ou

$$\xi_{ik} = \left| \frac{V_{ik}^D}{V_{ik}^A} - 1 \right|, \quad \text{caso } \left| \frac{V_{ik}^D}{V_{ik}^A} - 1 \right| > \frac{l_v}{100}, \quad (3.14)$$

em que  $V_{ik}^D$  e  $V_{ik}^A$  são, respectivamente, o módulo da tensão na  $i$ -ésima barra de geração durante o  $k$ -ésimo patamar da curva depois e antes da instalação de todas as unidades na rede; e  $l_v$  é o limite permitido para a variação relativa destas tensões (%).

### 3.2.5. Dados de Entrada

As informações necessárias ao algoritmo estão organizadas em cinco arquivos de entrada, conforme descritos a seguir:

- *gd\_alim.txt* (características dos trechos do alimentador): barra-origem, barra-destino, resistência e reatância por unidade de comprimento ( $\Omega/\text{km}$ ), comprimento (km), potência aparente instalada na barra destino (kVA), fator de potência da carga

- (quando individualizado por barra) e indicador de possibilidade de instalação de unidade geradora na barra destino;
- *gd\_curvaseg.txt* (dados da curva de carga segmentada do alimentador): número do patamar, valor de potência aparente do patamar (MVA) e instante final do patamar (h), considerando-se o intervalo iniciado a 0 h e finalizado às 23 h;
  - *gd\_gerais.txt* (parâmetros gerais do alimentador): tensão nominal da subestação (kV), fator de multiplicação da carga, custo da energia proveniente da subestação (\$/MWh), número máximo de geradores a serem instalados; fator de potência da carga (quando considerado igual em todas as barras), limites de variação de tensão nas barras de carga e nas barras de geração (%) e horizonte de estudo (anos);
  - *gd\_lib.txt* (cadastro dos tipos de geradores comercialmente disponíveis): número indicativo do tipo de gerador, potência ativa nominal (MW), fatores de potência mínimo e máximo de operação, custo de aquisição e instalação (\$) e custo operacional (\$/MWh);
  - *gd\_msppe.txt* (parâmetros do método da soma de potência e do algoritmo de programação evolucionária): número máximo de iterações e tolerância do MSP, número de divisões dos intervalos de geração ativa ( $n_p$ ) e reativa ( $n_Q$ ), número de indivíduos da população, número de gerações e número de oponentes para competir com cada indivíduo na fase de seleção.

### 3.2.6. Desenvolvimento do Algoritmo Proposto

A seguir, são descritas as principais etapas que compõem o algoritmo proposto para a alocação e dimensionamento das unidades geradoras utilizando a programação evolucionária como técnica de otimização.

*Entrada de dados.* O algoritmo inicia-se com a aquisição das informações contidas nos cinco arquivos de entrada. Estas informações são extraídas de cada arquivo e armazenadas em variáveis, vetores e matrizes que serão utilizados no decorrer do método.

*Formação da população inicial.* O número de características de cada indivíduo depende do número máximo de geradores a serem instalados e do número de níveis da curva segmentada, conforme a equação (3.8). Para cada gerador, as seguintes características se repetem: número da barra de instalação, tipo do gerador e índices de geração ativa e reativa em cada um dos patamares da curva de carga segmentada.

A barra de instalação é codificada no indivíduo por um número inteiro e, na formação da população inicial, é escolhida aleatoriamente dentre os números das barras em que é possível a instalação de geradores, segundo informação contida no arquivo de entrada *gd\_alim.txt*. Esta seletividade na escolha dos valores possíveis para a formação desta característica favorece o melhor desempenho do algoritmo, visto que evita a má formação de indivíduos (códigos de soluções inactíveis). O tipo de gerador também é codificado por meio de um número inteiro, de acordo com o número de geradores comercialmente disponíveis que foram cadastrados no arquivo de entrada *gd\_lib.txt*. Na população inicial, o número do tipo de gerador também é escolhido aleatoriamente apenas dentro do conjunto de opções cadastradas.

Por fim, o par de índices de geração ativa e reativa de cada patamar é tratado como uma única característica do indivíduo. Para a formação dos pares de índices, inicialmente são formados dois conjuntos de números inteiros, sendo a quantidade de elementos de cada um igual ao número de patamares da curva segmentada. Os elementos do primeiro conjunto são escolhidos aleatoriamente entre 0 e o número de divisões do intervalo de geração ativa ( $n_P$ ), enquanto que os do segundo são escolhidos também aleatoriamente, mas dentro do intervalo entre 0 e o número de divisões do intervalo de



geração reativa ( $n_Q$ ). Em seguida, os elementos de cada conjunto são ordenados de forma decrescente. Finalmente, o primeiro elemento do primeiro conjunto será o índice de geração ativa ( $c_P$ ) do patamar de carga pesada, enquanto que o primeiro elemento do segundo conjunto, o índice de geração reativa ( $c_Q$ ) do mesmo patamar. Assim procede-se sucessivamente, até que os últimos elementos de ambos os conjuntos irão formar os índices de geração ativa e reativa do patamar de carga leve.

