

Danielly Formiga Peixoto de Moura

Suplementação na Tarifação de Uso do  
Sistema de Transmissão de Energia  
Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos

*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

Wellington Santos Mota, Ph.D  
Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil  
Abril de 2004

---



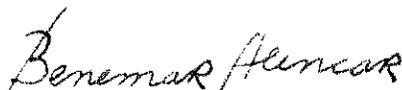
**SUPLEMENTAÇÃO NA TARIFICAÇÃO DE USO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

**DANIELLY FORMIGA PEIXOTO DE MOURA**

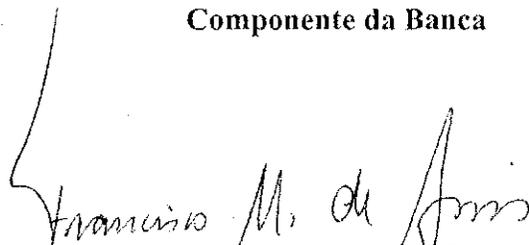
Dissertação Aprovada em 26.04.2004



**WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG**  
Orientador



**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFPB**  
Componente da Banca



**FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
Abril - 2004

Aos meus pais,  
Antonio e Maria do Socorro,  
Com muito carinho,  
DEDICO.

## Agradecimentos

Agradeço a Deus, pelas oportunidades e pelo discernimento em aproveitá-las, me conduzindo sempre a bons caminhos.

À COPELE e ao CNPq, pela oportunidade de poder realizar este trabalho.

Ao professor Wellington Santos Mota por ser um excelente orientador, além de grande incentivador e amigo, sempre disposto a me ajudar e compreender, desde os trabalhos de iniciação científica até aqui.

Ao professor Francisco Marcos de Assis, com quem tive a oportunidade de obter contribuições valiosas neste trabalho.

Aos demais professores e funcionários do Laboratório de Alta Tensão.

Aos funcionários da MINIBLIO e COPELE, especialmente Eleonôra, Ângela e Pedro.

A Valdson Simões de Jesus, que tanto colaborou, com paciência e didática, com os ensinamentos referentes à base deste trabalho.

Aos colegas de trabalho Ronimack, Rodrigo e Luciano, pela amizade, convivência e incentivo.

A Helon e Hélivio, companheiros no tema de pesquisa e com quem pude aprender bastante.

Agradecimentos especiais aos amigos Cybelle, Huga Carla, Cida, Renata, Sissi, Tanuska, Denis, Edmar, Rex, Luciana, Márcio e Paulo, pela motivação e amizade durante todo este período.

Aos meus irmãos Amanda e Jorge, por estarem sempre presentes na minha vida.

Aos demais familiares que sempre me incentivaram e torceram por mim.

E a tantos outros que participaram da realização deste trabalho, digo sinceramente,

Muito obrigada.

# Sumário

<i>Lista de Figuras</i>	viii
<i>Lista de Tabelas</i>	ix
<i>Resumo</i>	x
<i>Abstract</i>	xi
<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Breve Histórico	3
1.2 Ajuste dos Encargos para Cobertura da Receita Reconhecida	5
1.3 Revisão Bibliográfica	6
1.4 Motivação da Pesquisa	16
1.5 Contribuições da Pesquisa	17
1.6 Organização do Trabalho	17
<b>Capítulo 2 – Métodos de Otimização Utilizados: Algoritmos Genéticos e o Método Simplex</b>	<b>18</b>
2.1 Introdução aos Algoritmos Genéticos	18
2.2 Definições Básicas	21
2.3 Diferenças entre os AG's e os Métodos Clássicos	22
2.4 Aspectos Principais dos AG's	23
2.4.1 Operações Básicas: Seleção Natural, Cruzamento e Mutação	24
2.4.2 Outras Abordagens do Problema de Otimização	32
2.5 Vantagens e Desvantagens dos AG's	32
2.5.1 Estratégias Empregáveis aos Algoritmos Genéticos	33
2.6 O Método Simplex	34
2.6.1 O Problema de Programação Linear	35
2.6.2 Características do Algoritmo Simplex	35
<b>Capítulo 3- Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>37</b>
3.1 Apresentação do Problema	37
3.1.1 Matriz Sensibilidade e Fluxo de Potência DC	42
3.1.2 Cálculos das Tarifas Nodais	46
3.2 Suplementação na Tarificação do Uso do Sistema de Transmissão utilizando Algoritmos Genéticos	48
3.2.1 Variáveis do problema e Codificação	48
3.2.2 Restrições	49
3.2.3 Função objetivo e de <i>fitness</i>	49
3.2.4 Parâmetros do algoritmo genético	51

3.2.5 Implementação Computacional do AG: Simulações e Resultados	53
3.2.5.1 Suplementação utilizando AG's	54
<b>3.3 Suplementação na Tarificação do Uso do Sistema de Transmissão utilizando o Método Simplex</b>	<b>55</b>
3.3.1 Suplementação utilizando o método simplex	57
<b>3.4 Análise dos Resultados</b>	<b>58</b>
<b>Capítulo 4 - Conclusões</b>	<b>62</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>64</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo do Método da Roleta.....	25
Figura 2 – Fluxograma Básico de um AG simples.....	31
Figura 3 – Sistema de Transmissão Teste de Seis Barras.....	38
Figura 4 – Resultados do Fluxo DC para o Sistema de Transmissão Teste de Seis Barras .....	46
Figura 5 – Cruzamento entre dois indivíduos.....	52

## Lista de Tabelas

Tabela I – Dados do sistema de transmissão utilizado no exemplo numérico.....	42
Tabela II – Matriz de incidência (Matriz E).....	43
Tabela III – Matriz diagonal de admitâncias (Matriz B).....	43
Tabela IV – Matriz $\beta$ .....	44
Tabela V – Vetor $\eta$ (representa injeções líquidas de fluxo nas linhas do sistema) .....	44
Tabela VI – Resultados finais do fluxo DC.....	45
Tabela VII – Contribuições para o cálculo das tarifas (sem ajustes) por barra, devido a cada linha do sistema.....	47
Tabela VIII – Tarifas nodais sem os ajustes.....	48
Tabela IX. Exemplo de cromossomo utilizado para cálculo dos ajustes.....	49
Tabela X – Resultados obtidos com AG's.....	55
Tabela XI – Resultados obtidos com o método simplex.....	57
Tabela XII – Cálculo do selo.....	58
Tabela XIII– Tarifas nodais ajustadas através do método do selo.....	59
Tabela XIV – Tarifas nodais ajustadas (R\$/MW) utilizando minimização linear.....	59
Tabela XV – Tarifas nodais ajustadas (R\$/MW) utilizando minimização quadrática.....	60
Tabela XVI – Ajustes utilizando os vários métodos de otimização.....	60

## Resumo

Neste trabalho se utiliza Algoritmos Genéticos (AG's) nos cálculos e alocação dos ajustes das tarifas pelo uso do sistema de Transmissão de Energia Elétrica. Na técnica proposta é levado em consideração o nível de carregamento nas linhas com o intuito de oferecer uma nova maneira de estimar essa remuneração complementar na metodologia de tarifação. O método aqui apresentado mostrou-se eficiente no cálculo dos ajustes que correspondem à parcela de responsabilidade de cada usuário nos futuros investimentos da expansão do sistema. Com as tarifas de uso dos sistemas elétricos refletindo os custos acarretados por cada agente na expansão da rede e ainda a variação dos custos operacionais, os agentes serão levados a tomar decisões de investimento que coincidam com os da expansão a custo mínimo. O objetivo desta metodologia está relacionado à necessidade de se obter maior eficiência na produção e venda de energia elétrica. Para isso, os investimentos nos sistemas devem ser recuperados através dos encargos de uso do sistema. Os encargos devem ser repassados para todos os usuários, de modo que resulte em eficiência econômica e influencie na expansão ao longo prazo do sistema. Para validação do método aqui proposto, utiliza-se o simplex, largamente utilizado em problemas similares. Finalmente, foi feita uma comparação dos resultados na suplementação das tarifas entre vários métodos: minimização quadrática, minimização linear, simplex, otimização usando AG's e o método do selo (método usado atualmente).

## Abstract

This work presents an application of Genetic Algorithm (AG's) on the evaluation and allocation of tariffs settlements by the Electric Energy Transmission Systems uses. On the proposed technique, the transmission lines loading are considered in order to offer a new way to estimate supplementary revenue in the evaluation of transmission use of system charges. The presented methodology has shown to be efficient in the adjusting computation corresponding to the responsibility of each user on the expansion system futures investments. With Electric Systems use tariffs reflecting the collected and operational costs for each agent on network expansion, minimal cost strategy should be considered for this operation. The objective of this methodology is related to maximal production efficiency and electrical energy sale. So, the investment in the systems should be recovered through the use of system charges. The charges should be allocated among customers in such way it results in economic efficiency and must have influence on the long term system expansion. To validate the proposed methodology, the Simplex optimization method, widely used for similar problems, has alternatively been used. Finally, a resulting comparison among several methods was performed.

# Capítulo 1

## Introdução

Os últimos anos são marcados por grandes transformações no setor elétrico nacional, dentre as quais incluem as características administrativas e operacionais que foram modificadas consideravelmente. O antigo *Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica*, então vinculado ao *Ministério de Minas e Energia*, foi extinto e em seu lugar foi instituída a *Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)* que tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica. Foi criado o *Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)*, uma entidade de direito privado, cujo objetivo é coordenar e operar o *Sistema Interligado Nacional* que engloba aproximadamente 97% das empresas geradoras de energia do país.

Este novo modelo institucional do setor elétrico brasileiro está calcado em ambientes competitivos na geração e na comercialização de energia enquanto que a transmissão e distribuição são fortemente reguladas pela ANEEL. Um dos problemas enfrentados pelas concessionárias de Energia Elétrica, atualmente, está relacionado à necessidade de se obter uma maior eficiência na produção e venda de energia elétrica a partir da reestruturação do setor elétrico, sendo isto, impulsionado pelo aumento na competitividade por novos mercados de energia elétrica.

A expansão da oferta de energia vinha tradicionalmente seguindo um padrão ditado pelo planejamento do setor, onde os novos projetos de geração eram ordenados segundo custos marginais crescentes, aí incluídos também os custos de integração dos projetos. Com um regime de concessão por área e pouco competitivo e ainda uma sistemática de tarifação baseada no custo, o setor assistiu a um aumento significativo nos valores despendidos nos projetos mais recentes de geração dentro de um quadro de escassez de recursos para dar uma seqüência adequada aos empreendimentos iniciados.

Com o fim do conceito de área de concessão e a introdução de um novo regime de licitação para cada nova concessão, conforme estabelecido pelas leis nº 8987 e nº 9074, que introduziram também o livre acesso à rede elétrica, os parâmetros de decisão pela

atratividade de novos projetos passam a ter que *contabilizar também o custo do transporte associado ao serviço de transmissão*. Neste particular, a metodologia que estabelece o custo associado ao sistema de transmissão passa a ter um papel relevante na definição da atratividade de cada projeto e mesmo na escolha do investidor diante das possíveis alternativas a empreender, estabelecendo um novo paradigma no setor.

O sistema de transmissão de energia elétrica tem recebido uma atenção especial das empresas geradoras de energia, consumidores e fornecedores. A nova regulamentação, além de garantir a qualidade técnica dos serviços de transmissão (controle de tensão, restrições de segurança, etc.), deve também, prover retornos suficientes para compensar os investimentos da transmissão existentes e incentivos para sua expansão econômica.

Os custos da expansão do sistema de transmissão devem ser então alocados entre usuários (geradores e consumidores) através de encargos de uso do sistema de transmissão. Além de remunerar os investimentos na expansão da transmissão, operação e manutenção, esses encargos de uso deverão prover sinais econômicos eficientes para ambos usuários. Para o cálculo dos encargos de uso da transmissão e da distribuição é necessário a definição das tarifas a serem aplicadas aos diversos usuários da Rede Básica e que são calculadas com base em metodologia aprovada pela ANEEL, a metodologia Nodal –ICRP (*Invested Cost-Related Pricing*) [Berer, 1997].

Tal metodologia baseia-se no conceito de tarifas nodais, no qual cada usuário do sistema, paga encargos de uso relativos ao ponto (nó) da rede de transmissão/distribuição no qual está conectado. Assim sendo, os encargos de uso a serem pagos por um agente de geração dependerá apenas da sua localização, independentemente de quem comprará a sua energia gerada [ANEEL, 1999].

Este trabalho procura mostrar como o método de tarifação da transmissão pode influenciar decisões importantes em projetos futuros e investimentos de gerenciamento, manutenção e expansão das redes de transmissão.

## 1.1 Breve Histórico

A descrição histórica dos modelos de custos é importante na medida em que facilita a análise da evolução desses modelos, mostrando as relações existentes entre as forças econômicas, políticas e sociais e a natureza do estágio de desenvolvimento do país.

O primeiro modelo de custo instituído oficialmente para o setor elétrico, em 1934, foi o modelo histórico - com base nos custos incorridos -, por ter sido considerado o mais adequado, em face dos fatos e teorias dominantes na época. Durante quarenta e sete anos (1934-1981) este foi o único modelo a orientar a determinação de custo do setor.

Nos custos das empresas há um percentual significativo de custos institucionais, ou seja, aqueles que as empresas não podem evitar e sobre os quais não possuem qualquer gerência - como *Quota de Reserva Global de Reversão, Quota de Consumo de Combustível, Encargos Sociais não Vinculados à Folha de Pagamento e Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos* -, os quais representam aproximadamente 15% do custo total, conforme a empresa de energia. Isto ocorre porque o setor é predominantemente um monopólio, formado por empresas federais e estaduais de energia, tendo sido sempre regulado pelo governo.

Além desses custos institucionais adicionados ao custo do serviço das empresas há tributos governamentais que incidem sobre o lucro do negócio, tais como a contribuição social (8%) e o imposto de renda (25%), reduzindo a rentabilidade das empresas.

Ressalte-se que o modelo efetivamente utilizado pelas empresas do setor foi o de *custo histórico*, visto que foi defendido teoricamente como adequado e sua fundamentação convenceu o governo e as empresas do setor. Além disso, foi instituído há bastante tempo, mostrou-se suficiente num modelo de preços equalizados e era mais simples do que os outros modelos propostos. A comercialização dos serviços de transmissão, com a cobrança de um pedágio específico, é uma questão relativamente recente a nível mundial, com pouca experiência adquirida.

Ao longo do desenvolvimento metodológico no Brasil, desde os trabalhos iniciais no Grupo Misto de Acesso à Transmissão (GMAT) em 1990, foram analisadas metodologias como Custo Marginal, Selo Postal e MW-Milha. Naquela ocasião, optou-se por desenvolver uma variante da metodologia de MW-milha, que foi denominada MW-

milha estendida, atribuindo os custos de transporte pelo módulo da utilização da rede e computando-os na proporção do fluxo total e não da capacidade, o que permitia um fechamento com recuperação total dos custos.

Furnas desenvolveu e apresentou num trabalho no SNPTEE em 1993 uma metodologia denominada MW-milha Agrupado, propondo certas simplificações no trato do custo por nível de tensão do sistema.

Com a constituição do Sintrel, houve a definição de uma metodologia híbrida, que utilizava conceitos de MW-milha e fechamento de Selo Postal, denominada *Metodologia do Sintrel*.

Todas estas metodologias com base em MW-milha citadas, partem de uma abordagem ponto a ponto e atribuíam valores às transações de transmissão atreladas a uma definição do par carga-geração.

Surgiu uma proposta interessante, desenvolvida pela Cemig, que resgatou a proposta de MW-Milha Agrupado de Furnas, incrementando-a a partir de novos conceitos como o da distância elétrica equivalente e transformando a mesma para uma abordagem nodal. Esta metodologia foi aprovada no âmbito da ABRADDEE e está sendo analisada por um grupo de especialistas do setor como uma alternativa que seria inclusive aplicável tanto à rede de transmissão quanto à de distribuição.

Por outro lado, a consultora inglesa *Coopers & Lybrand*, no desenvolvimento dos trabalhos de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (RE-SEB), apresentou proposta de utilização de uma metodologia nodal denominada ICRP (*Invested Cost-Related Pricing*). As comparações realizadas até o momento não apontaram diferença de princípios nos algoritmos das metodologias da ABRADDEE e ICRP [Berer, 1997].

Porém, as crises de abastecimento e preço de petróleo e a crise de juros internacionais do início dos anos oitenta forçaram os dirigentes do setor elétrico nacional a buscarem um modelo de custo que induzisse a determinação mais efetiva de custo nos níveis de tensão de fornecimento; fornecesse um preço adequado à racionalidade na utilização da energia; proporcionasse redução nas necessidades de investimento; e reduzisse a acentuação da curva de demanda e consumo nas horas de maior consumo no sistema elétrico. O modelo julgado mais adequado para que se alcançassem estes objetivos foi o modelo marginalista (*ICRP*), por permitir que se fizessem as diferenciações necessárias.

