

9

Referências bibliográficas

Agência Nacional de Energia Elétrica – **ANEEL**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 27 dez. 2007.

Apostila de Introdução à Computação Evolucionária. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**. Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada – ICA. Disponível em: <<http://www.ica.ele.puc-rio.br>>. Acesso em: 01 mar. 2008.

Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica – **ABRADEE**. Disponível em: <<http://www.abradee.org.br>>. Acesso em: 12 jan. 2008.

Banco Central do Brasil – BCB. **Relatório Focus – Expectativas de Mercado**. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/FOCUSERIES>>. Acesso em: 19 fev. 2008.

BARROS, M.; MELLO, M.F.; RODRIGUES B.D.; SOUZA, R.C. **Métodos de Apoio à Decisão Estratégica de Contratação em Leilões de Energia**. Artigo CITENEL (ANEEL) - Ampla - 2007. Paper submetido à Revista SOBRAPO.

BLICKLE, T. **Theory of Evolutionary Algorithms and Application to System Synthesis**. Dissertação de doutorado. Swiss Federal Institute of Technology. Zurique, 1996.

BOX, G.E.P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G.C. **Time Series Analysis Forecasting and Control** – Third Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

BRASIL. ANEEL. **Nota Técnica nº 085 de 05 de março de 2008**. Apresenta as regras de comercialização referente ao repasse do custo de sobrecontratação de energia elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/nren2008305.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Nota Técnica nº 288 de 30 de outubro de 2007**. Apresenta os detalhes do Reajuste Tarifário Anual de 2007 da Light Serviços de Eletricidade S.A. - LIGHT. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/nreh2007563.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Resolução ANEEL nº 264 de 13 de agosto de 1998**. Estabelece as condições para contratação de Energia Elétrica por consumidores livres. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres1998264.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Homologatória nº 477 de 12 de junho de 2007**. Homologa o Valor Anual de Referência - VR para os anos de 2008 e 2009. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh2007477.pdf>>. Acesso em: 09 fev. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Homologatória nº 550 de 09 de outubro de 2007**. Altera o art. 1º da Resolução Homologatória ANEEL 477/07, que

homologou o Valor Anual de Referência - VR para os anos de 2008 e 2009. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh2007550.pdf>>. Acesso em: 09 fev. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Homologatória nº 563 de 07 de novembro de 2007**. Homologa o resultado do reajuste tarifário anual sobre as tarifas de fornecimento de energia elétrica, estabelece a receita anual referente às instalações de conexão, fixa as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição - TUSD e o valor da Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica - TFSEE, referentes à Light Serviços de Eletricidade S.A - LIGHT. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh2007563.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa nº 109 de 26 de outubro de 2004**. Institui a Convenção de Comercialização de Energia Elétrica, estabelecendo a estrutura e a forma de funcionamento da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2004109.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa nº 166 de 10 de outubro de 2005**. Estabelece as disposições consolidadas relativas ao cálculo da tarifa de uso dos sistemas de distribuição (TUSD) e da tarifa de energia elétrica (TE). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2005166.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa nº 234 de 31 de outubro de 2006**. Estabelece os conceitos gerais, as metodologias aplicáveis e os procedimentos iniciais para realização do segundo ciclo de revisão tarifária periódica das concessionárias de serviço público de distribuição de energia elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006234.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa nº 255 de 6 de março de 2007**. Estabelece os critérios para repasse, às tarifas do consumidor final, do custo de sobrecontratação de energia elétrica, em atendimento ao art. 38 do DEC nº 5.163/2004 e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2007255.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2007.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa nº 293 de 04 de dezembro de 2007**. Aprova as Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008, de que trata a Convenção de Comercialização de Energia Elétrica (REN nº 109/04) e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2007293.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2008.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa nº 305 de 18 de março de 2008**. Aprova as Regras de Comercialização referentes ao repasse do custo de sobrecontratação de energia elétrica e altera dispositivos da REN nº 255/2007. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2008305.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2008.

BRASIL. **Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a Comercialização de Energia Elétrica e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 04 jan. 2008.

BRASIL. **Decreto nº 5.177 de 12 de agosto de 2004**. Autoriza a criação da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE, sob a regulação e fiscalização da ANEEL, e dispõe sobre sua organização, atribuições e

funcionamento. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 22 dez. 2007.