Segundo esta estratégia, o índice de geração ativa de um patamar será, no máximo, igual ao do patamar imediatamente inferior, o mesmo acontecendo com o índice de geração reativa. Tendo em vista que, quanto maiores os índices de geração ativa e reativa de um gerador, maiores os valores de potência ativa e reativa, respectivamente, injetados na rede, o uso desta estratégia na criação das características que formam o programa de operação de um gerador garante que as potências ativa e reativa injetadas pela unidade são sempre proporcionais ao nível de carregamento do alimentador. Ou seja, não há possibilidade de um dado gerador injetar mais potência ativa ou reativa quando o alimentador estiver menos carregado.

*Fase de combinação.* O operador de combinação utilizado é a mutação. A cada geração, certos indivíduos da população são selecionados aleatoriamente para sofrer mutação e gerar novos indivíduos, formando, ao final da fase, uma população aumentada. A porcentagem de indivíduos selecionados para sofrer mutação diminui à medida que o processo avança. Na primeira quinta parte das gerações, 100% dos indivíduos geram mutantes; na segunda quinta parte, 80% da população é selecionada para sofrer mutação; e assim continuamente, até que na última quinta parte, apenas 20% da população é selecionada. Este procedimento visa aumentar o grau de homogeneidade da população à medida que se processa a evolução. Inicialmente, a mutação assume o papel de diversificadora da população, responsável pela exploração das várias regiões do espaço de

busca. Entretanto, ao longo das gerações, ela assume outro caráter: o de perturbadora do processo, levando o algoritmo a pesquisar soluções fora da sua tendência de evolução.

Para gerar um mutante, cada indivíduo selecionado tem uma de suas características escolhida aleatoriamente. A mutação ocorre com a substituição do valor atual da característica selecionada por um outro valor também tomado de forma aleatória, mas dentro do conjunto de valores factíveis da característica. Esta estratégia procura evitar a má formação de indivíduos, ou seja, que codifiquem soluções inactíveis. Quando a característica a sofrer mutação for a operação de um gerador em um dos patamares, os índices de geração ativa ( $c_P$ ) e reativa ( $c_Q$ ) são substituídos simultaneamente, visto que são partes da mesma característica. O novo valor do índice de geração ativa da característica que sofre mutação é tomado aleatoriamente entre os valores do mesmo índice nas características imediatamente superior e inferior. O mesmo acontece para o índice de geração reativa. Desta forma, continua respeitada a proporcionalidade existente entre as potências geradas e o nível de carregamento do alimentador.

*Fase de seleção.* O esquema de seleção adotado foi a competição. A cada indivíduo da população aumentada ao fim da fase de combinação é atribuído o valor de sua *fitness*, conforme indicada na equação (3.9). Inicialmente, o custo de suprimento atual do alimentador é calculado, desconsiderando-se a instalação de qualquer gerador. Este custo é armazenado por ser uma informação comum ao cálculo da *fitness* de toda a população e é obtido pelo cálculo do fluxo de potência do alimentador original através do método da soma de potência. Em seguida, a configuração de geração distribuída codificada no indivíduo é implementada no alimentador. Ou seja, os tipos correspondentes de geradores são instalados nas barras indicadas, cada qual com um dado programa de operação definido. Já é possível, então, determinar o custo de aquisição associado a cada máquina.

Definida a configuração de geradores, o método da soma de potência é utilizado para calcular o fluxo de carga em cada um dos patamares da curva segmentada. A cada cálculo, as cargas das barras são alteradas, assim como as potências ativa e reativa injetadas no sistema por cada gerador instalado. As informações necessárias ao cálculo da segunda parcela da equação (3.9) são coletadas ao final do cálculo de fluxo de carga para cada patamar. Adicionalmente, para o cálculo da função de penalidade, as tensões nas barras de geração em cada patamar são comparadas com os valores existentes na configuração sem geradores. A determinação da função objetivo de cada indivíduo é realizada por meio de um módulo independente do programa principal, o qual recebe destas as informações necessárias e utiliza o método da soma de potência para retornar o correspondente valor da *fitness* através do cálculo de uma expressão estabelecida para a mesma. Desta forma, há uma flexibilidade na escolha da expressão da função objetivo a ser otimizada, assim como também há uma maior facilidade em implementar eventuais modificações nos critérios de adaptabilidade e nas funções de penalidade, sem que sejam necessárias modificações diretas no programa principal.

Determinado o valor da *fitness* de cada indivíduo, cada um deles irá competir com um certo conjunto de oponentes escolhidos aleatoriamente dentro da população aumentada. Este conjunto tem o número de elementos definido no arquivo de entrada *gd\_msppe.txt*. A competição entre um indivíduo e cada um de seus oponentes se dá na forma de uma comparação simples de suas aptidões. Cada vez que a *fitness* do indivíduo for maior que a do oponente, o primeiro receberá um ponto de vitória. Ao final, os indivíduos com mais pontos serão selecionados para passar à próxima geração. Este esquema, apesar de simples, garante dois aspectos interessantes para o processo de evolução. Primeiramente, o melhor indivíduo da população aumentada passará certamente para a próxima geração, ou seja, existe *elitismo* implícito no processo. Adicionalmente,

existe uma chance, embora pequena, de que um indivíduo com *fitness* pequena passe para a geração seguinte, em detrimento de outros mais bem adaptados. Isto decorre da aleatoriedade na escolha dos oponentes e contribui para o bom desempenho do processo, uma vez que, embora menos aptos no geral, estes indivíduos podem possuir características isoladas excepcionais que ajudem a formar indivíduos melhores nas gerações seguintes. Ao final da fase de seleção, a população volta a ter o número de indivíduos que tinha ao início da fase de combinação.