Até os dias atuais, o setor aplica o modelo de custo, obtendo as tarifas de referência a partir da metodologia *ICRP*. Como resultado a tarifa média passou a ser mais alta do que nos modelos anteriores, dado que o modelo de custo passou a considerar as diferenças horárias de consumo em períodos de cargas baixa e alta (de maior risco) e os meses anuais de maior ou menor hidraulicidade do sistema elétrico.

As tarifas de uso dos sistemas elétricos devem então, refletir os custos acarretados por cada agente na expansão da rede e ainda a variação dos custos operacionais do sistema, pois desta forma, os agentes serão levados a tomar decisões de investimento que coincidam com os da expansão a custo mínimo. A metodologia ora apresentada se aplica à simulação de tarifas de uso dos sistemas de transmissão da Rede Básica ou à simulação de uso dos sistemas.

As tarifas sempre devem cobrir os custos dos proprietários dos ativos de transmissão. Desta forma, como a metodologia nodal não assegura esta cobertura, deve ser aplicado um fator  $K$ , a cada tarifa nodal calculada, de forma a ajustar os valores calculados à necessidade de arrecadação dos proprietários dos ativos de transmissão.

## 1.2 Ajuste dos Encargos para Cobertura da Receita Total

Dado que os *Custos Marginais* não são suficientes para remunerar a rede de transmissão ou de distribuição, os encargos calculados pela metodologia proposta precisarão ser ajustados de forma a recuperar uma quantia pré-estabelecida.

As tarifas de uso, portanto, devem ser modificadas para que se obtenha a remuneração total esperada. Estes ajustes nas tarifas resultam em encargos adicionais ou suplementares, a serem pagos pelos usuários da rede elétrica. Atualmente, esta suplementação nos encargos é feita através de um selo, ou seja, um valor fixo em R\$/MW que é adicionado em todas as tarifas nodais. É o Método do Selo.

Esse ajuste é feito através de uma parcela aditiva, constante, em R\$/MW, a ser somada aos preços nodais. Alega-se que, os ajustes sendo feitos desta forma, a relatividade das tarifas dentro de cada classe de usuários não será afetada e não ocorrerá distorção na sinalização locacional.

Este método aloca os encargos de uso baseado na magnitude da potência contratada, medida no período de carga máxima, independente de distância ou localização dos agentes envolvidos. Neste método, não é requerida nenhuma simulação de fluxo de potência, a parcela é calculada pelo custo médio e é utilizada toda a malha de transmissão.

O principal argumento para este método [Weedy, 1998] é que um sistema integrado de transmissão e distribuição já é planejado para atender os critérios de menor custo de expansão do sistema de transmissão e as taxas do selo postal têm a virtude prática da simplicidade administrativa.

A principal deficiência desta metodologia é que ela ignora o ponto de operação do sistema, por não utilizar nenhuma simulação de fluxo de potência. Como consequência, isto é semelhante ao envio de um sinal econômico incorreto para os clientes de transmissão. Por exemplo, um acesso ao sistema de transmissão que exigisse grandes melhorias no sistema resultaria em que este novo acessante seria onerado em apenas parte dos custos de transmissão causados por este acesso [Shirmohammadi, 1995]. Em outras palavras, existiria um subsídio cruzado proveniente dos outros usuários do sistema.

Uma outra desvantagem é que novos usuários que usam levemente o sistema (pares geração/carga em curtas distâncias elétricas) estariam subsidiando transações entre usuários que usam pesadamente o sistema. A distância nem outros fatores relacionados com a localização geográfica dos agentes, tal como congestão do sistema de transmissão, não influenciam o preço de uso deste sistema.

Outras desvantagens deste método:

- Não leva em consideração a rede realmente utilizada na transação e
- Não fornece sinais econômicos para uma expansão otimizada [Jesus, 2001].

### 1.3 Revisão Bibliográfica

Com o intuito de verificar como o problema de tarifação dos sistemas elétricos, em particular, os sistemas de transmissão, vem sendo tratado e quais as principais metodologias aplicadas, se fez a revisão bibliográfica que é comentada nesta seção.

Observa-se que várias metodologias têm sido propostas nos últimos anos na tentativa de se encontrar aquela que remunere o sistema da maneira mais eficiente e justa para todas as partes envolvidas no processo.

Nos últimos anos diversos setores de atividade, entre eles o setor elétrico, têm vindo a ser sujeitos a um processo conhecido por desregulamentação. A América Latina, especificamente, tem passado por um processo de transição econômica e política nos últimos anos. Este processo tem colocado muitos desafios sobre os quais a comunidade científica juntamente com as empresas, têm vindo a refletir: Rudnick *et al* (1996, 1997, 1998) e Danitz *et al* (2002) reportam estudos aprofundados sobre este assunto, ambos destacando a experiência do Chile. Todo esse processo de desregulamentação e privatização faz surgir importantes diferenças em relação à expansão na transmissão, em que há diferentes graus de intervenção e coordenação do Estado. Tem-se desejado um acordo entre custos mínimos e sistemas altamente seguros e confiáveis.

Nesta seção pretende-se analisar as experiências que se desenrolam em diversos países, no que diz respeito à tarifação dos sistemas elétricos, dando uma atenção especial à metodologia nodal, que é a metodologia para cálculo de tarifas de uso dos sistemas elétricos utilizada atualmente na maioria dos países e, à suplementação destas tarifas, no intuito de conseguir remunerar todo o sistema. O principal objetivo aqui, é identificar vantagens e desvantagens destas metodologias que satisfazem alguns padrões específicos.

Sendo o *link* vital entre usuários e empresas, o sistema de transmissão tem sido ultimamente, o centro das atenções de todos. Yang *et al* (1999) mostra que, a desregulamentação dos sistemas de potência, as mudanças na estrutura do setor elétrico e a emergência dos produtores independentes e consumidores estão levando a tarifação do sistema de transmissão para um novo foco. Os investimentos já feitos devem ser recuperados e os gastos com a futura expansão deve ser adicionados ao conceito de “custos de transmissão”. A tarifação dos custos de transmissão corresponde aos serviços de operação, manutenção e outros como, sincronização, sistema de controle e serviços de despacho, os quais precisam ser direcionados de forma correta, tecnicamente e economicamente.

É certo que todos os envolvidos no processo devem pagar para manter o sistema no nível aceitável de confiança e segurança. Fubin *et al* (2002) levanta as seguintes

questões: como determinar o grau apropriado de segurança; como pagar por ela e como implementar um método correspondente no mercado de potência onde todos os participantes do mercado possam ser responsabilizados pelos custos relevantes. O objetivo de todos é encontrar uma estratégia ótima que responda a todas essas questões. O aumento da competitividade, conseqüentemente, tem contribuído para a busca da maximização do bem-estar, isto é, imposto qualidade no serviço e aumentado a eficiência econômica. A referência ainda apresenta uma discussão sobre a distinção entre aproximações probabilísticas e determinísticas na análise e avaliação da segurança dos sistemas de potência.

Neste âmbito, Saraiva (2001) reporta que têm sido adotados diversos sistemas tarifários que se podem agrupar em: métodos embutidos, utilizando ou não, resultados de estudos de fluxos de potência, métodos incrementais e métodos marginais. Segundo Fubin *et al* (2002) a metodologia marginal é o método mais tradicional utilizado na determinação das tarifas, o qual tem mostrado sinais econômicos mais eficientes para o mercado, minimizando o conflito de interesses entre todas as partes envolvidas no sistema.

A dificuldade consiste, principalmente, na alocação das tarifas entre os consumidores, a qual deve ser justa e leal para todos os envolvidos na transação. Outro desafio enfrentado é a determinação das tarifas relativas a diferentes linhas de transmissão baseadas nos seus diferentes serviços, de acordo com as diferentes situações de mercado e demandas de carga. David *et al* (1994) e Yu *et al* (1997) tentaram comprovar a confiança na recuperação dos custos usando métodos embutidos. A desvantagem desse mecanismo tem sido a incompatibilidade entre capacidade de uso e segurança. A capacidade de uso deve ser distribuída na rede atendendo as condições de segurança da rede, não afrontando as normas estabelecidas pelas agências reguladoras e condições do sistema. Quanto maior o número de elementos a serem distribuídos, maior a dificuldade de atender simultaneamente os padrões pré-estabelecidos de segurança utilizando-se estes métodos.

O método dos custos embutidos aloca os custos embutidos e a média anual dos custos de manutenção e operação das facilidades existentes em um serviço de transmissão específico. Yang *et al* (1999) sumariza quatro métodos de custos embutidos: Método do Selo, Método do Caminho Contratado, Método do MW-Milha e o Método "Line-By-Line". Nenhum dos dois primeiros métodos, o Método do Selo e o Método do Caminho

Contratado, requer execuções do fluxo de potência. Os dois últimos necessitam de resultados do fluxo de potência e então têm o seu potencial submetido às limitações dos dois primeiros métodos.

Duas limitações são comuns aos quatro métodos citados:

- Os métodos consideram apenas os custos da rede de transmissão existente, sem considerar os custos de futuras expansões do sistema.
- Os métodos não consideram mudanças nos custos como resultado das mudanças requeridas no despacho de uma eventual transação particular.

Como exemplo de métodos incrementais, o LRIC – “*Long-Run Incremental Cost Methods*” é descrito em Kovacks *et al* (1994) e Happ *et al* (1994). Tal método considera as mudanças ocorridas nos custos totais do serviço de transmissão. Estas mudanças incluem custos de investimento em expansões futuras e mudanças nos custos de produção e manutenção e operação incrementais inerentes ao serviço de transmissão.

Nos custos marginais encontramos dois subgrupos: Custos Marginais de Curto Prazo (SRMC – *Short-Run Marginal Cost Method*) e Custos Marginais de Longo Prazo (LRMC – *Long-Run Marginal Cost*). No primeiro, a capacidade da rede é fixada, e o usuário é cobrado de acordo com o custo incremental das perdas, ocasionada pelo uso incremental na rede de transmissão, enquanto que, o segundo subgrupo, considera os custos operacionais, além dos custos referentes à expansão do sistema de transmissão. Neste último método, a malha de transmissão pode ser expandida devido a seu uso incremental. O usuário é cobrado em função do investimento incremental e custos operacionais decorrentes do uso incremental do sistema de transmissão, destacando esta ferramenta pela estabilidade no valor da tarifa calculada. Tais métodos são descritos em Jesus (2002). O método LRMC, descrito em Tabors *et al* (1994) estabelece a tarifa hoje baseada nos custos do futuro sistema, considerando operação e investimentos. De acordo com Cura (1998), o método SRMC tem sido amplamente usado por requisitar uma tarifa complementar para financiar os investimentos e custos de operação dos sistemas.

Yang *et al* (1999) fala que os métodos LRMC e LRIC são mais compreensíveis que o método SRMC, mas que não levam os investimentos passados em consideração. Estes métodos têm desprezado suas diferenças em relação a definições dos custos. Os custos marginais representam a capacidade do sistema atual e dos próximos anos; um

consumidor paga por cada unidade da nova capacidade usada. Os custos incrementais incluem o custo total de qualquer nova facilidade especificamente utilizada para servir novos consumidores.

Para Rotoras *et al* (2002) e Yang *et al* (1999), os modelos do tipo marginal apresentam diversas vantagens ao nível dos sinais econômicos que transmitem aos utilizadores, mas os valores das tarifas daí resultantes possuem maior volatilidade e, com frequência, não permitem obter a remuneração requerida ou aprovada para as empresas que fornecem serviços na área de transmissão. Então, a metodologia nodal é usada para distribuir os custos, provocando mudanças na tarifa daquela barra na rede de acordo com o balanço de potência e segurança da rede. Esses cálculos dos custos levam em consideração apenas as perdas marginais.

Rudnick *et al* (1997) estudou e aprendeu que os custos marginais cobrem apenas os custos de transmissão referentes às perdas e a uma pequena parte dos custos em relação ao investimento e pesquisa. Simulações no sistema chileno indicaram que apenas 10% da remuneração requerida na transmissão é recuperada enquanto que na Bolívia, recupera-se menos de 4% da remuneração.

Assim, diante destas limitações do método marginal na transmissão, muitos países têm implementado uma segunda parte ao método de tarifação, combinando as considerações dos custos marginais com uma média dos custos. Para recuperar os custos totais do sistema de transmissão, uma tarifa adicional ao custo marginal é adicionada na forma de ajustes, cujos cálculos variam de país para país. Atualmente, no Brasil, esta suplementação tem sido feita através do Método do Selo.

Argentina, Bolívia e Chile determinam a alocação destes ajustes, baseada na área de influência de cada usuário individual, o qual corresponde a um conjunto de linhas e subestações diretamente influenciadas pela energia e a potência injetada pelo usuário. A área de influência representa o uso efetivo por cada usuário da rede de transmissão independente do contrato comercial de cada um. Divergindo deste conceito, o Peru determina a suplementação baseada na aproximação do Método do Selo. Rudnick *et al* (1999) descreve o Método do Selo. O Método do Selo aloca as tarifas entre os agentes baseada na injeção de potência ou energia deles para a rede, independente da distância na transmissão ou configuração da rede. Os esquemas futuros de alocação destes ajustes

determinarão que apenas aqueles que contribuírem com fluxo de potência positivo pagarão pelo uso do sistema.

Fahrioglu *et al* (2002) levanta ainda a questão de que alguns consumidores de carga são mais críticos em relação à alocação das tarifas e ajustes que outros. Uma vez desenvolvida a formulação do contrato designado, qualquer sistema de potência pode ser analisado para mostrar a importância da alocação das tarifas.

Danitz *et al* (2002) fala que a tarifação do sistema tem sido definida para não distorcer as decisões de mercado relacionadas à operação da capacidade existente e investimentos na nova capacidade de geração e novas cargas. A metodologia de Tarifação Nodal, a qual é implementada na maioria dos mercados de sistemas elétricos, também não permite recuperar os custos totais dos investimentos na transmissão, principalmente porque os custos marginais são menores que a faixa de custos como já foi mencionado. No objetivo de recuperar todos os custos, é necessário adicionar uma tarifa complementar.

Chen *et al* (2002) descreve o método nodal detalhadamente: foi desenvolvido para os sistemas de potência desregulamentados, induz o uso eficiente da rede de transmissão para prover sinais econômicos corretos, varia em espaço e hora e é composta de variáveis de custos de operação e nenhuma carga adicional para assim, manter a qualidade e a segurança nos serviços. Um número considerável de literatura sobre este método tem sido publicado levando em consideração não apenas a operação do termo “custo”, mas também outros serviços subordinados.

A maioria das teorias existentes sobre este método usa os multiplicadores Lagrangianos para obter as tarifas com segurança, confiança e qualidade. Um fato ainda não claro é, *qual* gerador e/ou carga é influenciado por *quem* e, *quanto* cada elemento de um sistema de potência contribui para as tarifas nodais.

Este método foi desmembrado em vários componentes, métodos computacionais foram desenvolvidos, todos envolvendo uma implementação heurística que faz a decomposição da tarifa nodal em um conjunto heurístico dependente, ou seja, na decomposição de fatores dependentes. Estas informações podem e devem ser usadas não somente para providenciar o uso eficiente da rede de potência e gerenciamento do congestionamento, mas também para promover sinais econômicos para os investimentos na transmissão.

Segundo Danitz *et al* (2002), a maneira para alocar o complemento necessário às tarifas nodais, tem sido um importante tópico de discussão no setor acadêmico e concessionárias. Cada país tem procurado sua própria solução de acordo com a realidade dos sistemas de transmissão. Muitos esquemas tem sido desenvolvidos na tentativa de resolver esse problema de alocação com o objetivo de determinar a contribuição de todos os usuários da rede de forma justa, independente do contrato comercial entre os participantes. Danitz (2002) discute três métodos baseados no uso da rede: Método de *Rudnick*, Método de *Bialek* e o Método de *Kirschen*. Estes métodos tendem a dar uma aproximação de acordo com o fluxo na rede, e responsabiliza cada agente de acordo com esses fluxos, ou seja, determina a contribuição de cada agente no fluxo de cada linha. O primeiro destes métodos usa o princípio da superposição enquanto os outros dois, se utilizam do princípio da proporcionalidade. As principais características de cada método são apresentadas nesse artigo, bem como uma comparação entre eles.