BRASIL. **Lei nº 10.847 de 15 de março de 2004**. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética - EPE, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 20 dez. 2007.

BRASIL. **Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004**. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis 5.655/71, 8.631/93, 9.074/95, 9.427/96, 9.478/97, 9.648/98, 9.991/00, 10.438/02, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 20 dez. 2007.

BRASIL. **Lei nº 9.074 de 07 de julho de 1995**. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 14 fev. 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. **Proposta de Modelo Institucional do Setor Elétrico**. Brasília, 17 de dezembro de 2003. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 19 dez. 2007.

BUSINESS FORECAST SYSTEMS, INC. **User's manual Forecast Pro for Windows - Versão 3.00D Extended Edition**. Belmont, Massachusetts, USA, 1997 - site: www.forecastpro.com

Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 12 jan. 2008.

Canal Energia. Reportagem sobre Revisão Tarifária. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br>>. Acesso em: 29 dez. 2007.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. Grupo Eletrobrás. Disponível em: <<http://www.cepel.br>>. Acesso em: 05 fev. 2008.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. **Manual do Usuário do Programa Newave, Versão 13a**. Projeto Newave - Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes. CEPEL – Grupo Eletrobrás, 2007 – email: newave@cepel.br

COCHRANE, D.; ORCUTT, G.H. **Application of Least Squares Regression to Relationships Containing Autocorrelated Error Terms**. Journal of the American Statistical Association, 44, p. 32-61, 1949.

DAVIDSON, J. **Econometric Theory**. Blackwell Publishing, 2000.

DIAS, I.V.; LEITE, P.T.; AOKI, A.R.; LOURENÇO E.M.; FERNANDES, T.S.P.; COELHO, T.C.; BURATTI, R.M.; MIGUEL, F.K. **Sistema Inteligente na Gestão de Compra de Energia Elétrica para Agente de Distribuição**. Projeto de P&D ANEEL ciclo 2005/2007. COPEL & LACTEC, 2007.

DUDEWICZ, E. J.; MISHRA, S. N. **Modern Mathematical Statistics**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

Enciclopédia On Line. **Wikipédia**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org>>. Acesso em: 19 mar. 2008.

Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro – **FIRJAN**. Disponível em: <<http://www.firjan.org.br>>. Acesso em: 18 jan. 2008.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. EUA: Addison-Wesley, 1989.

GOODRICH, R.L. **Applied Statistical Forecasting**. Belmont, Business Forecast Systems, 1989.

GUJARATI, D.N. **Basic Econometrics**. McGraw Hill, 1995.

HAMILTON, J. D. **Time Series**. Princeton, 1994.

Instituto Acende Brasil e PSR Consultoria. **Monitoramento Permanente dos Cenários de Oferta e do Risco de Racionamento**. Programa Energia Transparente, 4ª Edição, fevereiro de 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **IBGE**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 jan. 2008.

Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada – **ICA**. Disponível em: <<http://www.ica.ele.puc-rio.br>>. Acesso em: 17 mar. 2008.

Light Serviços de Eletricidade S.A. – LIGHT SESA. **Relatório Anual de Responsabilidade Socioambiental 2007**. Disponível em: <<http://www.light.com.br>>. Acesso em: 25 mar. 2008.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. Brasport, isbn: 85-7452-265-1, 2006.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Springer-Verlag, 1994.

MONTGOMERY, D.C.; JOHNSON, L.A. **Forecasting and Times Series Analysis**. Mc Graw-Hill Book Co.: New York, 1976.

Operador Nacional do Sistema – **ONS**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 29 jan. 2008.

PALISADE CORPORATION – **Guide to RiskOptimizer** – Simulation Optimization for Microsoft Excel – Windows Version, Release 1.0, October, 2001 – site: www.palisade.com

PALISADE CORPORATION – **Guide to Using @Risk** – version 4.5, February, 2002 – site: www.palisade.com

PESSANHA, A. J. **Estratégia de contratação de energia elétrica em leilões regulados: uma aplicação de um modelo de simulação e otimização**. Dissertação de mestrado. UFF, 2007.