*Estatísticas.* Ao final de cada geração, são armazenadas três informações: o menor e o maior valores de *fitness* encontrados, além do seu valor médio na população. O acompanhamento das estatísticas possibilita verificar a dinâmica de convergência do processo, como também em que geração a solução ótima apareceu na população. O critério de parada escolhido é o número de gerações, mantendo-se o número de indivíduos da população constante ao final de cada uma delas.

# Capítulo 4

## Apresentação e Análise dos Resultados

Neste capítulo, é avaliado o método proposto para a análise de viabilidade econômica da implantação de geração distribuída. Como caso de aplicação, é utilizado um sistema de distribuição real, através do qual é possível analisar o desempenho do algoritmo de otimização baseado em programação evolucionária.

### 4.1. Unidades Geradoras

Na Tabela 4.1 são apresentadas as características das unidades geradoras disponíveis para instalação. Os geradores são diferenciados entre si não pela tecnologia ou fonte primária utilizada na geração, mas sim por um conjunto específico de dados que irá caracterizar o chamado *tipo* do gerador: sua potência ativa nominal (MW), seus fatores de potência máximo e mínimo de operação, todos os custos relacionados à aquisição e à instalação do equipamento (\$) e os seus custos operacionais (\$/MWh), os quais são considerados diretamente proporcionais à energia ativa gerada.

Tabela 4.1 – Dados dos geradores disponíveis para instalação

Tipo	$P_{G_i}^{nom}$ (MW)	$pf_{G_i}^{min}$	$pf_{G_i}^{max}$	Aquisição (\$)	Operação (\$/MWh)
1	0,20	0,80	0,98	35.000,00	75,00
2	0,30	0,80	0,98	45.000,00	72,50
3	0,40	0,80	0,98	52.000,00	72,50
4	0,60	0,80	0,98	61.000,00	70,00
5	0,80	0,80	0,98	76.000,00	70,00

O custo total associado a um tipo  $i$  de unidade geradora ( $C_i^T$ ) é composto por uma parcela fixa e outra variável, esta proporcional à potência ativa gerada ( $P_{G_{ik}}$ ):

$$C_i^T = a_i + b_i \cdot P_{G_{ik}} . \quad (4.1)$$

A parte variável deve contemplar todos os custos associados à operação da unidade, tais como fonte combustível e manutenção periódica, os quais tendem a ser maiores quanto mais próxima do valor nominal for a potência gerada pela máquina.

## 4.2. Alimentador de 168 Barras

Como cenário para estudo da aplicação do método, foi utilizado um alimentador pertencente ao sistema de distribuição em 13,8 kV da Companhia Energética de Alagoas (CEAL). O alimentador escolhido apresenta grande extensão e elevado índice de perdas, o que torna potencialmente atrativa a alocação de unidades geradoras. Os dados relativos a cada um dos trechos do alimentador utilizado encontram-se em anexo.

Para este alimentador, foi considerado que o custo da energia proveniente da subestação é de \$60,00/MWh e que todas as cargas possuíam fator de potência igual a 0,85. Em cada barra, seja de carga ou de geração, a maior variação relativa de tensão permitida com a entrada em operação dos geradores é de 10%. Foi previamente estabelecido que até dois geradores poderiam ser instalados no alimentador, escolhidos

entre aqueles apresentados na Tabela 4.1. O horizonte de retorno considerado para o investimento é de cinco anos, portanto, esse é o período para o qual a redução de perdas será contabilizada.

Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros utilizados na programação evolucionária. O fator de conversão  $\lambda_v$  foi obtido por meio de sucessivas execuções do algoritmo, de forma que as três parcelas da equação (3.9) mantivessem a mesma ordem de grandeza. Seu valor pode ser ajustado de forma a dar maior ou menor importância às violações dos limites de variação de tensão na busca da melhor solução.

Tabela 4.2 – Parâmetros do método de otimização

Número de indivíduos	100
Número de gerações	200
Número de oponentes por indivíduo	10
Fator de conversão, $\lambda_v$ (\$)	$3,5 \cdot 10^5$
Divisões do intervalo de ativos, $n_p$	5
Divisões do intervalo de reativos, $n_o$	5

A curva de carga segmentada escolhida para o alimentador possui três patamares, como especificado na Tabela 4.3. Os níveis são uma representação aproximada da carga total do alimentador, desconsiderando-se as variações menos acentuadas ao longo do dia. Assim, três horários são estabelecidos: de carga pesada, média e leve. Considerando-se fator de diversidade unitário, a curva de carga segmentada registrada na saída da subestação é utilizada como modelo para todas as barras de carga do alimentador. Esta simplificação não representa uma limitação do método proposto, mas é uma forma de se contornar a dificuldade comumente encontrada de se dispor da curva de carga própria de cada carga do alimentador.

Tabela 4.3 – Níveis da curva de duração de carga segmentada

<b>Carga</b>	<b>Nível (%)</b>	<b>Pot. Subestação (MVA)</b>	<b>Duração (h)</b>
Pesada	90	8,75	5,8
Média	70	6,80	10,0
Leve	50	4,86	8,2

### 4.3. Resultados Obtidos

Na Tabela 4.4 é apresentada a configuração de geração distribuída para o alimentador fornecida como solução final pelo algoritmo proposto. Na Tabela 4.5 é apresentado o programa de operação dos geradores instalados, em cada um dos patamares da curva de carga segmentada. Os valores de potência aparente na saída da subestação em cada um dos patamares de carga indicados na Tabela 4.5 são aqueles obtidos por meio do fluxo de carga. Os valores de fluxo aparente que saem da subestação em cada um dos horários de carga (pesada, média, leve) são de 8,78 MVA, 6,24 MVA e 4,76 MVA. Desta forma, a operação de cada gerador variará de acordo com o valor de potência aparente medido na saída da subestação, conforme especificado pelos intervalos apresentados na tabela.