Em *Rudnick et al* (1996) são apresentadas mais três métodos usados para remunerar o sistema de transmissão da Bolívia, Chile, Peru e Argentina. Assumindo que os valores são substituídos e usados para custear as linhas de transmissão, consideram que uma renda marginal é obtida para tarifar os serviços de transmissão como resultado da localização das tarifas nodais nas diferentes barras (ambos conceitos são coerentes com a regulamentação da tarifação do sistema de transmissão nos países). Todos eles assumem que apenas os geradores pagam pela rede principal de transmissão. A rede de transmissão é considerada a rede de alta tensão que é composta por todos os geradores. A rede de transmissão radial ou subtransmissão compostas por geradores individuais ou consumidores são deixadas de fora. Os três métodos diferem na forma da alocação da renda suplementar requerida entre os geradores. O primeiro método é baseado no uso do sistema que representa o impacto total da mudança na geração, no fluxo total em cada linha do sistema; o segundo método se baseia na faixa de geração proporcional a cada barra de geração e o terceiro método e último, se utiliza dos benefícios proporcionais que representa cada barra de geração existente no caminho entre duas barras.

A Bolívia e o Chile usam o primeiro método, enquanto que o Peru se utiliza do segundo. A terceira alternativa foi proposta na Argentina, mas ainda se usa o primeiro método neste país.

Diante dos resultados obtidos com as 3 metodologias e apresentados no artigo Rudnick *et al* (1996), concluiu-se que a metodologia 2 é a mais simples na aplicação, enquanto que a terceira é a mais complexa. É difícil definir os benefícios para os participantes com todas as modificações na estrutura do sistema. O comprimento dos contratos de transmissão é uma questão relevante na hora de se decidir qual é a melhor metodologia. A aplicação da metodologia 3 é incoerente na aplicação de extensos contratos.

Rudnick *et al* (1999) reporta ainda que nenhum desses países tem tido sucesso na aplicação da regulamentação no processo de tarifação. Tem surgido alta competitividade entre os agentes da Bolívia e Chile na determinação da tarifação do uso, modelos de despacho utilizados e alocação da barra marginal. De fato, o uso do sistema é condicionado pela alocação da barra marginal no despacho econômico do sistema. Se a alocação varia com o tempo, então varia a alocação das tarifas entre os geradores e consumidores e entre eles mesmos nos dois grupos. Os geradores têm reclamado no sistema Boliviano quanto à variação das tarifas de uso do sistema de transmissão que não estabelece um sinal econômico estável para expansão do sistema.

Em Jesus (2002) são apresentados dois métodos de otimização para os cálculos dos ajustes na tarifação do sistema de transmissão. Um exemplo numérico é utilizado, a partir das tarifas obtidas pelo método marginal de longo prazo baseada nos custos de investimento, ou simplesmente, ICRP. Este método modela o investimento futuro em função de cenários que incluem investimentos na expansão da rede de transmissão.

Os métodos de minimização utilizados em Jesus (2002) são: Variação Linear e Variação Quadrática, os quais apresentaram resultados semelhantes entre si. O objetivo deste trabalho aqui referenciado, é oferecer à CHESF e à ANEEL um programa computacional, que poderá ser utilizado por profissionais destas empresas, para calcular tarifas nodais de uso da rede básica que indiretamente irá beneficiar os consumidores e os demais agentes, por terem tarifas coerentes com as restrições da rede de transmissão.

Na bibliografia pesquisada não se encontrou os algoritmos genéticos na resolução do problema de tarifação dos sistemas elétricos. Rudnick *et al* (1996) desenvolveu com sucesso, um método heurístico usando algoritmos genéticos para ser aplicado nas decisões de planejamento, dos sistemas, visando a otimização do processo de decisões de investimentos.

Pimentel *et al* (2001) estudou o planejamento de rotas aéreas utilizando AG's. A idéia foi analisar três diferentes implementações: a minimização do número de cruzamentos usando M níveis, a minimização do número de níveis e a minimização do número de mudanças de níveis utilizando M níveis. Os três casos foram implementados e analisados individualmente comparados, levando-se em consideração custos, tempo, quantidade de níveis e tráfego. O objetivo deste trabalho foi estabelecer o projeto de redes de vias aéreas mais eficiente.

Correa *et al* (2001) estudou a otimização do atendimento de cargas de subestações utilizando AG's e comparou com o método já utilizado pela Copel (Companhia Paranaense de Energia). A idéia foi identificar qual área deveria ser atendida por determinada subestação. O autor avaliou o problema abordando a capacidade de cada subestação e a localização das cargas. A conclusão final foi que o método já utilizado, era o mais indicado para trabalhar com a localização de subestações apesar de que, este algoritmo ainda não atende várias necessidades, as quais foram citadas no trabalho.

Bobel *et al* (2001) também estudou e implementou AG's na otimização da logística da manutenção corretiva em redes de distribuição de energia elétrica, utilizando dados reais da área de distribuição da Copel

Ferreira (2002) estudou a alocação ótima de capacitores fixos e chaveados, minimizando as perdas em kW, utilizando AG's. O autor teve êxito desde que obteve como resultado uma implementação em FORTRAN, a qual fornece a localização do banco de capacitores fixos e chaveados, considerando a economia líquida realizada com a redução das perdas e os custos de aquisição e instalação dos capacitores, de modo a ser aplicada a qualquer sistema radial de distribuição com curvas de cargas conhecidas.

Diante de alguns trabalhos aqui citados, percebe-se a grande variedade de tipos de problemas e áreas em que os AG's podem ser utilizados. Entretanto, nem sempre este tipo de método de otimização obtém melhores resultados em relação aos métodos clássicos, dependendo do problema específico. Determinadas situações podem ser melhor implementadas por outros métodos que não utilizem Algoritmos Genéticos ou mesmo utilizem ambos os métodos, clássico e AG (hibridização), como forma de se chegar na solução ótima, com mais eficiência e flexibilidade.

De acordo com a genética, as características hereditárias são transmitidas através de genes (unidades químicas que se localizam no núcleo das células). Os genes são constituídos por uma substância química, o DNA, ou ácido desoxirribonucléico. Dispõem-se aos pares, dentro de filamentos visíveis ao microscópio, chamados cromossomos. A propriedade fundamental dos genes é que eles se auto reproduzem fielmente. Entretanto, não há uma precisão absoluta nessa auto reprodução, assim, pode ocorrer uma mutação gênica: o gene que até aquele momento produzia determinada característica passa a produzir outra.

Todo indivíduo nasce com seu lote herdado de gens (seu genótipo). A forma que o mesmo indivíduo terá em vida dependerá deste genótipo, bem como do tipo de vida que ele levar. Mas o tipo de vida não alterará em nada seus genes: o atleta pode ter fortes músculos, mas ele não transmite a seus filhos uma predisposição a músculos fortes. Os fatores que irão produzir mutações em seus gens, os agentes mutágenos, como a radiação, variações de temperatura (para certas espécies), fatores químicos e fatores desconhecidos, agem ao acaso, podendo produzir tanto mutações maléficas como benéficas.

Ocorre que, quando a mutação é adaptativa, os indivíduos tornam-se mais capazes de explorar as oportunidades oferecidas pelo meio, desenvolvem-se e produzem um número maior de descendentes. Este fenômeno chama-se reprodução diferencial, e sua conseqüência é a disseminação até a generalização das características genéticas favoráveis dos melhores adaptados ao conjunto da população.

Modestamente, compreende-se o fenômeno da evolução como um processo universal de adaptação em relação ao ambiente. A mutação, seu mecanismo básico, faz-se acidentalmente, mas só persiste pela seleção natural, entendida como fenômeno de reprodução diferencial.

Estes princípios básicos de Genética Populacional, que se baseiam na idéia que a variabilidade entre indivíduos de uma população de organismos que se reproduzem sexualmente se dá pela mutação e pela recombinação genética foi desenvolvido durante as décadas de 30 e 40 por biólogos e matemáticos de importantes centros de pesquisa.

Castro (1999) fala que, nas décadas de 50 e 60, muitos biólogos começaram a desenvolver simulações computacionais de sistemas genéticos, entretanto, foi John Holland quem começou, seriamente, a refinar suas idéias sobre o tema, culminando em 1975 na

publicação de seu livro, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", hoje considerado o marco dos Algoritmos Genéticos. Desde então, tais algoritmos vêm sendo aplicados com sucesso nas mais diversas áreas, dentre elas: otimização.

Os Algoritmos Genéticos foram inventados por John Holland nos anos 60 e desenvolvidos por seus alunos na Universidade de Michigan em meados de 1970. Segundo Salvador (1999), o principal objetivo de Holland não foi desenvolver algoritmos para solucionar problemas específicos, mas dedicar-se ao estudo formal do fenômeno de evolução, como este ocorre na natureza, e desenvolver maneiras de importá-los aos sistemas de computação.

#### 1.4 Motivação da Pesquisa

Diante das desvantagens da metodologia nodal aplicada atualmente no cálculo das tarifas do sistema de transmissão e o método do selo aplicado na suplementação destas tarifas, observou-se a necessidade de aperfeiçoar estes cálculos, transformando os custos de transmissão em tarifas, mas levando em consideração aspectos relativos à necessidade de não discriminar os agentes e de resultar em eficiência econômica, utilizando-se Algoritmos Genéticos (AG's).

O objetivo é oferecer um novo método que calcule os ajustes diferenciados das tarifas, considerando o nível de carregamento de cada barra no sistema. A idéia é que este método seja de fácil implementação e que possa ser aplicado ao maior número possível de sistemas de transmissão de energia elétrica.

É esperado que a tarifação do uso influencie a expansão de longo prazo do sistema de transmissão, assim como na localização geográfica de novos geradores e grandes consumidores, proporcionando um gerenciamento no uso do sistema melhor e mais justo, de modo que todos aqueles que usufruírem deverão pagar, levando-se em consideração como, quando e quantos usarão o sistema.

Os AG's são largamente utilizados atualmente em diversas áreas, e tem apresentado ótimos resultados, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais, além de possuir um esquema de codificação que leva a um espaço de busca relativamente grande, o que é intratável por métodos tradicionais.

## 1.5 Contribuições da Pesquisa

Neste trabalho propõe-se a suplementação na tarifação de uso do sistema de transmissão de energia elétrica utilizando AG's com o intuito de também fazer uma comparação com os paradigmas e métodos já propostos nos últimos anos, no Brasil e em outros países. Os resultados esperados são:

- Desenvolvimento de uma formulação com rotinas computacionais para o cálculo das tarifas de uso do sistema de transmissão mais adequada para o novo ambiente do setor elétrico, mas procurando otimizar o acesso de novos agentes em função do grau de carregamento dos circuitos em operação.
- Validação dos resultados obtidos utilizando-se AG's através da comparação com os resultados obtidos no método simplex.
- Utilização do conhecimento adquirido nesta área, na procura de melhorar a metodologia para cálculo da tarifa de uso do sistema de transmissão.

## 1.6 Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. Segue uma breve descrição do conteúdo dos capítulos seguintes.

O capítulo 2 trata das técnicas de otimização utilizadas neste trabalho: 1) os algoritmos genéticos, onde se comenta a origem desses algoritmos, seus princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens da ferramenta e por fim, comentários sobre alguns trabalhos estudados; 2) o método simplex, utilizado para a validação do método proposto utilizando-se AG.

O capítulo 3 descreve em detalhes a implementação computacional realizada. Neste capítulo também é apresentado o fluxo de carga linearizado DC e os resultados obtidos para um sistema exemplo de transmissão simples, constituído de 6 barras, bem como a análise dos resultados.

No capítulo 4, são apresentadas as conclusões desta dissertação nas quais procurou-se resumir as contribuições e limitações deste trabalho, bem como apontar pontos para pesquisas futuras.

## Capítulo 2

### Métodos de Otimização Utilizados: Algoritmos Genéticos e o Método Simplex

#### 2.1 Introdução aos Algoritmos Genéticos

Há muito tempo, o homem tem se servido das características e princípios existentes na natureza para a criação de máquinas, métodos e técnicas que "melhorem" sua vivência neste planeta. Alguns exemplos típicos desta afirmação foram as seguintes invenções: aviões baseados nas características dos pássaros, submarinos com sistemas de imersão semelhante ao dos peixes, sonares baseados nos morcegos, dentre outros.

Dentro deste contexto, surgia em meados do século XIX um dos mais importantes princípios no campo da evolução da vida, "A Seleção Natural de Darwin", que defendia a idéia de que na natureza dos seres vivos, aqueles com melhores características, "adaptabilidade", tendem a sobreviver frente aos demais (Castro, 1999). Charles Darwin, estudando as espécies e suas evoluções, coletou durante anos uma grande quantidade de material que demonstrou, principalmente, a existência de inúmeras variações em cada espécie. Seus estudos, associados às pesquisas de outros cientistas do assunto, tornaram evidentes que as espécies animais efetivamente se modificam. Um dos principais pontos dos estudos de Darwin foi sem dúvida o aspecto das variações apresentadas entre indivíduos da mesma espécie. Através de estudos em pombos, por exemplo, ele observou a enorme variedade de indivíduos que se obtém, cruzando uma mesma espécie. Segundo esse estudioso, todas as novas espécies são produzidas por meio de uma seleção natural.

Desde há quase cinco bilhões de anos, a natureza vem resolvendo problemas com sucesso. Cada organismo possui cromossomos, genes, constituindo um sistema genético. Um determinado grupo de indivíduos vive junto, constituindo uma população. Nesta população há os *organismos melhores*, que são os que têm mais chance de casar e gerar bons descendentes. Estes descendentes são mais bem adaptados do que a média da

população, pois receberam melhores genes. Ao final, vence a lógica, de sobreviver o mais adaptado ao nicho ecológico da população, o que garante que este sistema de escolha com sucesso seja passado às gerações subseqüentes, melhorando cada vez mais as populações envolvidas<sup>1</sup>.

Desde então, a medicina e suas ciências afins vêm numa busca acelerada tentando "mapear" toda a informação genética humana, relacionando deste modo cada gene de cada cromossomo às características que eles representam nos indivíduos: hereditárias, físicas e funcionais.

Tem-se o projeto Genoma iniciado em diversos centros do mundo, liderados pelo instituto Nacional de Saúde dos Estados Unidos, que contou com investimento inicial de três bilhões de dólares. O principal objetivo do projeto é descobrir, até o ano 2005, todos os genes do corpo humano e identificar mais de três bilhões de seqüências genéticas de cromossomos.

Os cientistas querem conhecer, antes do nascimento, a possibilidade de cada ser humano desenvolver doenças com fatores hereditários, podendo assim, evitar o desenvolvimento do mal, seja com terapias genéticas, se a doença for congênita, ou com a interferência no estilo de vida do portador da mutação. Eles calculam que 2/3 dos 60 mil a 80 mil genes do organismo humano já tenham sido mapeados, embora se conheça a função de apenas 4% deles.

Foram nestes últimos anos que a genética alavancou-se com as primeiras clonagens realizadas no mundo, tendo para marco a famosa ovelha Dolly na Inglaterra. As clonagens e possíveis objetivos e conseqüências destas descobertas provocaram inúmeras discordâncias e precauções por todo o planeta, afinal, quais seriam os rumos da aplicação destes conhecimentos. Indiscutível as vantagens oferecidas na prevenção de doenças, contudo, assustadoras são as possibilidades da criação de novas doenças, mutações, clonagens individuais, entre outras mais (Castro, 1999).

A Computação Evolutiva (CE) é um ramo da ciência da computação que se embasa em um novo paradigma para a resolução de problemas, que não exige o conhecimento de uma sistemática prévia de resolução, e baseia-se nos mecanismos encontrados na natureza, à luz da teoria da evolução natural de Darwin. A Computação

---

<sup>1</sup> [http://www.geocities.com/Athens/Sparta/1350/ia/ag\\_aplica.html](http://www.geocities.com/Athens/Sparta/1350/ia/ag_aplica.html).

Evolutiva constitui um ramo da Computação Natural, e envolve tópicos de vida artificial, geometria fractal, sistemas complexos e inteligência computacional. Fazem parte dos estudos deste campo os Algoritmos Genéticos (AGs), as Redes Neurais (RNs) e os Sistemas Especialistas (SEs).

Recentemente novas técnicas têm sido inspiradas na natureza ou na biologia de um modo geral, como as "Redes Neurais", que se baseiam no funcionamento do cérebro humano para possibilitar aos computadores uma chamada "Inteligência Artificial".

Os Algoritmos Genéticos são algoritmos de busca fundamentados no processo da seleção natural proposto por Charles Darwin. Estes algoritmos foram inicialmente desenvolvidos pelo professor John Holland, da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos da América, em suas explorações dos processos adaptativos de sistemas naturais e suas possíveis aplicabilidades em projetos de *softwares* de sistemas artificiais. Eles foram formalmente introduzidas no seu livro *Adaptation in Natural and Artificial System* (Holland, 1975). Convém ainda salientar que a idéia dos Algoritmos Genéticos é mais antiga, como reconhece o próprio Holland, referindo-se a trabalhos anteriores e ainda outras abordagens semelhantes. Em particular, ele menciona em seu livro os trabalhos de Rosenberg (1967), Cavicchio (1970), Hollstien (1971) e Frantz (1972) (31).