PSR Consultoria. **Market Report PSR / GasEnergy – 13ª Edição**. Rio de Janeiro, janeiro de 2008.

PSR Consultoria. **Market Report PSR / GasEnergy – 14º Edição**. Rio de Janeiro, fevereiro de 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO 1: Preço de Liquidação de Diferenças**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 21 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO 2: Determinação da Geração e Consumo de Energia**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 21 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO 3: Contratos**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 21 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO 4: Energias Asseguradas**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 21 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO 5: Excedente Financeiro**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 22 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO 6: Encargos de Serviços do Sistema**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 22 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO 7: Consolidação dos Resultados**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 22 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO 8: Ajuste de Contabilização e Recontabilização**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 22 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO de Definições e Interpretações**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 23 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO de Contabilização de CCEAR por Disponibilidade**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 23 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO de Liquidação**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 24 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO de Penalidades**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 24 jan. 2008.

Regras de Comercialização de Energia Elétrica, versão 2008. **MÓDULO de Governança**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 24 jan. 2008.

SALIBY, E. **Repensando a Simulação, A Amostragem Descritiva**. Editora Atlas, 1989.

SOUZA, R.C. **Métodos Automáticos de Amortecimento Exponencial para Previsão de Séries Temporais**. Monografia GSM-10/83, DEE, PUC-Rio, 1983.

SOUZA, R.C.; ZANINI, A.; MENDES, E.L. **Sistema de Previsão de Cargas Mensais da Light**. Programa Light de Pesquisa e Desenvolvimento P&D nº 37. PUC-Rio, 2003.

SUSTERAS, G. L. **Aplicação de Algoritmos Genéticos para Previsão do Comportamento das Distribuidoras como apoio à Estratégia de Comercialização de Energia de Agentes Geradores**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, USP, 2006.

Tutorial Sobre Algoritmos Genéticos. Disponível em: <<http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms>>. Acesso em: 18 mar. 2008.

WINSTON, W. **Financial Models Using Simulation and Optimization**. Vol. I, 2nd. Edition. Palisade Corporation, 2000.

WINSTON, W. **Financial Models Using Simulation and Optimization**. Vol. II, 2nd. Edition. Palisade Corporation, 2001.

ZANINI, A. **Redes neurais e regressão dinâmica: um modelo híbrido para previsão de curto prazo da demanda de gasolina automotiva no Brasil**. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, 2000.

Apêndice A

Algoritmos Genéticos

A.1. Introdução aos Algoritmos Genéticos

Algoritmo genético é uma técnica de procura utilizada na ciência da computação para achar soluções aproximadas em problemas de otimização e busca (Goldberg, 1989). São algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação (ou *crossover*). A figura A.1 a seguir ilustra essa definição:

ANALOGIA COM A NATUREZA		
Evolução Natural	↔	Algoritmos Genéticos
Indivíduo		Solução
Cromossoma		Representação
Reprodução Sexual		Operador Cruzamento
Mutação		Operador Mutação
População		Conjunto de Soluções
Gerações		Ciclos
Meio Ambiente		Problema

Figura A.1 – Analogia entre a Evolução Natural e os Algoritmos Genéticos

Algoritmos genéticos diferem dos algoritmos tradicionais de otimização em basicamente quatro aspectos (Goldberg, 1989):

- se baseiam em uma codificação do conjunto das soluções possíveis, e não nos parâmetros da otimização em si;
- os resultados são apresentados como uma população de soluções e não como uma solução única;
- não necessitam de nenhum conhecimento derivado do problema, apenas de uma forma de avaliação do resultado;
- usam transições probabilísticas e não regras determinísticas.

Os algoritmos genéticos são implementados em uma simulação de computador em que uma população de representações abstratas de solução é selecionada em busca de soluções melhores. A evolução geralmente se inicia a partir de um conjunto de soluções criado aleatoriamente e é realizada através de

gerações. A cada geração, a adaptação das soluções na população é avaliada, então alguns indivíduos são selecionados para a próxima geração, e são recombinados (*crossover*) e/ou modificados (*mutação*), formando assim uma nova população. A nova população é utilizada como entrada para a próxima iteração do algoritmo.