Tabela 4.4 – Configuração de geração distribuída proposta

<b>Gerador</b>	<b>Barra</b>	<b>Tipo</b>
1	166	2
2	138	4

Tabela 4.5 – Programa de operação dos geradores por patamar de carga

<b>Carga</b>	<b>Pot. Subestação (MVA)</b>		<b>Gerador</b>	<b>Geração</b>		<b>Fator de Potência</b>
	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>		<b>(MW)</b>	<b>(Mvar)</b>	
Pesada	6,24	9,72	1	0,30	0,22	0,80
			2	0,60	0,45	0,80
Média	4,76	6,24	1	0,30	0,22	0,80
			2	0,60	0,45	0,80
Leve	0,00	4,76	1	0,00	0,00	-
			2	0,36	0,27	0,80



De acordo com a solução obtida para o problema, nos dois horários de maior demanda (pesado e médio), os dois geradores instalados operarão em plena carga e com fator de potência mínimo. Isto se deve, principalmente, ao elevado nível de carregamento do alimentador e ao fato de que a injeção tanto de ativos quanto de reativos nas barras finais do alimentador auxiliam na redução de suas perdas totais. Em carga leve, prevê-se que o gerador 1 seja desligado e que o gerador 2 passe a operar com 60% de sua capacidade nominal, ainda com fator de potência mínimo.

Na Tabela 4.6 é possível verificar a influência da entrada em operação dos geradores sobre a tensão em suas barras e sobre as demais barras do alimentador. Já era esperado o aumento nos níveis de tensão quando da operação das unidades instaladas. Esta variação, entretanto, relativamente aos níveis previamente existentes nas barras de geração, não ultrapassa o limite pré-determinado de 10% em nenhum dos patamares de carga. Isto indica que o fator utilizado para penalizar aquelas soluções que violam os limites de variação de tensão foi bem ajustado para o caso em questão.

Tabela 4.6 – Reflexo da operação dos geradores sobre níveis de tensão

Carga	Barra	Tensão (p.u.)		Variação (%)	N° de Barras com Violação de Tensão (Antes - Depois)
		Antes	Depois		
Pesada	166	0,74	0,81	9,91	120 – 102
	138	0,75	0,83	9,97	
Média	166	0,81	0,88	7,47	85 – 59
	138	0,82	0,89	7,63	
Leve	166	0,88	0,90	2,30	55 – 11
	138	0,88	0,91	2,74	

O reflexo da instalação dos geradores sobre as perdas do alimentador em cada um dos patamares de carga pode ser observado na Tabela 4.7. É possível verificar uma redução considerável do índice de perdas ativas do alimentador, principalmente nos patamares de maior carga. Este índice é calculado pela relação entre o valor das perdas ativas do alimentador e a potência ativa calculada na saída da subestação. Na Figura 4.1 é

apresentado um comparativo entre as perdas no alimentador em cada horário de carga, antes e depois da instalação dos geradores.

Tabela 4.7 – Reflexo da operação dos geradores sobre as perdas do alimentador

Parâmetros	Carga	Antes	Depois
Energia proveniente da subestação (MWh/dia)	Pesada	50,03	42,00
	Média	63,81	52,05
	Leve	35,98	32,45
Perdas de energia (MWh/dia)	Pesada	6,68	3,90
	Média	5,98	3,22
	Leve	2,22	1,64
Índice de perdas ativas (%)	Pesada	13,35	9,28
	Média	9,37	6,18
	Leve	6,19	5,04

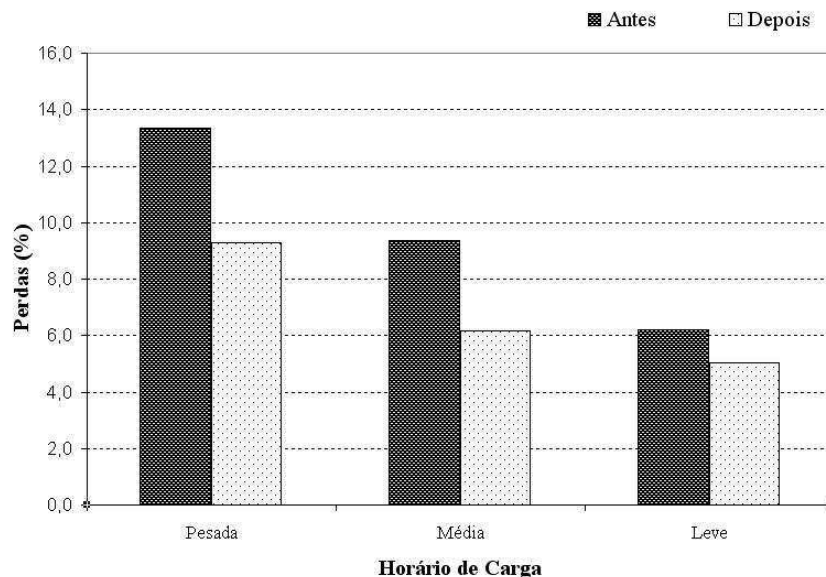


Figura 4.1 – Perdas do alimentador antes e após a instalação dos geradores

A redução no índice de perdas do alimentador se deve, basicamente, à escolha adequada dos locais de instalação das unidades geradoras, as quais funcionam como uma fonte local de energia, evitando que a potência necessária para alimentar as cargas terminais do alimentador tenha que partir da subestação e atravessar um grande número de condutores. Considerando que o custo da energia proveniente da subestação é menor que os custos operacionais dos geradores, é esta redução das perdas do alimentador,