Uma grande aplicação dos Algoritmos Genéticos é para os problemas de busca: em que dado um conjunto de elementos ou indivíduos, deseja-se encontrar aquele ou aqueles que melhor atendam a certas condições previamente especificadas (Goldberg, 1989 e Barbosa, 1996).

Os Algoritmos Genéticos transformam uma população de indivíduos, cada um com um valor de adaptabilidade associado, chamado de aptidão, para uma nova geração de indivíduos usando os princípios Darwianos de reprodução e sobrevivência dos mais aptos, naturalmente, ocorrem operações genéticas tais como cruzamento e mutação. Cada indivíduo na população representa uma possível solução para um dado problema, o que o Algoritmo Genético faz é procurar aquela que seja muito boa ou melhor para o problema analisado pela criação genética de populações de indivíduos cada vez mais aptos à extremização da função objetivo de interesse.

Um processo de otimização consiste em procurar melhorar a performance, com o objetivo de alcançar um ou vários pontos ótimos. É desta forma que funcionam os

Algoritmos Genéticos. Eles combinam a sobrevivência do mais adaptado, com uma troca de informações ao mesmo tempo aleatória e estruturada. Os problemas de otimização são baseados em três pontos principais: a codificação do problema, a função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar e o espaço de soluções associado.

## 2.2 Definições Básicas

As principais definições relacionadas com os AG's são:

- **Cromossomo:** Cadeia de caracteres representando alguma informação relativa às variáveis do problema. Cada cromossomo representa deste modo uma solução do problema.
- **Gen ou Gene:** É a unidade básica do cromossomo. Cada cromossomo tem um certo número de gens, cada um descrevendo uma certa variável do problema.
- **População:** Conjunto de cromossomos ou soluções.
- **Geração:** O número da iteração que o Algoritmo Genético executa.
- **Operações Genéticas:** Operações que o Algoritmo Genético realiza sobre cada um dos cromossomos.
- **Espaço de Busca ou Região Viável:** É o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado. Deve ser caracterizado pelas funções de restrição, que definem as soluções de forma viável ao problema a ser resolvido.
- **Função Objetivo ou de Avaliação:** É a função que se quer otimizar. Ela contém a informação numérica do desempenho de cada cromossomo na população. Nela estão representadas as características do problema que o Algoritmo Genético necessita para realizar seu objetivo, sendo expressa normalmente como:

$$J = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{(Equação 1)}$$

onde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são as variáveis que o algoritmo procura determinar para otimizar  $J$ . Esta função objetivo, é em princípio, calculada para cada cromossomo da população.

### 2.3 Diferenças entre os AG's e os Métodos Clássicos

Os métodos clássicos de otimização iniciam com um único candidato, chamado de solução básica, e pelo cálculo de derivadas se determina para qual direção se deve caminhar na busca do próximo candidato. Por trabalharem com o cálculo de derivadas, são denominados algoritmos de ordem  $n$ , onde  $n$  é a maior derivada utilizada.

Exemplos típicos são os métodos dos gradientes conjugados e de Newton, que por utilizarem derivadas primeiras e segundas, respectivamente, são caracterizados como algoritmos de primeira e segunda ordem. Todavia, classificações intermediárias são também possíveis, como é o caso do método Quase-Newton, que se situaria entre os dois anteriores.

O maior problema destes algoritmos matemáticos é que não existe nenhuma garantia da obtenção de um ponto extremo global, ou seja, o algoritmo convergirá para o extremo local mais próximo da direção de busca determinada pelas derivadas. Por esta razão, tais algoritmos são mais convenientemente empregados para problemas unimodais, aqueles que apresentam apenas um extremo no intervalo considerado.

A aplicação destes algoritmos para problemas multimodais não é tão simples, já que a solução encontrada dependerá do ponto de partida inicial, podendo na maioria das vezes se encontrar uma solução extrema local muito "pior" que a solução ótima global desconhecida.

Os Algoritmos Genéticos representam uma classe de ferramentas muito versátil e robusta a ser empregada na solução de problemas de otimização, embora não devam ser considerados estritamente extremizadores de funções. Assim como outros métodos, por não empregarem o cálculo de derivadas, mas sim atuarem diretamente na busca das soluções no espaço viável, ele é classificado como método direto ou de ordem zero.

Quando utilizado no contexto de otimização, os Algoritmos Genéticos se distinguem dos métodos clássicos de Programação Matemática basicamente pelos seguintes aspectos:

- Emprega sempre uma população de indivíduos, ou soluções;

- Opera com uma codificação das possíveis soluções (genótipos) e não com as soluções propriamente ditas (fenótipos);
- Trabalha com regras de transição probabilísticas;
- Não requer informações adicionais (derivadas, por exemplo) sobre a função a otimizar (Castro, 1999).

Deste modo, a busca por soluções pode se dar sobre funções objetivo não-diferenciáveis e simultaneamente com variáveis reais, lógicas e inteiras.

Outra grande diferença dos métodos clássicos para os Algoritmos Genéticos é que estes não se prendem tão facilmente a extremos locais, uma vez que se trabalha com uma população de indivíduos e se realiza a busca dentro de toda a região viável disponível.

## 2.4 Aspectos Principais dos AG's

A representação ou codificação das variáveis de projeto a serem otimizadas proporciona um grande impacto no desempenho de busca, devendo ser a mais simples possível sem, no entanto, perder as características de representação do problema tratado.

Existem inúmeras formas de representação das variáveis, tais como: binária, números inteiros ou números reais. A maioria dos trabalhos desenvolvidos utiliza a codificação binária, onde cada cromossomo é um vetor composto por zeros e uns, com cada bit representando um gene do mesmo. Para problemas de otimização com variáveis reais, uma codificação binária pode ser introduzida pela conversão de valores numéricos de ponto flutuante para valores binários de comprimentos fixados, sempre necessitando a posteriori realizar o caminho inverso para avaliação da função de aptidão. Existe assim, uma grande desvantagem no caso da representação binária, que seriam as constantes conversões entre valores de ponto flutuante e binário.

Uma vez definidas as variáveis de projeto relevantes para a resolução do problema de otimização, bem como em qual forma serão tais variáveis representadas, deve-se justapor as variáveis de forma a formarem os cromossomos.

### 2.4.1 Operações Básicas: Seleção Natural, Cruzamento e Mutação

#### **Geração da População Inicial**

A população inicial de indivíduos ou cromossomos é na maioria das vezes realizada de forma aleatória, embora existam ocasiões onde é mais apropriada uma seleção heurística da mesma, introduzindo logo de início, um ou mais indivíduos "interessantes", como por exemplo, soluções aproximadas conhecidas contendo algum tipo de informação prévia. Diversos trabalhos realizados comprovam que a inicialização não é crítica, desde que a população inicial contenha cromossomos suficientemente variados (Goldberg, 1989 e Cantú, 1995).

#### **Avaliação da População**

A avaliação da população é realizada pela função *fitness*, que deve indicar a "qualidade" de cada indivíduo na população. Para problemas de otimização ela está intimamente ligada à função objetivo que se deseja extremizar.

Não existe a necessidade de se calcular as derivadas da função objetivo e, conseqüentemente, um algoritmo genético pode ser utilizado também, sem nenhuma modificação, para otimizar funções não diferenciáveis.

É preciso lembrar, entretanto, que a escolha da função *fitness* é para a maioria das aplicações a etapa crítica do processo, já que ela deverá ser avaliada para cada cromossomo de cada população dentro do processo evolutivo.

#### **Esquemas de Seleção**

A seleção dos indivíduos da população baseia-se no princípio da "sobrevivência dos melhores indivíduos", onde os cromossomos com mais alta probabilidade de sobrevivência são copiados de forma semi-randômica uma ou mais vezes para um novo conjunto que formará a próxima geração, denominada população temporária. Em contrapartida, os indivíduos com baixa aptidão serão descartados da população.

Inúmeros esquemas de seleção já foram propostos e implementados na prática dos Algoritmos Genéticos, todavia, apenas os mais empregados são aqui apresentados.

Uma forma de quantificar a probabilidade  $p_i$  do  $i$ -ésimo indivíduo da população vir a ser selecionado para reprodução é o cálculo proporcional à sua aptidão,  $f_i = f(x_i)$  (Castro, 1999).

Uma possível implementação seria:

$$p_i = \frac{f_i}{f} \tag{Equação 2}$$

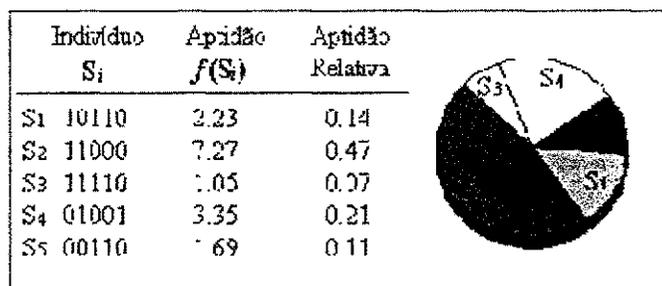
onde  $f_i$  é assumida positiva e  $f$  é o valor médio da aptidão na população:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N} \tag{Equação 3}$$

sendo  $N$  é o tamanho da população. (a divisão por  $N$  é facultativa).

Uma vez definida a forma de quantificação da probabilidade de sobrevivência de cada indivíduo da população, emprega-se um dos muitos métodos utilizados para a seleção dos indivíduos propriamente dita.

Um dos métodos largamente empregados para tal finalidade é o conhecido "método da roleta", onde cada indivíduo da população é representado proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Assim, os indivíduos com alta aptidão recebem uma porção maior da roleta, enquanto que os de baixa aptidão ocuparão uma porção relativamente menor. Deste modo, realiza-se o lançamento  $N$  vezes da roleta, dependendo do tamanho da população, onde serão escolhidos para a próxima geração aqueles por ela sorteados.



**Figura 1 - Exemplo do Método da Roleta**

O método da roleta tem a desvantagem de possuir uma alta variância, podendo levar a um grande número de cópias de um bom cromossomo, diminuindo a variabilidade da população. Um outro método, muito empregado também, é chamado "*stochastic remainder selection without replacement*".

Uma outra idéia, entretanto, é abandonar a magnitude da aptidão de cada elemento e sim utilizar somente a posição (o "*ranking*") de cada indivíduo na população.

Deste modo, mantendo a população ordenada por valores decrescentes da aptidão, a probabilidade de seleção de um indivíduo para a etapa de recombinação cresce com o seu "*ranking*": o primeiro do "*ranking*" tem a maior probabilidade de seleção.

A função de aptidão é dada por:

$$f_{ap}(i) = \frac{2(n-i)}{n-1} \quad \text{(Equação 4)}$$

em que '*i*' varia de forma discreta de 1 a '*n*' (número de indivíduos da população). Os valores obtidos pela função de aptidão variam de 2 a 0. Estes valores são associados a lista de indivíduos ordenados anteriormente. O próximo passo é o cálculo da função de aptidão relativa (ou acumulada). Esta função representa o valor acumulado da função de aptidão:

$$f_{ac}(i) = f_{ap}(i) + f_{ac}(i-1) \quad \text{(Equação 5)}$$

em que '*i*' varia de 2 a '*n*', sendo  $f_{ac}(1) = f_{ap}(1)$ . Os valores dados pela função de aptidão acumulada variam de 2 a *n* e também são associados aos indivíduos da população. Os cálculos da função de aptidão e função de aptidão acumulada são calculados uma única vez na implementação computacional.

O método de seleção escolhido foi o método da roleta. O método da roleta utiliza o seguinte procedimento:

- Calcula a aptidão acumulada para todos os indivíduos da população;
- Gera um número aleatório '*a*' no intervalo de 0 a '*n*';
- Seleciona o primeiro cromossomo cuja aptidão acumulada for maior que '*a*'.

Desta maneira, como já foi mencionado, este método prioriza os cromossomos com maior aptidão, ordenados anteriormente.

### **Reprodução ou Cruzamento**

O processo de seleção não introduz novos indivíduos na população temporária, apenas os chamados progenitores, que servirão como pais para a nova geração, composta pelos filhos.

Na etapa de reprodução, o algoritmo tenta criar novas e melhores soluções (indivíduos mais aptos). Sendo a forma mais simples e natural de cruzamento a chamada "cruzamento em um ponto", descrito a seguir. Como passo inicial, toda a população temporária é agrupada aleatoriamente por pares para gerar um conjunto de  $N/2$  de progenitores potenciais.

O cruzamento é aprovado por um processo de decisão semelhante ao de um "lançamento de moeda". Para isto, deve-se escolher uma probabilidade de cruzamento  $P_c$  igual para cada par. O lançamento de moeda corresponde aqui a gerar, para cada par, um valor aleatório entre 0 e 1. Logo, pela comparação do valor gerado de cada par com a probabilidade  $P_c$ , defini-se se o cruzamento é ou não permitido da seguinte forma: se o valor gerado pelo lançamento for inferior a  $P_c$ , o cruzamento é permitido, caso contrário, os progenitores são mantidos inalterados.

No processo de reprodução ou cruzamento, deve-se aplicar um operador genético sobre os progenitores de forma a serem formados novos indivíduos.

### **Operadores Genéticos**

O princípio básico dos operadores genéticos é transformar a população através de sucessivas gerações, de forma a se obter um resultado satisfatório no final do processo. Deste modo, eles são extremamente necessários para que a população se diversifique e mantenha as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores.

#### **a) Operadores de Recombinação**

Ao cruzar pelo menos dois pais, uma ou mais novas soluções são criadas intercambiando-se a informação genética dos progenitores em um ou mais pontos que também são selecionados aleatoriamente.

Este operador, também conhecido como cruzamento, pode ser utilizado de várias maneiras, onde as mais empregadas são:

- Um-ponto: um ponto de cruzamento é escolhido e a partir dele as informações genéticas dos pais são trocadas, conforme exemplo abaixo.
- Multi-pontos: é uma generalização da idéia de troca de material genético, onde muitos pontos de cruzamento podem ser utilizados.
- Uniforme: não utiliza pontos de cruzamento, mas determina através de um parâmetro global, qual a probabilidade de cada variável ser trocada entre os pais.

#### b) Operadores de Mutação

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida, fornecendo assim, meios para introdução de novos elementos na população. Desta forma, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero, além de contornar o problema de mínimos locais.

O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação  $P_m$ . Geralmente se utiliza uma taxa de mutação pequena, pois é um operador genético secundário.

#### Parâmetros de Influência e Configurações

A correta configuração dos parâmetros de influência é, sem dúvida, um dos aspectos mais relevantes dentro da estratégia dos Algoritmos Genéticos. Não existe muita literatura sobre este tema, uma vez que tais configurações irão depender entre outras coisas da aplicação resolvida, entretanto, é intuitivo que este passo é de muita importância para um bom desempenho do mecanismo de busca.

A eficiência e funcionamento de um Algoritmo Genético é altamente dependente dos seus parâmetros de controle, sendo os básicos aqueles descritos a seguir.

### **Tamanho da População - N**

O tamanho da população indica o número de cromossomos em cada população, constante durante a evolução.

Uma grande população apresentará uma maior diversidade de soluções, contudo, computacionalmente será dispendioso tantas avaliações de funções de aptidão.

Assim, as principais influências deste parâmetro estão relacionadas com o desempenho global e a eficiência dos AG's.

Com uma população pequena o desempenho pode cair, pois deste modo a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Por outro lado, uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais. No entanto, para se trabalhar com grandes populações, são necessários maiores recursos computacionais, ou que o algoritmo trabalhe por um período de tempo muito maior.

Uma idéia interessante é relacionar o tamanho da população com o tamanho do cromossomo, ou seja, quanto maior for o cromossomo maior deverá ser o tamanho da população para uma diversidade razoável.

Muitos pesquisadores sugerem a título de grandeza, tamanhos de população entre 10 e 100 cromossomos.

### **Taxa ou Probabilidade de Cruzamento - T<sub>c</sub>**

Este parâmetro indica com qual taxa ou probabilidade irá ocorrer o cruzamento entre indivíduos selecionados na população.

Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população, em contrapartida, se ela for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente da população, ocorrendo perda de estruturas de alta aptidão. Valores baixos podem tornar a convergência do algoritmo muito lenta.

Usualmente, a taxa de cruzamento varia entre 0.5 e 0.95, todavia, estes números indiquem apenas uma ordem de grandeza, já que existem inúmeros tipos possíveis de cruzamentos, limitados apenas por sua capacidade criativa.

**Taxa ou Probabilidade de Mutação -  $T_m$**

A taxa de mutação indica a probabilidade ou taxa em que haverá a mutação de cromossomos nas populações ao longo da evolução.