e conseqüentemente da potência total que deve ser suprida, que torna o cenário de geração distribuída proposto uma opção economicamente competitiva. O reflexo da instalação dos geradores sobre os custos de suprimento do alimentador dentro do horizonte de cinco anos pode ser visualizado na Tabela 4.8, em que também são apresentados os custos de aquisição e instalação dos geradores. Na Figura 4.2 é apresentado um comparativo entre as parcelas que integram os custos totais envolvidos na instalação e operação das unidades geradoras dentro do horizonte de cinco anos.

Tabela 4.8 – Custos operacionais dentro do horizonte de estudo de cinco anos

Custos		Antes	Depois	Redução
Custos operacionais (\$)	Pesada	$5,48.10^6$	$5,28.10^6$	$2,00.10^5$
	Média	$6,99.10^6$	$6,86.10^6$	$1,30.10^5$
	Leve	$3,94.10^6$	$3,93.10^6$	$0,10.10^5$
Custos de aquisição e instalação (\$)		0,00	$1,06.10^5$	$-1,06.10^5$
<b>Total (\$)</b>		<b><math>16,41.10^6</math></b>	<b><math>16,17.10^6</math></b>	<b><math>2,40.10^5</math></b>

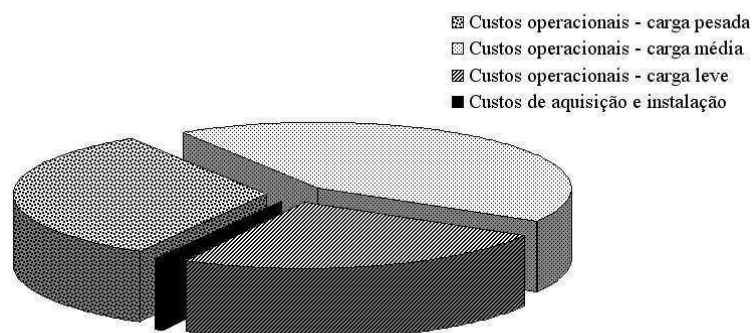


Figura 4.2 – Comparativo entre os formadores do custo total da geração distribuída

Por fim, a instalação dos geradores conforme configuração observado na Tabela 4.4 e seguindo o programa de operação indicado na Tabela 4.5 traduz-se em considerável redução das perdas totais do alimentador. Tal redução ocasiona uma diminuição da potência total a ser suprida e, mesmo considerando os custos mais elevados da energia proveniente dos geradores, proporciona uma redução dos custos de suprimento do alimentador no horizonte de estudo considerado de cinco anos.

# Capítulo 5

## Conclusões

No trabalho de pesquisa realizado para efeito de elaboração desta dissertação foi desenvolvido um método de planejamento ótimo da geração distribuída. O método permite a avaliação da viabilidade econômica da instalação de geradores em alimentadores radiais, tendo como objetivo final dimensionar as unidades geradoras e localizá-las na rede de distribuição, além de estabelecer a programação diária de operação de cada uma delas. O critério de otimalidade é a minimização dos custos necessários ao atendimento da carga. O modelo de carga empregado foi o da potência constante em diferentes horários do dia (método da segmentação da curva de carga).

O método foi testado em um alimentador real com elevado índice de perdas e obteve um bom resultado. Com a configuração de geração distribuída indicada, os custos totais de atendimento das cargas foram reduzidos em aproximadamente  $\$2,40.10^5$  no horizonte de estudo de cinco anos. O posicionamento adequado dos geradores contribuiu para uma redução significativa das perdas totais no alimentador e, conseqüentemente, da

energia total necessária para o suprimento da carga. Desta forma, mesmo com o preço da energia proveniente dos geradores sendo maior que o daquela vinda da subestação, a instalação das unidades resultou em uma economia referente aos custos de suprimento da carga dentro do horizonte de estudo de cinco anos.

A programação evolucionária apresentou-se com uma técnica adequada para a solução do problema do planejamento ótimo da geração distribuída, o qual foi tema desta dissertação. Permitiu a formulação de uma função objetivo que contemplou todos os requisitos e restrições do problema, assim como permitiu codificar no indivíduo o conjunto de parâmetros necessários para estabelecer por completo a configuração de geração distribuída no alimentador.

Os objetivos específicos do trabalho foram alcançados. De forma a reduzir o espaço de busca da solução, conhecimentos específicos do problema foram incorporados ao algoritmo de programação evolucionária, melhorando o desempenho dos processos desenvolvidos nas fases de mutação e seleção. Adicionalmente, para se chegar às versões apresentadas da codificação da solução e da função objetivo, várias opções foram analisadas durante o desenvolvimento do trabalho, escolhendo-se, ao final, aquelas que contribuíram de maneira maior para a eficiência do método. Ao final, obteve-se um método de análise da alocação de geração distribuída que pode ser aplicado a qualquer sistema radial de distribuição de energia elétrica.

As pesquisas que deram sustentação a essa dissertação abrem uma nova linha de pesquisa no âmbito local. Vários desdobramentos podem surgir tanto em termos de aprimoramento do método proposto quanto da aplicação a problemas reais. Algumas propostas para trabalhos futuros são apresentadas a seguir:

- acrescentar ao método a capacidade de considerar o crescimento da carga do alimentador dentro do horizonte de estudo para a avaliação econômica das configurações propostas de geradores, assim como a aplicação a alimentadores não-radiais, sem que ocorra aumento considerável na complexidade de codificação e solução do problema;
- estudar a implementação de novas regras para as fases de mutação e de seleção da técnica de programação evolucionária, avaliando formas mais eficientes de aumento da população e de seleção de indivíduos que contribuam para o melhor desempenho do processo;
- avaliar o impacto da representação das barras de geração como do tipo PV ou PX sobre o desempenho e a exatidão do método proposto, assim como a influência de outros tipos de representação da carga que não seja a de potência constante;
- adaptar o método proposto ou combiná-lo com outras técnicas, tais como lógica difusa, para estender sua aplicabilidade ao planejamento da geração eólica e de outras naturezas, cujos potenciais apresentem incerteza e variabilidade muito altas.

# Referências Bibliográficas

- ACKERMANN, T., ANDERSON, G. e SÖDER, L.. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, v. 57, p. 195-204, 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Cadernos temáticos ANEEL: Acesso e uso dos sistemas de transmissão e de distribuição. Brasília: ANEEL, 2005, 57p..
- BATRINU, F. et al.. New nested evolutionary programming approach for voltage control optimization with distributed generation. In: IEEE MELECON, 2004, Dubrovnik - Croácia.
- BORGES, C. e FALCÃO, D. M.. Impact of distributed generation allocation and sizing on reliability, losses and voltage profile. In: IEEE BOLOGNA POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna - Itália.
- CALDERARO, V., GALDI, V. e PICCOLO, A.. Distribution planning by genetic algorithm with renewable energy units. In: BULK POWER SYSTEM DYNAMICS AND CONTROL, 2004, Cortina d'Ampezzo - Itália. p. 375-380.
- CELLI, G. e PILO, F.. Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks. In: IEEE PICA CONFERENCE, 2001, p. 81-86.
- DORAISWAMY, T., RAVIKUMAR, R., RAMYA, A., CHARLES, S., VANDHANA, M. S. e SWARUPINI, S.. Optimal power flow solution using evolutionary programming. In: IASTED INTERNATIONAL CONFERENCE ON EUROPEAN POWER SYSTEMS, 2005, Espanha.

- DUGAN, R. C., MCDERMOTT, T. E. e BALL G. J.. Planning for distributed generation. *IEEE Industry Applications Magazine*, p. 80-88, mar./abr. 2001.
- EL-KHATTAM, W., BHATTACHARYA, K., HEGAZY, Y. e SALAMA, M. M. A.. Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 3, p. 1674-1684, ago. 2004.
- EL-KHATTAM, W., HEGAZY, Y. G. e SALAMA, M. M. A.. An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 2, p. 1158-1165, may. 2005.
- FOGEL, D. B.. An introduction to simulated evolutionary optimization. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 5, n. 1, p.3-14, jan. 1994.
- FOGEL, D. B.. What is evolutionary computation? *IEEE Spectrum*, p.26-32, fev. 2000.
- JENKINS, N.. Embedded generation. *Power Engineering Journal*, p. 145-150, jun. 1995.
- KEANE, A. e O'MALLEY, M.. Optimal Allocation of embedded generation on distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3, p. 1640-1646, ago. 2005.
- LEE, K. Y. e YANG, F. F.. Optimal reactive power planning using evolutionary algorithms: a comparative study for evolutionary programming, evolutionary strategy, genetic algorithm, and linear programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 1, p.101-108, fev. 1998.
- NARA, K., HAYASHI, Y., IKEDA, K. e ASHIZAWA, T.. Application of tabu search to optimal placement of distributed generators. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, p. 918-923.



- NARA, K.. Enabler of introducing distributed generators and its effect to power distribution systems. In: IEEE TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION, 2002, Ásia Pacífico, p. 584-589.
- PIDRE, J. C., VELASCO, J. A. M., LOPES, J. A. P. e BARBOSA, F. P. M.. Modeling of non-linear nodal admittances in load flow analysis. In: IFAC SYMPOSIUM ON POWER PLANTS AND SYSTEMS, 1992, Muchen - Alemanha.
- RAHMAN, T. K. A., RAHIM, S. R. A. e MUSIRIN, I.. Optimal allocation and sizing of embedded generators. In: NATIONAL POWER & ENERGY CONFERENCE, 2004, Kuala Lumpur - Malásia. p. 288-294.
- RAJIČIĆ, D. e DIMITROVSKI, A.. A new method for handling PV nodes in backward/forward power flow for radial and weakly meshed networks. In: IEEE PORTO POWER TECH CONFERENCE, 2001, Porto - Portugal.
- SHORT, T. A.. *Electric Power Distribution Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- SOUZA, B. A., BRAZ, H. D. M., ALBUQUERQUE, J. M. C. de e GUTTERES, J. G. G.. Fluxo de carga ótimo em sistemas de distribuição radiais com geração distribuída: método da soma de potência modificado. In: 6º ENCUESTRO DE POTENCIA, INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDAS, 2005, Uruguai.
- SOUZA, B. A., FERREIRA, H. A., LOUREIRO, R. J. A., CAVALCANTI, L. F. e LIMA, S.. Segmentação Ótima da Curva de Duração de Carga Anual. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA, 2002, Buenos Aires – Argentina.
- YURYEVICH, J. e WONG, K. P.. Evolutionary programming based optimal power flow algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 4, p.1245-1250, nov. 1999.