A mutação é empregada para fornecer novas informações dentro das populações, prevenindo que as mesmas se tornem saturadas com cromossomos similares à medida que aumenta a diversidade populacional, possibilitando ainda uma maior varredura do espaço de busca.

Há de se tomar cuidado, pois com uma taxa muito alta a busca pode se tornar essencialmente aleatória. Alguns pesquisadores recomendam a escolha da taxa de mutação com base no tamanho dos cromossomos e das populações. De Jong (1975) sugere que a taxa de mutação deve ser inversamente proporcional ao tamanho da população. Em Shaffer, Hesser e Manner sugerem que uma taxa ótima de mutação pode ser achada pela expressão:

$$T_m = (N \cdot L^{1/2})^{-1} \quad \text{(Equação 6)}$$

sendo N o tamanho da população e L o comprimento dos cromossomos.

Como os demais parâmetros, a taxa de mutação ideal dependerá da aplicação a ser resolvida, todavia, a maioria das taxas utilizadas variam entre 0.001 e 0.1.

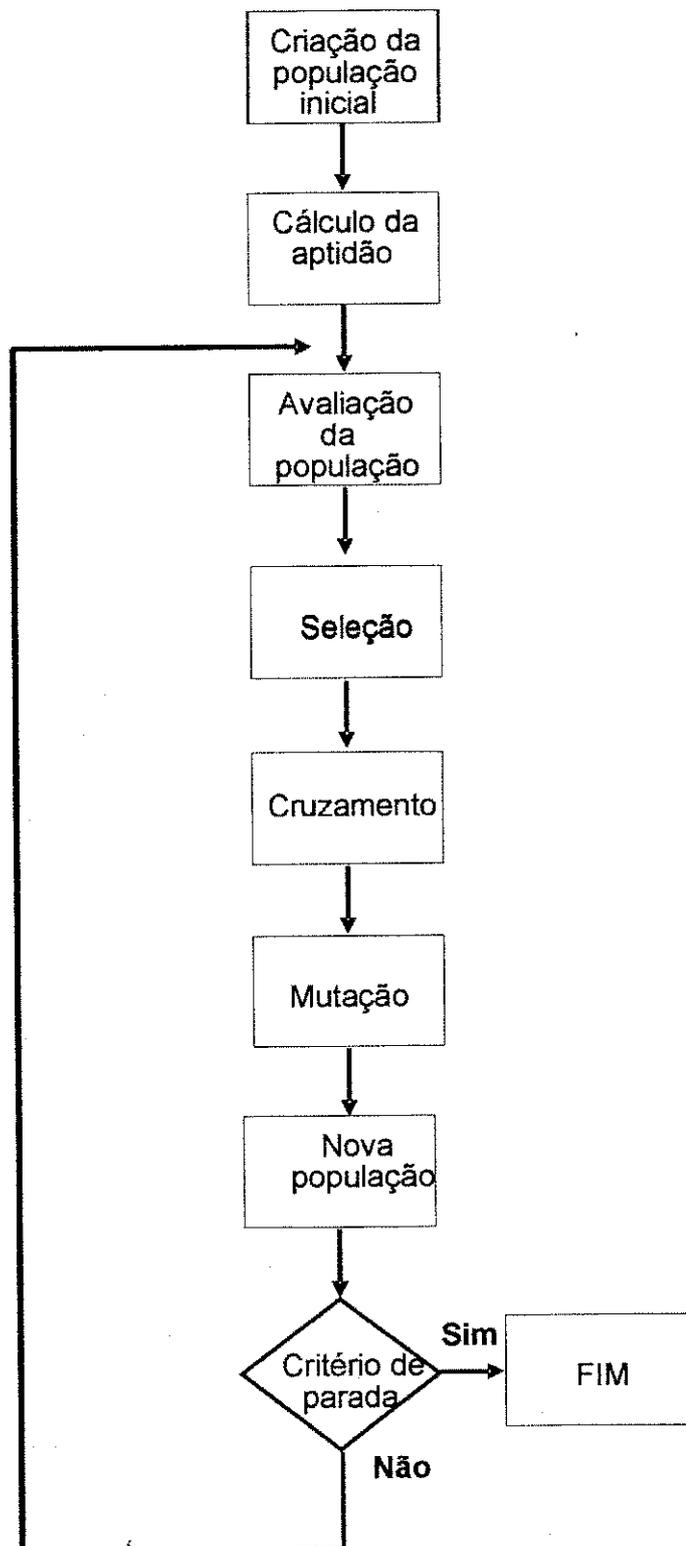


Figura 2 – Fluxograma Básico de um AG simples.

## 2.4.2 Outras Abordagens do Problema de Otimização

### Tratamento das Restrições

Embora os Algoritmos Genéticos tenham sido inicialmente aplicados com sucesso em problemas de otimização sem restrições, foi necessária apenas uma questão de tempo para surgirem as primeiras utilizações da técnica na resolução de problemas com restrições.

Na maior parte das aplicações, são empregadas funções de penalização, de forma a "embutirem" as restrições na função objetivo, técnica esta também utilizada por uma parcela de métodos matemáticos de otimização. Todavia, já encontram-se sugeridas formas de abordagem deste problema sem o emprego de funções de penalização ou mesmo outras alternativas mais inovadoras como os algoritmos co- evolucionários que preservam mais de uma população interagindo. Tais estudos são bastante recentes e proporcionam uma vasta área de estudo e pesquisa a ser desenvolvida (Michalewics, 1996).

## 2.5 Vantagens e Desvantagens dos AG's

Uma das vantagens de um algoritmo genético é a simplificação que eles permitem na formulação e solução de problemas de otimização.

O AG é indicado para a solução de problemas de otimização complexos, como o "Caixeiro Viajante", que envolvem um grande número de variáveis e, conseqüentemente, espaços de soluções de dimensões elevadas. Além disso, em muitos casos onde outras estratégias de otimização falham na busca de uma solução, os AG's convergem. Os AG's não são sensíveis a erros de arredondamento no que se refere aos seus resultados finais.

### Outras Vantagens dos Algoritmos Genéticos

- São robustos e aplicáveis a uma grande variedade de problemas.
- Não requerem conhecimentos ou informações dos gradientes da superfície definida pela função objetivo.
- Descontinuidades ou complexidades presentes na superfície acarretam pouco ou nenhum efeito no desempenho da busca.

- São mais resistentes a se prenderem a ótimos locais.
- Apresentam um bom desempenho para uma grande escala de problemas.
- São de implementação fácil e proporcionam maior flexibilidade no tratamento do problema a ser resolvido.

#### **Desvantagens dos Algoritmos Genéticos**

- Dificuldade para achar o ótimo global exato.
- Requerem um grande número de avaliação de funções (de aptidão).
- Grandes possibilidades de configurações, podendo complicar a resolução (Castro, 1999).

### **2.5.1 Estratégias Empregáveis aos Algoritmos Genéticos**

#### **Hibridização**

Uma alternativa para melhorar o funcionamento dos Algoritmos Genéticos é a hibridização (Eldred e Yang *et al*, 1998), que visa acoplar algoritmos distintos com o intuito de tirar o melhor proveito de cada um deles. Deste modo, é possível acoplar-se aos Algoritmos Genéticos, por exemplo, qualquer outro método matemático para efetuar uma busca local mais agressiva. Esta alternativa híbrida resultante apresenta a capacidade de exploração global da região viável, tendo ainda aumentada sua eficiência nas buscas locais.

Pelas suas características de robustez, flexibilidade e relativa facilidade de implementação, os Algoritmos Genéticos irão ganhar uma maior atenção com o decorrer do tempo, principalmente, pela rápida evolução dos computadores que tornarão as aplicações da técnica cada vez mais viáveis e engenhosas.

Para os próximos anos um maior número de alternativas "mistas" da idéia genética com outras estratégias, que lhe agreguem novas capacidades, serão desenvolvidas, aprimoradas e difundidas no meio técnico, aumentando o leque de aplicações e trazendo novos benefícios na resolução dos problemas já tratados.

Outras sofisticções têm sido desenvolvidas e incorporadas aos Algoritmos Genéticos para aumentarem suas potencialidades, tais como: Adaptação e Distribuição Uniforme da População Inicial.

Para os problemas de otimização, as vantagens da utilização dos Algoritmos Genéticos são consideráveis, principalmente pela sua versatilidade na obtenção de soluções ótimas globais, enquanto que suas desvantagens serão sanadas por uma maior consolidação da técnica e pelo desenvolvimento de maiores capacidades computacionais.

## 2.6 O Método Simplex

Em vários domínios de aplicação, há modelos matemáticos com a seguinte estrutura:

- Um conjunto de “ $n$ ” variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ;
- Um conjunto de “ $m$ ” condições lineares ( $m < n$ ) relacionando as variáveis por meio de desigualdades do tipo  $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$ ;
- Uma função linear  $f(X) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$  da qual se pretende determinar o Máximo ou Mínimo;
- A condição de não negatividade das variáveis  $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$ .

Este tipo de modelo denominado Modelo de Programação Linear, pode ser generalizado relativamente ao sentido das desigualdades e ao domínio das variáveis.

O matemático George Dantzig, em 1947, estabeleceu uma forma sistemática de resolução do modelo de programação linear recorrendo à teoria das equações lineares, ao conceito de independência de vetores e à álgebra matricial. Nesta seção, serão abordados os aspectos essenciais para compreender o método simplex<sup>2</sup>.

O Problema de Programação Linear (PPL) é o problema de Otimização onde se deseja minimizar (ou maximizar) uma função objetivo linear em um vetor de variáveis de decisão sujeito a restrições também lineares.

O primeiro algoritmo efetivo desenvolvido para resolver um PPL foi o simplex, publicado por Dantzig em 1951. Klee e Minty estabeleceram, em 1972, que o algoritmo simplex tem complexidade exponencial para um certo critério de escolha para a entrada na base. Apesar disto, ainda hoje o método simplex é bastante utilizado na prática, devido o seu bom desempenho computacional.

---

<sup>2</sup> <http://det.uai.pt/io1/pl.html>.

### 2.6.1 O Problema de Programação Linear

Essencialmente, esse método resolve um problema de programação linear na sua forma padrão, ou seja:

$$\text{Min } f = c^T x \quad (\text{Equação 7})$$

tal que,

$$Ax = b, \quad x \geq 0$$

onde  $c$  é um vetor  $n \times 1$ ,  $A$  é uma matriz  $m \times n$  e  $b$  é um vetor  $m \times 1$ . A princípio essa formulação parece não representar o exemplo resolvido acima, no entanto fazendo uso de variáveis auxiliares (ou "slack", em inglês), outros problemas podem ser representados.

Conforme (Silva, 2004), uma vez transformado o problema inicial de PL que se deseja resolver na forma padrão acima, o algoritmo inicia a solução do problema através do método Simplex. Note no problema da forma padrão que se,  $m = n$  e todas as equações são linearmente independentes, há uma única solução para o sistema; se  $m > n$  não há solução (a menos que as equações sejam linearmente dependentes), pois o sistema de equações é inconsistente; é somente quando  $m < n$  que temos várias soluções possíveis para o problema e entre todas essas soluções o Simplex procura a solução que satisfaz a restrição de não negatividade ( $x \geq 0$ ) e minimize a função objetivo  $f$ .

### 2.6.2 Características do Algoritmo Simplex

- Formado por um grupo de critérios para escolha de soluções básicas que melhorem o desempenho do modelo, e também de um teste de otimalidade;
- O problema deve apresentar uma solução básica inicial;
- As soluções básicas subseqüentes são calculadas com a troca de variáveis básicas por não básicas, gerando novas soluções;
- Os critérios para escolha de vetores e conseqüentemente das variáveis que entram e saem para a formação da nova base constituem o centro do simplex;

- Os modelos com restrições do tipo  $\leq$  e com termos da direita não negativos têm uma solução básica formada pelas variáveis de folga<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> <http://www.cardoso.eti.br/aula007.htm>

## Capítulo 3

### Apresentação do Problema e Análise dos Resultados

#### 3.1 Apresentação do Problema

No novo método aqui mencionado, as tarifas de uso são modificadas, adicionando-se ajustes variados em todas as tarifas nodais, obtidos utilizando-se AG, levando-se em consideração o nível de carregamento de cada linha do sistema. Ou seja, o diferencial entre a metodologia aplicada atualmente e a metodologia aqui proposta: as barras mais carregadas terão ajustes maiores, e conseqüentemente, às barras menos carregadas, serão atribuídos os menores ajustes.

A nova técnica consiste em alocar devidamente os custos de investimento do sistema de transmissão entre os participantes do grupo satisfazendo critérios como, garantia da qualidade técnica do suprimento de carga, facilidade de regulamentação, transparência no procedimento de alocação de custos e outros. Todos os usuários devem ter uma contribuição positiva para esta complementação da remuneração, levando-se em consideração o nível de carregamento que determinado usuário provoca no sistema de transmissão.

A técnica aqui proposta, baseada em AG, foi implementada e utilizou-se o exemplo numérico, um sistema de transmissão mais simples, citado em Jesus (2002) para a obtenção da suplementação das tarifas. O método de otimização Simplex foi utilizado para validação dos resultados obtidos utilizando-se este mesmo sistema.

Os fluxos de potência foram obtidos a partir de um programa de fluxo de carga linear, sem considerar as perdas. Tais resultados foram obtidos, utilizando-se as matrizes de incidência, diagonal de admitâncias e a matriz  $\beta$ . O sistema de transmissão utilizado é apresentado na Figura 3.

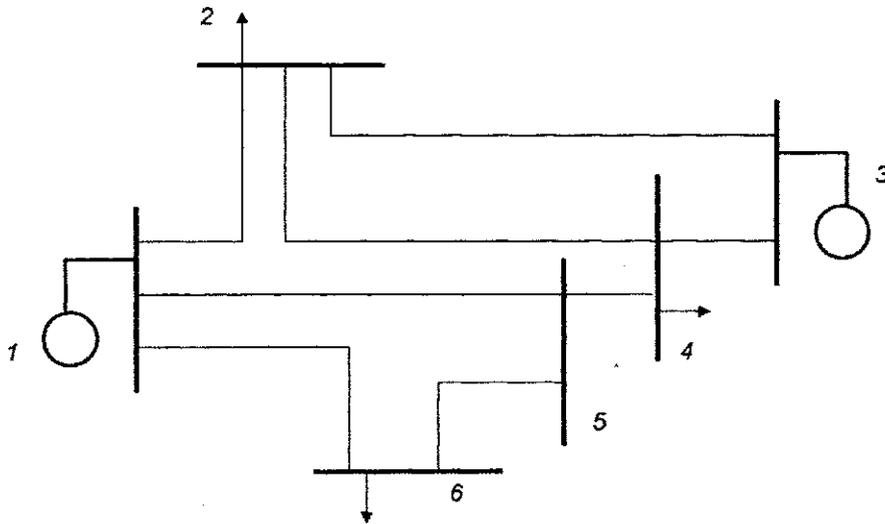


Figura 3 – Sistema de transmissão teste de seis barras.

O fluxo de potência ativa em um ramo é aproximadamente proporcional à abertura angular da linha ( $\theta_{km}$ ) e se desloca no sentido dos ângulos maiores para os ângulos menores ( $P_{km} > 0$  se  $\theta_k > \theta_m$ ):

$$\begin{aligned}
 P_{km} &\approx k_1 \cdot \theta_{km} \\
 &\approx \frac{1}{x_{km}} (\theta_k - \theta_m)
 \end{aligned}
 \tag{Equação 8}$$

Essa relação de proporção é do mesmo tipo da existente entre os fluxos de corrente e as quedas de tensão em um circuito c.c., por isso, esse modelo é também conhecido como *fluxo de carga c.c.*

O fluxo de carga c.c. é baseado no acoplamento das variáveis  $P$  e  $\theta$  (potência ativa/ângulo). Esse acoplamento é tanto maior quanto maiores forem os níveis de tensão da rede, já que os fluxos de potência dependem significativamente das magnitudes das tensões.