# **Apêndice**

## **Dados do Alimentador Utilizado no Exemplo de Aplicação**

Tabela A.1 – Dados do alimentador utilizado como exemplo de aplicação

Barra Origem	Barra Destino	R (ohms/km)	X (ohms/km)	Comprimento (km)	Potência Instalada (kVA)
0	1	0,4926	1,0358	0,0300	0,00
1	2	0,4926	1,0358	0,0700	0,00
2	3	0,4926	1,0358	0,0800	0,00
3	4	0,4926	1,0358	0,1900	0,00
4	5	0,4926	1,0358	0,0300	0,00
5	6	7,8975	2,5062	0,0150	112,50
5	7	0,4926	1,0358	0,2400	0,00
7	8	7,7998	2,6202	0,0400	150,00
7	9	0,4926	1,0358	0,0900	0,00
9	10	0,4926	1,0358	0,0300	0,00
10	11	0,4926	1,0358	0,1200	0,00
11	12	0,4926	1,0358	0,0400	0,00
12	13	0,4926	1,0358	0,0800	0,00
13	14	0,4926	1,0358	0,0800	0,00
14	15	0,4926	1,0358	0,2050	0,00
15	16	3,1264	2,3235	0,0400	0,00
16	17	3,1264	2,3235	0,0400	75,00
15	18	0,4926	1,0358	0,0750	0,00
18	19	0,4926	1,0358	0,0100	0,00
19	20	3,1264	2,3235	0,0400	0,00
20	21	3,1264	2,3235	0,0900	0,00
21	22	3,1264	2,3235	0,0500	75,00
21	23	3,1264	2,3235	0,0800	0,00
23	24	3,1264	2,3235	0,1200	0,00
24	25	7,8975	2,5062	0,1200	0,00
25	26	7,8975	2,5062	0,1600	45,00
25	27	7,8975	2,5062	0,0900	75,00
24	28	3,1264	2,3235	0,0400	112,50
28	29	3,1264	2,3235	0,0300	0,00
29	30	3,1264	2,3235	0,0800	0,00
30	31	3,1264	2,3235	0,2300	112,50
31	32	3,1264	2,3235	0,1600	0,00
32	33	3,1264	2,3235	0,0100	45,00
32	34	3,1264	2,3235	0,0800	0,00
34	35	3,1264	2,3235	0,0600	112,50
34	36	7,7998	2,6202	0,0400	45,00
29	37	7,8975	2,5062	0,2400	45,00
37	38	7,8975	2,5062	0,0500	112,50
20	39	7,8975	2,5062	0,0600	0,00
39	40	7,8975	2,5062	0,1400	0,00
40	41	7,8975	2,5062	0,0200	45,00
19	42	0,4926	1,0358	0,0300	0,00
42	43	3,1264	2,3235	0,0400	112,50
42	44	0,4926	1,0358	0,0300	0,00
44	45	0,4926	1,0358	0,0400	112,50
45	46	0,6984	2,0024	0,1200	0,00
46	47	0,6984	2,0024	0,0400	112,50
47	48	0,6984	2,0024	0,0800	0,00
48	49	3,1264	2,3235	0,2000	0,00
49	50	7,8975	2,5062	0,0300	75,00
49	51	3,1264	2,3235	0,1100	75,00
51	52	3,1264	2,3235	0,0800	45,00
52	53	3,1264	2,3235	0,0100	0,00
53	54	3,1264	2,3235	0,0400	75,00
54	55	7,8975	2,5062	0,0400	0,00