Os fluxos de potência ativa em uma linha de transmissão que conecta as barras  $k$  e  $m$  são:

$$\begin{cases} P_{km} = V_k^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \cos \theta_{km} + b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \\ P_{mk} = V_m^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m \cdot (g_{km} \cdot \cos \theta_{km} - b_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \end{cases} \quad (\text{Equação 9})$$

Sabe-se que as perdas de transmissão na linha são dadas por:

$$P_{km} + P_{mk} = g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (\text{Equação 10})$$

Se os termos correspondentes às perdas forem desprezados nas expressões de  $P_{km}$  e  $P_{mk}$ , ter-se-á:

$$P_{km} = -P_{mk} = -V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \text{sen} \theta_{km} \quad (\text{Equação 11})$$

Considerar as seguintes aproximações:

$$\begin{aligned} V_k &\approx V_m \approx 1 \text{ pu} \\ \theta_{km} \text{ pequeno} &\Rightarrow \text{sen} \theta_{km} \approx \theta_{km}; \quad \cos \theta_{km} \approx 1 \\ r_{km} \ll x_{km} &\Rightarrow b_{km} \approx -\frac{1}{x_{km}}; \quad g_{km} \approx 0 \end{aligned} \quad (\text{Equação 12})$$

Os fluxos de potência aproximados ficam:

$$P_{km} = -P_{mk} = x_{km}^{-1} \theta_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad (\text{Equação 13})$$

A matriz  $\mathbf{B}'$  é singular, pois, como as perdas de transmissão foram desprezadas, a soma dos componentes de  $\mathbf{P}$  é nula, ou seja, a injeção de potência em uma barra qualquer pode ser obtida a partir da soma algébrica das demais. Para resolver esse problema, deve-se adotar uma das barras da rede como *referência angular (barra de referência)*. Essa barra

terá seu ângulo de fase conhecido (normalmente igual a zero). O sistema passa a ter  $n - 1$  incógnitas para  $n - 1$  equações. Então a matriz  $\mathbf{B}'$  terá dimensão  $[(n - 1) \times (n - 1)]$ .

A equação de potência ativa referente à barra é eliminada e o valor da injeção é determinado através da aplicação da *Lei das Correntes de Kirchhoff* após o estado da rede (vetor  $\theta$ ) ser obtido. Os ângulos das  $n - 1$  barras restantes podem ser determinados a partir das injeções de potência especificadas nessas  $n - 1$  barras.

No caso de um sistema no qual além de linhas de transmissão, existem também transformadores em fase e defasadores, duas observações devem ser feitas: em primeiro lugar, quanto à formação da matriz dos coeficientes  $\mathbf{B}'$ . Transformadores em fase e defasadores são tratados da mesma forma que as linhas de transmissão na formação da matriz de  $\mathbf{B}'$ , ou seja, a regra de formação dessa matriz é a mesma para os três tipos de componentes. Em segundo lugar, quanto ao vetor  $\mathbf{P}$ , deve-se levar em conta, em sua formação, a existência das injeções equivalentes utilizadas na representação de defasadores.

O modelo de fluxo de carga é tal que permite a seguinte analogia entre a rede e um circuito c.c.: a relação  $\mathbf{P} = \mathbf{B}' \cdot \theta$  pode ser interpretada como o modelo de uma rede de resistores alimentada por fontes de corrente contínua, em que  $\mathbf{P}$  é o vetor das injeções de corrente,  $\theta$  é o vetor das tensões nodais e  $\mathbf{B}'$  é a matriz admitância, ou condutância, nodal.

Todas as propriedades aplicadas para circuitos em c.c. podem ser utilizadas no modelo linearizado da rede de transmissão, facilitando o seu entendimento.

A única condição para que o modelo c.c. forneça uma solução, é que a matriz  $\mathbf{B}'$  seja singular.

Para redes que apresentam perdas elevadas o modelo c.c. pode resultar em erros consideráveis devidos à não consideração das perdas de potência ativa na transmissão e da conseqüente redução da geração da barra de referência, por isso esses erros aparecem especialmente para os ramos próximos da barra de referência.

Os elementos do vetor de perdas de potência ativa dependem dos ângulos de fase nodais, que são justamente as incógnitas do problema.

O problema de fluxo de carga usando o modelo linearizado consiste então apenas na resolução do sistema de equações desprezando as perdas:

$$P = B' \cdot \theta' \quad (\text{Equação 14})$$

Após o estudo do modelo de fluxo de carga linearizado, percebe-se uma grande semelhança entre ele e o Método Desacoplado Rápido de Newton. Semelhantes não só pela simplicidade e facilidade de lidar, mas também por ambos trabalharem com a matriz de susceptâncias  $B'$ . Essa matriz, por depender somente de parâmetros da rede (reatâncias das linhas de transmissão), se mantém constante durante todo o processo em ambos métodos, o que é muito importante e conveniente para se chegar a uma solução mais rapidamente do que em outros métodos.

O fluxo de carga linearizado não substitui o fluxo de carga não linear (c.a.) pois não leva em conta as magnitudes das tensões nodais, as potências reativas e os *taps* dos transformadores, mas tem grande utilidade em etapas preliminares de estudos de planejamento da expansão de redes elétricas assim como na classificação de cenários de operação com relação a violações de limites operacionais (análise de segurança). Assim, ao se implementar este problema considerando-se o fluxo de carga não linear, utilizando-se AG's, os resultados obtidos serão mais robustos em relação ao método simplex já que este método não abrange o aspecto da não-linearidade, impossibilitando sua resolução por meio desta técnica.

As informações necessárias para o modelamento do problema e implementação da abordagem por AG's e simplex são as seguintes:

- fluxos de potência linearizados do sistema;
- características da rede utilizada;
- parâmetros gerais usados para calcular as tarifas ajustadas.

Na Tabela I, são apresentados os valores das resistências e reatâncias correspondentes a cada linha do sistema, bem como, o custo anual de cada uma e sua capacidade nominal.

TABELA I – Dados do sistema de transmissão utilizado no exemplo numérico.

Linha	R(%)	X(%)	Custo anualizado (R\$)	F <sub>max.</sub> (MW)	Custo/ F <sub>max.</sub>
1-2	1,4	10,4	140	70	2,000
2-3	1,2	9,1	120	23	5,217
3-4	0,8	4,5	80	90	0,889
4-5	1,6	13,1	160	50	3,200
5-1	1,3	8,8	130	50	2,600
2-4	0,9	6,1	90	50	1,800
6-1	1,0	7,0	100	60	1,667
5-6	0,7	7,5	70	30	2,333

Os parâmetros gerais, usados para calcular as tarifas ajustadas são:

- Valor da Receita Total a ser coberta: R\$1.000,00;
- Receita devida aos geradores: 30% (R\$300,00);
- Receita devida às cargas: 70% (R\$700,00);
- Carregamento crítico nos transformadores e linhas: 80% de sua capacidade nominal,

ou seja,  $F_i = 0.8 \cdot F_{max.}$

### 3.1.1 Matriz Sensibilidade e Fluxo de Potência DC

As Tabelas a seguir, ilustram as matrizes utilizadas para se obter os resultados finais dos fluxos, com a barra 3 sendo a de referência.

A matriz de incidência E, mostrada na Tabela II indica a presença e o sentido dos fluxos nas linhas do sistema. O fluxo saindo da barra é indicado pelo sinal positivo e o fluxo entrando na barra é indicado pelo sinal negativo.

TABELA II – Matriz de Incidência (Matriz E)

BARRA	LINHA							
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-1	2-4	6-1	5-6
1	1				-1		-1	
2	-1	1				1		
4			-1	1		-1		
5				-1	1			1
6							1	-1

A matriz diagonal de admitância, matriz B, mostrada na tabela III, foi obtida com base nos dados da rede utilizada como exemplo através da equação:

$$Y = -\text{Im} \left( \frac{1}{R(\%) + jX(\%)} \right) \quad \text{(Equação 15)}$$

A matriz B é diagonal, característica dos próprios cálculos do fluxo DC linearizado, pois o interessante é o resultado da admitância na própria barra.

TABELA III – Matriz diagonal de admitância (Matriz B).

	1-2	2-3	3-4	4-5	5-1	2-4	6-1	5-6
1-2	0,094							
2-3		0,1080						
3-4			0,215					
4-5				0,0752				
5-1					0,1112			
2-4						0,1604		
6-1							0,1400	
5-6								0,1322

A matriz  $\beta$  representa o fluxo de carga do sistema, com todas as contribuições de cada linha, por barra e, é obtida por meio de:

$$\beta = \left[ B E' (E B E')^{-1} \right] \quad (\text{Equação 16})$$

TABELA IV – Matriz  $\beta$ 

LINHA	BARRA				
	1	2	4	5	6
1-2	0,602	-0,085	0,043	0,436	0,521
2-3	0,417	0,514	0,244	0,366	0,392
3-4	-0,583	-0,486	-0,756	-0,634	-0,608
4-5	-0,398	-0,085	0,043	-0,564	-0,479
5-1	-0,247	-0,053	0,026	0,271	0,004
2-4	0,185	0,401	-0,201	0,071	0,129
6-1	-0,151	-0,032	0,016	0,166	0,517
5-6	-0,151	-0,032	0,016	0,166	-0,483

TABELA V – Vetor  $\eta$  (representa as injeções líquidas de fluxo nas linhas do sistema)

BARRA	g (geração despachada)	d (carga despachada)	$\eta = (g-d)$
1	140	0	140
2	0	60	-60
3	100	0	100
4	0	130	-130
5	0	0	0
6	0	50	-50

O valor de C na Tabela VI, corresponde ao nível de carregamento de cada linha dado pela equação abaixo:

$$C = E \left[ \left( \frac{Fl}{F_i} \right)^x \right] \quad (\text{Equação 17})$$

A equação (17), leva em consideração o nível de carregamento de determinado elemento entre barras adjacentes, assim como a direção do fluxo, que multiplicará esta diferença, entre as tarifas de barras adjacentes.

Portanto, o uso de determinado elemento do sistema devido a uma injeção marginal no sentido contrário ao fluxo predominante receberá o incentivo em termos de uma menor contribuição para o ajuste da tarifa. Este incentivo diminui na proporção em que o elemento se torna mais carregado. Quando este elemento está em sobrecarga, sua contribuição para o ajuste da remuneração torna-se maior.

Uma possível função para modelar este fator pode ser expresso como a relação entre o fluxo e o nível de carregamento máximo, quando esta relação é maior que a unidade.

O expoente  $x$  expressa a acentuação do nível de carregamento baseado em uma heurística que permite extremizar as linhas quanto ao seu nível de carregamento, e deste modo, se  $F_i > F_{i,c}$ , faz-se  $x=3$ , mas se  $F_i \leq F_{i,c}$ ,  $x=1$ . Veja os resultados na Tabela VI.

TABELA VI – Resultados finais do fluxo DC

LINHA	FLUXO DC ( $\beta\eta$ )	$F_i$ (Carregamento crítico)	Fluxo Dc/ $F_i$	Valor de C
1-2	57,71	56,0	1,03	1,095
2-3	-23,77	18,4	-1,29	-2,155
3-4	76,23	72,0	1,06	1,187
4-5	-32,29	40,0	-0,81	-0,807
5-1	-35,11	40,0	-0,88	-0,878
2-4	21,48	40,0	0,54	0,537
6-1	-47,18	48,0	-0,98	-0,983
5-6	2,82	24,0	0,12	0,117

Os resultados do fluxo de potência são ilustrados na Figura 2, assim como os valores máximos e contratados da demanda das cargas, e os valores de despacho e de capacidade dos respectivos geradores.

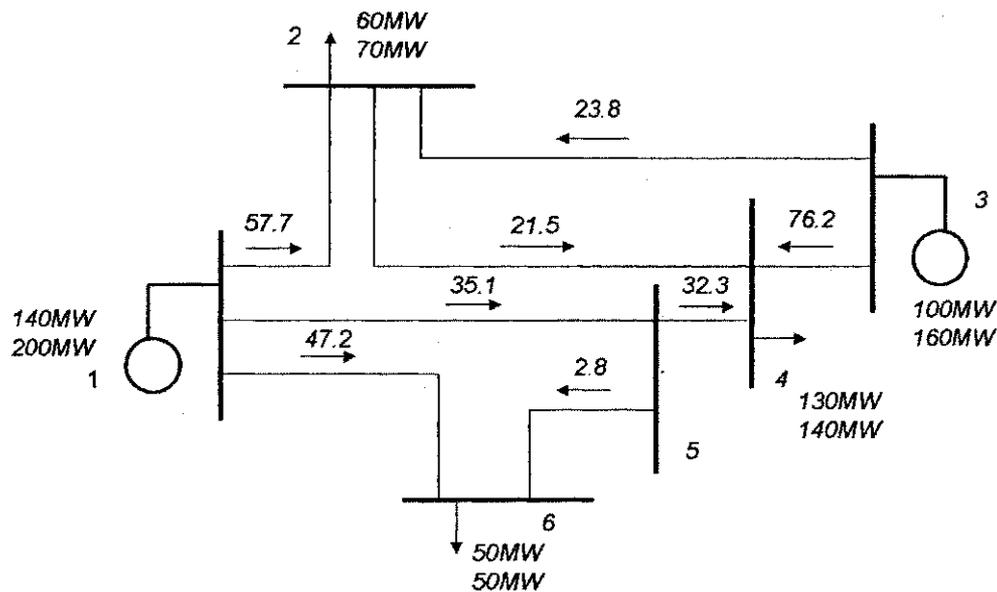


Figura 4 – Resultados do fluxo DC para o sistema de transmissão teste de seis barras.

### 3.1.2 Cálculos das Tarifas Nodais

As contribuições para o cálculo da tarifa nodal por barra, devido a cada linha do sistema são obtidas utilizando-se:

$$\pi_i = \sum_{j=1}^n \frac{\text{Custo}_{ij}}{F_{\max.ij}} \cdot \beta_{ij}, \quad i = 1, n \quad (\text{Equação 18})$$

$i$  - nº da barra do sistema;

$ij$  - linha do sistema;

Custo - custo anual de cada linha;

$\pi$  - tarifa nodal;

$F_{\max.}$  - corresponde à capacidade nominal de cada linha;

$\beta_{ij}$  - contribuição do fluxo de carga referente àquela linha.

TABELA VII – Contribuições para o cálculo da tarifa (sem ajustes) por barra, devido a cada linha do sistema.

LINHA	BARRA				
	1	2	4	5	6
1-2	1,203	-0,170	0,085	0,873	1,043
2-3	-2,175	-2,681	-1,272	-1,908	-2,045
3-4	-0,518	-0,432	-0,672	-0,564	-0,540
4-5	1,275	0,272	-0,136	1,804	1,532
5-1	0,643	0,137	-0,069	-0,704	-0,011
2-4	0,333	0,722	-0,362	0,127	0,233
6-1	0,252	0,054	-0,027	-0,276	-0,862
5-6	-0,353	-0,075	0,038	0,386	-1,127

Na Tabela VIII, encontram-se os valores das tarifas nodais, as quais devem ser ajustadas de modo a se obter o valor total da receita (tarifas nodais geradas pelo método utilizado atualmente - ICRP). As tarifas nodais serão então, ajustadas, usando-se uma parcela aditiva a elas, levando-se em conta o nível de carregamento de cada barra. Ou seja, os ajustes deverão totalizar o valor que falta para cobrir a receita total. Portanto, para a geração este valor corresponde a *R\$168,00* (o que falta para os *R\$300,00*) e para carga, *R\$121,70* (o que falta para os *R\$700,00*).

Nesta Tabela também são ilustrados os valores das capacidades de cada barra e os respectivos encargos de cada uma. Tais encargos são obtidos ao multiplicarmos a tarifa de cada barra pela sua respectiva capacidade instalada de geração ou demanda máxima. De acordo com a Tabela, concluímos que a receita total não foi atendida e, portanto, a metodologia marginal não recupera a receita esperada.

TABELA VIII - Tarifas nodais sem ajustes.

Barra	Tarifa Nodal (RS/MW)	Capacidade (MW)	Encargos (RS)
1	0,66	200	132,00
2	2,17	70	151,90
3	0,00	160	0,00
4	2,41	140	337,40
5	0,26	0	0,00
6	1,78	50	89,00
<b>TOTAL</b>			<b>710,30</b>

### 3.2 Suplementação na Tarifação do Uso do Sistema de Transmissão utilizando Algoritmos Genéticos

As tarifas nodais serão ajustadas então, de modo a se obter a receita total esperada, usando-se uma parcela aditiva às tarifas nodais na Tabela VIII. Ou seja, os ajustes deverão totalizar o valor que falta para cobrir a receita total. Aqui estes ajustes serão encontrados utilizando-se AG's e o método de otimização Simplex.

#### 3.2.1 Variáveis do problema e Codificação

Para a implementação do algoritmo, utilizou-se a codificação decimal para representar cada indivíduo (Bobel, 2001). Cada uma das seis barras é uma variável do problema que complementará a receita total esperada.

Desta forma, no caso do AG, definiu-se que cada cromossomo (possível solução do problema) terá seis genes (nº de barras do sistema), cada uma representando o determinado ajuste referente àquela barra, levando-se em consideração o nível de carregamento em cada linha. A Tabela a seguir ilustra um exemplo de cromossomo utilizado para cálculo dos ajustes.

Tabela IX. Exemplo de cromossomo utilizado para cálculo dos ajustes.

Barra	1	2	3	4	5	6
Ajustes nas Tarifas	0,266	0,70	0,68	0,38	0,11	0,29

### 3.2.2 Restrições

Nesta primeira abordagem, definiu-se duas restrições importantes no problema, para que fosse possível verificar as características de convergência (Bretas, 2000). A primeira delas é que o valor total da receita fosse atendido pelo sistema, levando-se em consideração as parcelas referentes à carga e geração.

A outra restrição e talvez o diferencial deste trabalho em relação aos outros métodos é a questão da ordenação dos ajustes calculados, onde os maiores devem ser alocados nas barras mais carregadas, e assim sucessivamente.

### 3.2.3 Função objetivo e de *fitness*

A natureza do problema é de minimização da função objetivo, onde deseja-se estimar os ajustes das tarifas, levando-se em consideração o nível de carregamento em cada linha, e portanto, considerou-se como função objetivo, a equação (19):

$$\sum_{n=1}^j C_n' \cdot \pi_n', \quad (\text{Equação 19})$$

levando-se em consideração a parcela da receita que deve ser atendida,

$$\sum_{n=1}^j A_n \cdot \pi_n' = R' \quad (\text{Equação 20})$$

em que:

$j$  - nº de barras do sistema;

$C$  - nível de carregamento nas linhas;

$\pi'$  - ajuste que deve ser minimizado.

$A$  - corresponde à capacidade de cada barra,

$R'$  - é a parcela da receita que deve ser atendida para que a receita que remunera o custo total do sistema de transmissão seja arrecadada.

O resultado do somatório na equação (19) deve ser o menor possível, atendendo a parcela da receita em questão e a ordenação dos maiores ajustes com as barras mais carregadas.

O custo total que deve ser arrecadado através dos encargos, foi estimado em R\$ 1.000,00. O valor obtido com as tarifas nodais foi de aproximadamente R\$ 710,30. Dessa forma, os ajustes calculados devem recuperar a diferença de R\$ 289,70 (geração e carga).

No caso do AG, para que se possa observar melhor a evolução da solução ao longo das gerações, considerando todas as restrições do problema, a função *fitness* final é definida pela equação (20), com base na função objetivo anteriormente definida (equação 19).

$$f = \left( \sum_{n=1}^j C_n' \cdot \pi_n' \right) + \left( \sum_{n=1}^j A_n \cdot \pi_n' - R' \right) \cdot F(g) \quad (\text{Equação 21})$$

em que a função  $F(g)$  é uma função penalidade relacionada à ordenação dos ajustes.

A função *fitness* final avalia cada cromossomo a cada nova geração. Esta função foi elaborada de modo que o somatório dos ajustes em cada barra, multiplicados pelo vetor  $C$ , seja minimizado (equação 19). Simultaneamente, o somatório dos ajustes multiplicados pela capacidade de cada barra, deve ser igual a parcela da receita que complementa a receita total (equação 20).

A cada nova geração, cada cromossomo é avaliado gene por gene, e quanto maior o nº de genes desordenados naquele determinado indivíduo, maior sua penalização, reduzindo assim, suas chances de sobrevivência na população nas próximas gerações (Correa, 2001). A cada gene desordenado, ou seja, a cada ajuste maior associado a uma

barra menos carregada, a função  $F(g)$  é acrescida do fator 0.2 e posteriormente, concluída a análise naquele determinado cromossomo, o valor final de  $F(g)$  multiplicará a função *fitness* correspondente àquele indivíduo. Quanto maior o nº de genes desordenados naquele cromossomo, maior a função  $F(g)$  e, quanto maior  $F(g)$ , maior a função *fitness*. Quanto maior a função *fitness*, menores são as chances daquele indivíduo sobreviver. Isto acarreta ajustes ordenados de acordo com o nível de carregamento nas linhas, ou seja, os maiores ajustes são associados às barras mais carregadas. Desta forma, só permanecerão aqueles indivíduos que atenderem a esta restrição. O objetivo final da implementação é obter o valor da receita total, de forma que todos os usuários paguem pelo uso do sistema.

### 3.2.4 Parâmetros do algoritmo genético implementado

O número de indivíduos da população de soluções foi estabelecido em 100, com cromossomos de seis genes (nº de barras do exemplo) e o critério de parada do algoritmo foi o alcance de um nº superior de gerações a 200. O gene de cada cromossomo representa o ajuste por barra a ser minimizado. Daí então, o algoritmo segue a cada geração, etapa por etapa, até chegar ao resultado final.

O método de seleção utilizado foi o método da roleta.

O método da roleta utiliza o seguinte procedimento:

- Calcule a aptidão acumulada para todos os indivíduos da população.
- Gere um número aleatório  $a$  no intervalo  $[0,n]$ .
- O cromossomo selecionado será o primeiro cromossomo cuja aptidão acumulada for maior que  $a$ .

Desta maneira, este método prioriza os cromossomos com maior aptidão (Pimentel, 2001).

A função aptidão,  $f_{ap(i)}$  do método da roleta é dada pela equação (22):

$$f_{ap}(i) = \frac{2(n-i)}{n-1} \quad (\text{Equação 22})$$

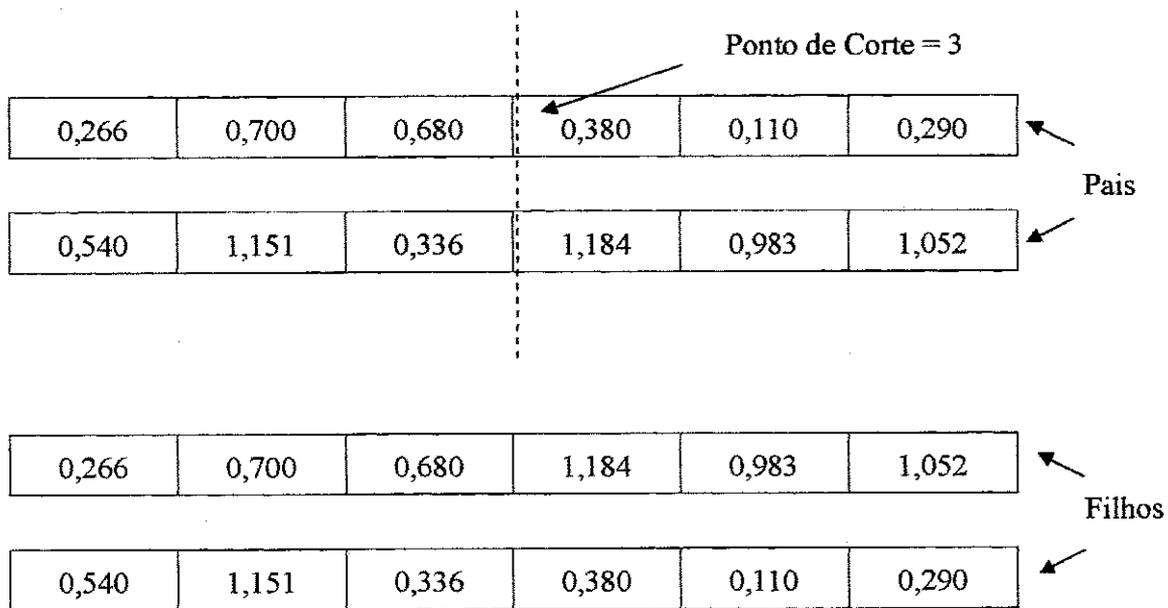
em que  $n$  é o número de indivíduos na população.

O próximo passo é o cálculo da função de aptidão acumulada. Esta função representa o valor acumulado da função de aptidão:

$$f_{ac}(i) = f_{ap}(i) + f_{ac}(i-1) \tag{Equação 23}$$

em que novamente 'i' varia de 1 a 'n'. Os valores dados pela função de aptidão acumulada variam de 2 a n e também são associados aos indivíduos da população (Ferreira, Helvio A., 2002). Os cálculos da função de aptidão e função de aptidão acumulada são feitos uma única vez na implementação computacional.

Os operadores genéticos utilizados foram os tradicionais, cruzamento de um ponto e mutação de um gene. A operação genética de cruzamento realiza-se com a probabilidade de 0.55 e de forma que, a cada dois cromossomos da correspondente população, caso o cruzamento seja concedido, gera-se um número inteiro aleatório entre 1 o número total de barras do sistema -1. Este número inteiro gerado indica o ponto de corte onde ocorrerá o cruzamento entre os dois cromossomos selecionados, conforme ilustrado na figura 5.



**Figura 5 – Cruzamento entre dois indivíduos.**

O processo de mutação ocorre analogamente ao processo de cruzamento, com algumas particularidades características do processo. Esta operação genética em si, se restringe a um único cromossomo previamente selecionado de acordo com a taxa de probabilidade de mutação, que neste caso é de 0.02. Na ocorrência da mutação, gera-se um número inteiro aleatório, entre 1 e o número total de barras do sistema (tamanho do cromossomo), que indicará o gene a ser modificado e assim, um novo valor de ajuste é calculado para modificar o antigo gene. Neste caso, deve-se ter uma preocupação com os limites do número a ser gerado, o qual deve atender as necessidades específicas do problema. Neste caso em particular, os genes gerados desde a população inicial devem estar entre 0.8 e 1.5 de forma a tender os objetivos do problema.

Assim, todo este processo de otimização consiste em criar uma população de cromossomos, avaliá-la, selecionar os melhores por um processo simples e uniforme com probabilidade de cada cromossomo proporcional ao valor de sua função de aptidão e por fim, a manipulação genética para criação de uma nova população de indivíduos. Terminado este ciclo, reinicia-se todo o processo até obter o melhor resultado final da função objetivo em questão (Ferreira, 2002). Cada vez que este ciclo se completa uma geração ocorreu.

### 3.2.5 Implementação Computacional do AG: Simulações e Resultados

Para a implementação computacional, escolheu-se o ambiente MATLAB. Dentre outros recursos, apresenta ferramentas de fácil manipulação de matrizes e vetores.

O programa desenvolvido utiliza-se do processo de desenvolvimento evolutivo e aleatório, características essas, do método aqui utilizado: AG.

O objetivo final da implementação é obter o valor da receita total em questão, de forma que todos os usuários paguem pelo uso do sistema, levando-se em consideração o nível de carregamento de cada barra (valor de C).

Os dados de entrada no programa são os números de barras de geração e de carga e, quais são as barras de geração e carga, respectivamente, bem como os valores das receitas a serem atendidas (carga e geração).

No caso do AG, a capacidade das barras e o valor de C são lidos em um arquivo.dat enquanto que, no caso da implementação utilizando o método simplex, o

conjunto de polinômios é montado em um outro arquivo.dat. Ambos independentes dos programas implementados e necessários para a execução dos algoritmos.

No AG, o programa cria inicialmente uma população de  $n$  cromossomos saudáveis e, a partir daí, trabalha-se com estes indivíduos e seus descendentes até que se obtenha uma solução ótima para o problema.

Ao longo das gerações, o tamanho da população não é alterado e a avaliação de todos os indivíduos é feita através da equação (21). Em seguida, os indivíduos da população são arranjados em ordem crescente, de acordo com a avaliação realizada previamente, partindo-se do indivíduo mais bem adaptado para o menos adaptado.

Após a seleção de todos os cromossomos para a população temporária, parte-se para as etapas do cruzamento, seguindo-se da etapa da mutação.

Todas estas etapas ocorrem repetidamente até que o número máximo de gerações seja atingido e tenha se obtido o resultado final.

O fluxo de carga para gerar as características próprias do sistema (matriz E, matriz B, matriz  $\beta$ , etc.) também foi implementado inicialmente na mesma rotina.

### **3.2.5.1 Suplementação utilizando AG's**

Alguns dos resultados obtidos utilizando suplementação com AG's, estão sumarizados na Tabela X, onde se mostra para cada barra, o valor dos ajustes calculados, o nível de carregamento, as tarifas nodais e a receita máxima arrecadada.

TABELA X Resultados obtidos com AG's.

Barra	C	Tarifas Nodais	Simulação 1	Simulação 2
1	2,96	0,66	0,266102	0,344285
2	2,71	2,17	0,7	0,7
3	3,34	0,00	0,685587	0,589714
4	2,53	2,41	0,381409	0,379401
5	0,046	0,26	0,105401	0,234703
6	1,1	1,78	0,293754	0,312526
<b>RECEITA TOTAL (R\$)</b>			<b>997,999</b>	<b>998,954</b>

### 3.3 Suplementação na Tarifação do Uso do Sistema de Transmissão utilizando o Método Simplex

Conforme apresentado no capítulo anterior, observa-se que o problema aqui discutido e analisado enquadra-se perfeitamente na forma padrão de programação linear, especificamente, um problema de otimização a ser facilmente resolvido utilizando o Método Simplex, um método clássico.

Percebe-se que o problema pode ser escrito na forma padrão de um problema de programação linear, ou seja:

$$\text{Min} \sum_{n=1}^j C'_n \cdot \pi'_n, \quad (\text{Equação 24})$$

tal que,

$$A_1 \cdot \pi'_1 + A_3 \cdot \pi'_3 \leq R'_g$$

e,

$$A_2 \cdot \pi_2' + A_4 \cdot \pi_4' + A_5 \cdot \pi_5' + A_6 \cdot \pi_6' \leq R_c,$$

$$\pi_n' > 0$$

em que:

C - nível de carregamento nas linhas;

$\pi_n'$  - ajuste que deve ser minimizado;

$R_c'$  - é a parcela complementar referente à carga;

$R_g'$  - é a parcela complementar referente à geração;

$A_n$  - corresponde à capacidade de cada barra.

Assim, implementou-se tal questão utilizando como método de otimização, o Método Simplex, a fim de validar o desempenho do método proposto utilizando-se AG.

Entretanto, para se levar em consideração o nível de carregamento de cada barra, ou seja, maiores ajustes com as barras mais carregadas e igualar o número de variáveis ao número de equações, foi necessário adicionar as seguintes restrições:

$$\pi_1' < \pi_3'$$

$$\pi_2' > \pi_4'$$

$$\pi_4' > \pi_5'$$

$$\pi_5' > \pi_6'$$

visto que,

$$A_1 < A_3$$

$$A_2 > A_4$$

$$A_4 > A_5$$

$$A_5 > A_6$$

A redução da restrição técnica do tipo  $\leq$ , à forma de igualdade faz-se pela introdução de uma variável não negativa com coeficiente unitário (variável de folga).

Assim, o sistema completo, introduzindo-se as variáveis de folga, necessárias e próprias do método simplex, corresponde ao seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned}
 A_1 \cdot \pi_1 + A_3 \cdot \pi_3 + F_1 &= R_g \\
 A_2 \cdot \pi_2 + A_4 \cdot \pi_4 + A_5 \cdot \pi_5 + A_6 \cdot \pi_6 + F_2 &= R_c \\
 \pi_3 - \pi_1 + F_3 &= 0,1 \\
 \pi_2 - \pi_4 + F_4 &= 0,1 \\
 \pi_4 - \pi_5 + F_5 &= 0,1 \\
 \pi_5 - \pi_6 + F_6 &= 0,1
 \end{aligned}
 \tag{Equação 25}$$

pois,

$$\pi_n > 0$$

### 3.3.1 Suplementação utilizando o método simplex

Os resultados obtidos, utilizando suplementação com método simplex, estão sumarizados na Tabela XI.

Tabela XI Resultados obtidos com o Método Simplex

Barra	Nível de Carregamento (C)	Tarifas Nodais	Ajustes
1	2,96	0,66	0,4094
2	2,71	2,17	0,5637
3	3,34	0,00	0,5094
4	2,53	2,41	0,4637
5	0,046	0,26	0,3637
6	1,1	1,78	0,2637
<b>RECEITA TOTAL (R\$)</b>			<b>998,946</b>

### 3.4 Análise dos Resultados

Conforme já dito, os testes de consistência foram representados em termos de aplicação a um sistema exemplo de 6 barras.

Utilizando-se a metodologia nodal na arrecadação dos encargos referentes ao custo do sistema, não otimizado, obtém-se uma receita no valor de R\$ 710,30. Entretanto este valor refere-se a um sistema de custo total no valor de R\$ 1.000,00. Desta forma, a este valor arrecadado deve ser acrescido os ajustes provenientes do método de otimização, no valor de R\$ 289,70. A suplementação das tarifas aqui calculada, utilizando-se os métodos AG e simplex, pode ser comparada com o método do selo (método utilizado atualmente no setor elétrico brasileiro) e com os métodos de minimização linear e minimização quadrática, Jesus (2002).

#### a) Suplementação Utilizando Selo

As tarifas nodais serão ajustadas de modo a se obter a receita total esperada, usando uma parcela aditiva às tarifas obtidas através da metodologia marginal, conforme a Tabela XII.

TABELA XII – Cálculo do Selo.