Barra Origem	Barra Destino	R (ohms/km)	X (ohms/km)	Comprimento (km)	Potência Instalada (MVA)
54	56	3,1264	2,3235	0,2800	0,00
56	57	7,8975	2,5062	0,0400	112,50
53	58	3,1264	2,3235	0,0400	0,00
58	59	3,1264	2,3235	0,1600	0,00
59	60	7,8975	2,5062	0,0400	75,00
59	61	3,1264	2,3235	0,0800	0,00
61	62	7,8975	2,5062	0,0400	150,00
61	63	3,1264	2,3235	0,2400	607,50
63	64	2,8049	2,1657	0,0550	0,00
64	65	2,8049	2,1657	0,0700	45,00
63	66	7,8975	2,5062	0,0400	112,50
66	67	5,5151	2,7124	0,0800	0,00
67	68	5,5151	2,7124	0,0550	0,00
68	69	5,5151	2,7124	0,0750	75,00
69	70	5,5151	2,7124	0,1200	0,00
70	71	5,5151	2,7124	0,1450	75,00
71	72	5,5151	2,7124	0,0500	0,00
72	73	7,8975	2,5062	0,0300	75,00
72	74	5,5151	2,7124	0,0650	112,50
67	75	5,5151	2,7124	0,2000	112,50
48	76	3,1264	2,3235	0,0400	0,00
76	77	7,7998	2,6202	0,2400	112,50
77	78	7,8975	2,5062	0,1350	112,50
76	79	0,6984	2,0024	0,0400	0,00
79	80	0,6984	2,0024	0,0200	45,00
80	81	0,6984	2,0024	0,0300	150,00
81	82	0,6984	2,0024	0,0700	0,00
82	83	7,8975	2,5062	0,1350	75,00
83	84	0,6984	2,0024	0,2000	0,00
84	85	7,8975	2,5062	0,1200	150,00
84	86	0,6984	2,0024	0,0800	75,00
86	87	0,6984	2,0024	0,0400	0,00
87	88	0,6984	2,0024	0,0200	0,00
88	89	0,4926	1,0358	0,0950	0,00
89	90	7,8975	2,5062	0,0450	112,50
90	91	7,8975	2,5062	0,0550	75,00
89	92	0,4926	1,0358	0,0950	45,00
92	93	0,4926	1,0358	0,2250	75,00
93	94	0,4926	1,0358	0,6700	45,00
94	95	0,4926	1,0358	0,0350	0,00
95	96	7,8975	2,5062	0,0500	45,00
95	97	0,4926	1,0358	0,0350	0,00
97	98	7,8975	2,5062	0,0750	225,00
98	99	0,4926	1,0358	0,0350	0,00
99	100	7,8975	2,5062	0,0400	75,00
99	101	0,4926	1,0358	0,0700	0,00
88	102	0,6984	2,0024	0,1450	0,00
102	103	7,8975	2,5062	0,1600	150,00
102	104	0,6984	2,0024	0,0150	382,50
104	105	7,7998	2,6202	0,1000	0,00
105	106	7,8975	2,5062	0,0150	75,00
105	107	3,1165	2,4063	0,0500	150,00
105	108	7,8975	2,5062	0,0950	45,00
104	109	0,6984	2,0024	0,2000	112,50
109	110	0,6984	2,0024	0,0400	0,00
110	111	7,8975	2,5062	0,1600	0,00
111	112	3,1165	2,4063	0,1450	75,00

Barra Origem	Barra Destino	R (ohms/km)	X (ohms/km)	Comprimento (km)	Potência Instalada (MVA)
110	113	7,8975	2,5062	0,1000	0,00
113	114	7,8975	2,5062	0,0400	112,50
113	115	7,8975	2,5062	0,1600	112,50
113	116	0,6984	2,0024	0,0400	45,00
116	117	0,6984	2,0024	0,0800	0,00
117	118	0,6984	2,0024	0,0400	0,00
118	119	7,7998	2,6202	0,0800	45,00
119	120	7,8975	2,5062	0,1200	45,00
118	121	0,6984	2,0024	0,0700	0,00
121	122	5,5151	2,7124	0,1300	75,00
122	123	0,6984	2,0024	0,1800	112,50
121	124	0,6984	2,0024	0,0300	75,00
124	125	0,6984	2,0024	0,1350	0,00
125	126	7,8975	2,5062	0,0400	45,00
125	127	0,6984	2,0024	0,0700	75,00
127	128	0,6984	2,0024	0,0700	0,00
128	129	7,7998	2,6202	0,0400	0,00
129	130	7,7998	2,6202	0,0400	75,00
129	131	7,7998	2,6202	0,1200	75,00
131	132	7,7998	2,6202	0,1600	75,00
132	133	7,7998	2,6202	0,0800	75,00
128	134	0,6984	2,0024	0,1600	0,00
134	135	3,1264	2,3235	0,0150	75,00
135	136	3,1264	2,3235	0,1850	0,00
136	137	3,1264	2,3235	0,0800	75,00
137	138	3,1264	2,3235	0,1300	0,00
138	139	7,8975	2,5062	0,2400	0,00
139	140	7,8975	2,5062	0,1200	112,50
140	141	5,5151	2,7124	0,1250	0,00
141	142	5,5151	2,7124	0,1500	75,00
141	143	5,5151	2,7124	0,0950	150,00
139	144	7,8975	2,5062	0,0800	0,00
144	145	7,8975	2,5062	0,0400	112,50
144	146	7,8975	2,5062	0,1200	75,00
136	147	3,1264	2,3235	0,1600	75,00
147	148	3,1264	2,3235	0,2000	112,50
148	149	3,1264	2,3235	0,2900	45,00
134	150	0,6984	2,0024	0,1800	0,00
150	151	0,6984	2,0024	0,0400	75,00
150	152	0,6984	2,0024	0,1400	0,00
152	153	0,6984	2,0024	0,0400	0,00
153	154	7,7998	2,6202	0,1000	45,00
154	155	7,7998	2,6202	0,0400	75,00
153	156	0,6984	2,0024	0,0400	0,00
156	157	0,6984	2,0024	0,0800	75,00
157	158	0,6984	2,0024	0,0400	15,00
158	159	0,6984	2,0024	0,1900	0,00
159	160	7,8975	2,5062	0,1200	30,00
159	161	0,6984	2,0024	0,1200	862,50
161	162	0,4926	1,0358	0,1200	75,00
162	163	0,4926	1,0358	0,2250	112,50
163	164	0,4926	1,0358	0,0800	600,00
164	165	0,4926	1,0358	0,0850	0,00
165	166	0,4926	1,0358	0,0650	75,00
166	167	0,4926	1,0358	0,0300	0,00