R\$						R\$/MW	
$R_g''$	$R_c''$	$R_g$	$R_c$	$R_g'$	$R_c'$	$S_g$	$S_c$
132,00	578,30	300,00	700,00	168,00	121,70	0,47	0,47

em que:

- $R_g''$  - corresponde à receita arrecadada nos geradores pela metodologia marginal;
- $R_c''$  - corresponde à receita arrecadada nos consumidores pela metodologia marginal;
- $R_g$  - corresponde ao total da receita que deve ser arrecadada nos geradores;
- $R_c$  - corresponde ao total da receita que deve ser arrecadada nos consumidores;
- $R_g'$  - é a parcela da receita que falta ser atendida nos geradores para totalizar a receita;
- $R_c'$  - é a parcela da receita que falta ser atendida nos consumidores para totalizar a receita;
- $S_g$  - é o selo que deve ser adicionado às tarifas nodais da geração;

$S_c$  - é o selo que deve ser adicionado às tarifas nodais da carga.

O valor do selo é obtido separadamente para gerador e carga, dividindo-se a receita que falta arrecadar para os geradores com o total de capacidade dos geradores, e analogamente, dividindo-se o total que falta arrecadar com os consumidores com o total da demanda. Neste caso específico, coincidentemente, os valores dos selos para geração e carga foram iguais. A Tabela a seguir demonstra os encargos arrecadados através deste método.

**TABELA XIII – Tarifas ajustadas através do Método do Selo.**

Barra	$\pi$	Selo	$\pi'$	Capacidade (MW)	Encargos (R\$)
1	0,66	0,47	1,13	200	226,00
2	2,17	0,47	2,64	70	184,80
3	0,00	0,47	0,47	160	75,20
4	2,41	0,47	2,89	140	404,60
5	0,26	0,47	0,73	0	0,00
6	1,78	0,47	2,25	50	112,50
<b>RECEITA TOTAL</b>					<b>1.003,00</b>

#### b) Suplementação Utilizando Minimização Linear e Minimização Quadrática

As tarifas nodais ajustadas ( $\pi'$ ) são obtidas dos processos de minimização discutidos em Jesus (2002). Estes valores estão apresentados na Tabela XIV e Tabela XV, em R\$/MW, destacando as contribuições para estas tarifas ajustadas  $\pi'$ , ou seja, os valores de  $\pi$  e ajustes.

**TABELA XIV – Tarifas nodais ajustadas (R\$/MW) utilizando minimização linear.**

Barra	$\pi$	Ajustes	$\pi'$	Capacidade (MW)	Encargos (R\$)
1	0,66	0,57	1,23	200	246,00
2	2,17	0,56	2,73	70	191,10
3	0,00	0,34	0,34	160	54,40
4	2,41	0,56	2,98	140	417,20
5	0,26	0,26	0,52	0	0,00
6	1,78	0,06	1,84	50	92,00
<b>RECEITA TOTAL</b>					<b>1.000,70</b>

TABELA XV - Tarifas nodais ajustadas (R\$/MW) utilizando minimização quadrática.

Barra	$\pi$	Ajustes	$\pi'$	Capacidade (MW)	Encargos (R\$)
1	0,66	0,53	1,19	200	238,00
2	2,17	0,56	2,73	70	191,10
3	0,00	0,38	0,38	160	60,80
4	2,41	0,56	2,98	140	417,20
5	0,26	0,24	0,5	0	0,00
6	1,78	0,06	1,84	50	92,00
<b>RECEITA TOTAL</b>					<b>999,10</b>

A Tabela XVI apresenta os resultados obtidos na suplementação das tarifas, utilizando-se todos os métodos aqui citados, para efeito de comparação entre si.

TABELA XVI - Ajustes utilizando os vários métodos.

Barra	Tarifas Nodais	Capacidade (MW)	Método do Selo	Método Utilizando AG	Método Simplex	Minimização Quadrática	Minimização Linear
1	0,66	200	0,47	0,344285	0,4094	0,53	0,57
2	2,17	70	0,47	0,7	0,5637	0,56	0,56
3	0,00	160	0,47	0,589714	0,5094	0,38	0,34
4	2,41	140	0,47	0,379401	0,4637	0,56	0,56
5	0,26	0	0,47	0,234703	0,3637	0,24	0,26
6	1,78	50	0,47	0,312526	0,2637	0,06	0,06
<b>RECEITA TOTAL (R\$)</b>			<b>1.003,00</b>	<b>998,95</b>	<b>998,95</b>	<b>999,10</b>	<b>1.000,7</b>

O "método do selo" mostrou-se eficiente quanto à arrecadação total da receita: R\$ 1.003,00 (um mil e três reais). Entretanto, as vantagens do método aqui apresentado, utilizando AG, em relação ao "método do selo", são os ajustes diferenciados nas barras de acordo com o nível de carregamento de cada uma delas. O "método do selo", apesar de arrecadar o valor total da receita, consiste em, apenas, estabelecer um valor constante adicional para cada barra, resultando em um custo uniforme para todos os usuários, independente de quanto e como cada um deles se utiliza do sistema.

Os métodos de minimização linear e quadrática atingem os objetivos satisfatoriamente, obtendo ajustes diferenciados levando-se em consideração o nível de carregamento que determinado usuário provoca no sistema de transmissão.

Com um dos melhores valores obtidos através do AG, a receita total arrecadada seria no valor de R\$ 998,95 (novecentos e noventa e oito reais e noventa e cinco centavos), o mesmo valor da receita, utilizando-se o método de otimização simplex, R\$ 998,95 em relação ao sistema e considerações contempladas neste trabalho.

Os resultados obtidos com o método convencional simplex demonstram a validade da metodologia proposta utilizando AG, comparando-se os resultados entre si. Diante de uma metodologia específica e usual como o método de otimização simplex, os resultados similares obtidos com os algoritmos genéticos indicam que tal método pode também ser utilizado nesta linha de aplicação com resultados eficientes empregando-se uma metodologia de fácil implementação.

## Capítulo 4

### Conclusões

O método aqui discutido mostrou-se eficiente e de fácil implementação na obtenção dos ajustes diferenciados das tarifas, em função do carregamento das linhas do sistema.

Como exposto anteriormente, o trabalho considerou um sistema teste de transmissão pequeno e simplificado e que se pode então, partir para a tentativa de implementar esta mesma rotina, em um sistema real, de maior porte a fim de se chegar a condições bem mais próximas da realidade.

A suplementação utilizando algoritmos genéticos permite o cálculo dos ajustes das tarifas de forma diferenciada, em função do nível de carregamento de cada linha e, desta forma, cada usuário pagará justamente pelo uso do sistema, conforme seja seu carregamento provocado no sistema de transmissão.

Ao contrário do “Método do Selo”, aqueles com nível de carregamento menor, pagarão menos e, conseqüentemente, aqueles com carregamento maior, pagarão mais. Ou seja, a metodologia aqui discutida, produz ajustes que correspondem à parcela de responsabilidade de cada usuário nos futuros investimentos da expansão do sistema.

Com as tarifas de uso dos sistemas elétricos refletindo os custos acarretados por cada agente na expansão da rede e ainda a variação dos custos operacionais, os agentes serão levados a tomar decisões de investimento que coincidam com os da expansão a custo mínimo. Os testes realizados constataram a eficácia do algoritmo genético neste tipo de aplicação quanto ao estudo e determinação de melhores soluções para o problema.

A técnica proposta obteve resultados de qualidade tão bons quanto aos obtidos com o método simplex, no que diz respeito à arrecadação da receita total. Isto evidencia a possibilidade de utilização do método proposto neste tipo de aplicação com a garantia de obtenção de bons resultados, utilizando-se uma rotina de fácil implementação e flexível. Contudo, não demonstrou melhoria significativa na velocidade de convergência quando comparada com o simplex, método convencional.

Os testes realizados também indicaram que a codificação utilizada no AG é eficaz na utilização do algoritmo em sistemas maiores. No entanto, devido ao pequeno sistema considerado nos testes realizados, não é possível avaliar conclusivamente a eficácia da rotina na obtenção de melhores soluções em relação à abordagem convencional simplex em sistemas maiores.

Deve-se levar em consideração também, o aspecto da não linearidade do fluxo utilizado nas implementações aqui realizadas. Ao se utilizar o fluxo de carga não linear, o qual permite estudos e resultados mais realistas, o método AG se destacará em relação ao simplex, mostrando-se mais robusto em relação à técnica mais comum neste tipo de problema.

Neste trabalho, procurou-se desenvolver uma metodologia que permita sua utilização segundo outros sistemas e tipos de configuração de rede. Contudo, as codificações implementadas ainda requerem mais testes, sobretudo em sistemas de grande porte.

Desenvolveu-se uma abordagem para calcular tarifas de uso do sistema de transmissão baseadas em custos do sistema de transmissão ao invés de custos de geração, mas considerando as restrições do sistema de transmissão, tal como carregamento da malha definida como rede básica.

Foi definida uma melhor alocação da remuneração devida ao agente transmissor, em função do grau de carregamento em cada elemento do sistema devido a cada novo acessante.

As pesquisas que deram sustentação a essa dissertação se caracterizam como base e praticamente abrem uma nova linha de pesquisa no âmbito local. Vários desdobramentos se vislumbram tanto em termos de aumento da abrangência e aprimoramento das técnicas propostas quanto à aplicação a problemas reais.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicação do método aqui proposto num sistema de grande porte, possibilitando a obtenção de resultados mais realistas;
- Estudar a adequação da metodologia a outros problemas no sistema de transmissão, tais como implementação das perdas nos cálculos das tarifas.

## Referências Bibliográficas

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. “Manual da Metodologia Nodal para Cálculo de Tarifas de Uso dos Sistemas Elétricos - Nota Técnica 003-SRT/ANEEL”, Brasília/DF, 1999.

BARBOSA, H. J. C., “Algoritmos Genéticos para Otimização em Engenharia: Uma Introdução.”, IV Seminário sobre Elementos Finitos e Métodos Numéricos em Engenharia, Juiz de Fora, 1996.

BERER, RICARDO, CHIGANER, LUIS, AZEVEDO, ALICE H. F., CASTRILLON, JUAREZ, ZANI, CESAR R. GRUPO VII PLANEJAMENTO ( GPL ) – “Nova Visão de Projetos de Geração: Uma abordagem sob o ponto de Vista do Investidor.” FURNAS - CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., Belém/PA, Brasil,1997.

BOBEL, EDSON, LOPES, HEITOR S. “Otimização da logística de manutenção corretiva em redes de distribuição de energia elétrica por Algoritmos Genéticos”. Anais do V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, Canela, RS, 7-9/novembro, [CD-ROM], 2001.

CANTÚ-PAZ, E. “A Summary of Research on Parallel Genetic Algorithms”. IlliGal Report, No. 95007, July, 1995.

CASTRO, R. E. de. “Otimização”, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, 1999.

CHEN, L., SUZUKI, H., WACHI, T., SHIMURA, Y., “Components of Nodal Prices for Electric Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, pp. 41-48, February, 2002.

- CORREA, G.C., LOPES, H.S. "Otimização do atendimento de cargas de subestações utilizando algoritmos genéticos." Anais do V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, Canela, RS, 7-9/novembro, [CD-ROM], 2001.
- CURA, ELIANA MARIA C. "Tarificación de Sistemas de Transmission Electrica: Evaluacion de Metodologias de Asignacion de Cargos Complementarios", 1998.
- DANITZ, F., RUDNICK, H., ZOLEZZI, J., WATTS, D., "Use Based Allocation Methods for Payment of Electricity Transmission Systems", PowerCon 2002 IEEE-PES/CSEE International Conference on Power System Technology, Kunming, China October 13-17, 2002.
- DE JONG, K. A. "An Analysis of the Behavior of a class of Genetic Adaptive System.", Phd. Thesis, University of Michigan, ANN Arbor, MI., 1975.
- ELDRED, M. S. "Optimization Strategies for Complex Engineering Applications.", Sandia Report, Sandia National Laboratories, 1998.
- FAHRIOGLU, M., YONG, T., LASSETER & FALVARADO, R., "Integrating Distributed Generation Technology into Demand Management Schemes", 2002.
- FERREIRA, HELVIO A. "Sistemas de distribuição de energia elétrica: um algoritmo genético para alocação ótima de capacitores.", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, julho, 2002.
- FUBIN LIU, STU. M, *IEEE*, YANG Li, M, *IEEE*, GUOQING TANG, M, *IEEE* N. LEEPRECHANON, M, *IEEE*. "A Strategy of Pricing for Power Systems Security under Deregulated Environment", Power Systems and Communication Infrastructures for the Future, Beijing , 2002.

GOLDBERG, D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning." Adison-Wesley, USA, 1989.

HAPP, H.H. "Cost of Wheeling Methodologies", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp 147-156, 1994.

JESUS, VALDSON SIMÕES DE. "Métodos para tarifação de uso do sistema de transmissão de energia elétrica.", Relatório referente à primeira etapa do projeto CHESF de pesquisa e desenvolvimento denominado "Tarifação de Uso do Sistema de Transmissão", 2001.

JESUS, VALDSON SIMÕES DE. "Suplementação na tarifação de uso do sistema de transmissão de energia elétrica." Relatório referente à terceira etapa do projeto de pesquisa e desenvolvimento denominado "Tarifação de Uso do Sistema de Transmissão", CHESF/Atecel, 2002.

KOVACS, R. R., LEVERETT, A. L. "A Load Flow Based Method for Calculating Embedded, Incremental and Marginal Cost of Transmission Capacity", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, pp. 272-278, February, 1994.

MICHALEWICZ, Z., SCHOENAUER, M. "Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems", *Evolutionary Computation*, vol.4, no.1, pp.1-32, 1996.

PIMENTEL, W., FIGUEIREDO, C. M. H., CARVALHO, L. A. V. Planejamento de rotas aéreas utilizando algoritmos genéticos. Congresso Brasileiro de Redes Neurais, Anais do evento, 2001.

ROTORAS, R. E. "Transmission Pricing Of Active And Reactive Power, Congestion Pricing, And Supplemental Cost Allocation Method: A Case Of Philippines.", Tese de doutorado, 2002.

RUDNICK, H., CURA, E., PALMA, R., "Open access pricing methodologies in economically adapted electric transmission systems", invited paper, V SEPOPE Symposium of specialists in electric operational and expansion planning Recife, Brazil, 19-24 May 1996.

RUDNICK H., RAINERI, R. "Transmission Pricing Practices in South America", Utilities Policy, vol. 6, no 3, Pergamon, pp. 211-218, September, 1997.

RUDNICK, H., QUINTEROS, R., "Power system planning in the South America electric market restructuring", VI Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning - VI SEPOPE, Bahia, Brazil, May 24-29, 1998.

RUDNICK, H., SOTO, M., PALMA, R. "Use of system approaches for transmission open access pricing", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, volume 21, Issue 2, pp. 125-135, 1999.

SALVADOR, OTÁVIO. "Introdução a Algoritmos Genéticos.", Curso de Ciência da Computação, Universidade Católica de Pelotas, 1999.

SARAIVA, J. P. T. Trabalho conducente à elaboração de Dissertação de Mestrado: "Implementação de um Modelo de Transportes para Cálculo de Preços Marginais Nodais a Utilizar na Tarifação do Uso de Redes de Transmissão de Energia Elétrica", CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES DA FEUP, Edição de 1999/2001.

SHAFFER, R., "Practical Guide to Genetic Algorithms. Naval Research Laboratory, Chemistry Division."

SHIRMOHAMMADI, D., FILHO, X.V., GORENSTIN, B., PEREIRA, M.V.P., "Some Fundamental Technical Concepts About Cost Based Transmission Pricing", IEEE Summer Meeting, paper 577-7 PWR5, 1995.

SILVA, EMÍLIO CARLOS NELLI “Métodos Numéricos Aplicados em Problemas de Otimização de Engenharia.”, Otimização em Engenharia Mecânica, fevereiro, 2004.

TABORS, R. D. “Transmission System Management and Pricing: New Paradigms and International Comparisons”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, pp. 206-215, February, 1994.

WEEDY, B.M., CORY, B.J., “Electric Power Systems”, John Wiley & Sons, 1998.

YANG, R., DOUGLAS, I. “Simple Genetic Algorithm with Local Tuning: Efficient Global Optimizing Technique.”, *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 98, No. 2, pp. 449-465, August, 1998.

YANG, J., ANDERSON, M. D. “A Comprehensive Dynamic Pricing Method for the Use-of-Transmission- System Charges in the Context of Power Systems Deregulation”, Apresentado no *Frontiers of Power Conference*, Oklahoma State University, October 26-27, 1999.

YU, C. W., DAVID, A. K. “Capacity-Use and Reliability Based Criteria for Transmission Line Embedded Cost Allocation”, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> CEPSI Conference*, vol. 1, pp. 333-345, Christchurch, New Zealand, September, 1994.

YU, C. W., DAVID, A. K. “Pricing Transmission Services in the Context of Industry Deregulation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, February, 1997.