O indivíduo é meramente um portador do seu código genético. O código genético é uma representação do espaço de busca do problema a ser resolvido, em geral na forma de seqüências de *bits*. Por exemplo, para otimizações em problemas cujos valores de entrada são inteiros positivos de valor menor que 255 podemos usar 8 *bits*, com a representação binária normal. Problemas com múltiplas entradas podem combinar as entradas em uma única seqüência de *bits*, ou trabalhar com mais de um cromossoma, cada um representando uma das entradas. O código genético deve ser uma representação capaz de representar todo o conjunto dos valores no espaço de busca, e precisa ter tamanho finito (Goldberg, 1989, p.80).

Os Algoritmos genéticos são em geral algoritmos simples e fáceis de serem implementados. Segue abaixo na figura A.2 um trecho de *pseudo-código* descrevendo um algoritmo genético (Fonte: ICA – PUC):

```

procedure algoritmo_genético
begin
    t = 0 ; primeira geração
    inicializa P(t) ; população inicial aleatória
    avalia P(t) ; calcula f(i) p/ cada indivíduo
    while (not condição_parada) do
        begin
            t = t + 1 ; próxima geração
            seleciona P(t) de P(t-1)
            altera P(t) ; crossover e mutação
            avalia P(t) ; calcula f(i) p/ cada indivíduo
        end
    end
end

```

Figura A.2 – *Pseudo-código* para desenvolvimento de um Algoritmo Genético

A.2. Caracterização dos Algoritmos Genéticos

Podemos caracterizar os Algoritmos Genéticos através dos seguintes componentes:

1. Problema a ser otimizado
2. Representação das Soluções de Problema
3. Decodificação do Cromossoma
4. Avaliação
5. Seleção
6. Operadores Genéticos
7. Inicialização da População

A.2.1. Problema

Algoritmos Genéticos são particularmente aplicados em problemas complexos de otimização: problemas com diversos parâmetros ou características que precisam ser combinadas em busca da melhor solução; problemas com muitas restrições ou condições que não podem ser representadas matematicamente; e problemas com grandes espaços de busca.

Essa técnica tem sido aplicada a diversos problemas de otimização (Michalewicz, 1994), tais como:

- Otimização de Funções Matemáticas;
- Otimização Combinatorial;
- Otimização de Planejamento; e
- Otimização de Rotas (Caixeiro Viajante).

A.2.2. Representação

A representação das possíveis soluções do espaço de busca de um problema define a estrutura do cromossoma a ser manipulado pelo algoritmo.

A representação do cromossoma depende do tipo de problema e do que, essencialmente, se deseja manipular geneticamente. Os principais tipos de representação são:

Tabela A.1 – Representação em Algoritmos genéticos de acordo com o tipo de problema

Representação	Problemas
Binária	Numéricos, Inteiros
Números Reais	Numéricos
Permutação de Símbolos	Baseados em Ordem
Símbolos Repetidos	Grupamento

A representação binária é simples, fácil de manipular os cromossomas através dos operadores genéticos, fácil de ser transformada em inteiro ou real e, ainda, facilita a prova de alguns teoremas. Todavia, a representação por números reais (ponto flutuante) oferece melhor desempenho.

A.2.3. Decodificação

A decodificação do cromossoma consiste basicamente na construção da solução real do problema a partir do cromossoma. O processo de decodificação constrói a solução para que esta seja avaliada pelo problema. A vantagem da representação binária é a fácil transformação para inteiro ou real.

Na transformação para número real, considera-se o intervalo de valores ou comprimento contínuo do domínio (C) dos reais de tal forma que:

$$X_R = Xb \times \frac{C}{2^n - 1} + X_{\min} \quad (A-1)$$

Onde: $X_R \in (X_{\min}, X_{\max})$; Xb é o inteiro correspondente ao binário; n é o número de *bits* de do cromossoma; e C é o comprimento do domínio da variável X , dado por $C = |X_{\max} - X_{\min}|$ (Para mais detalhes: ver *site* do ICA – PUC).

A.2.4. Avaliação

A função de avaliação ou função objetivo é o objeto da otimização. Pode ser um problema de otimização, um conjunto de teste para identificar os indivíduos mais aptos, ou mesmo uma "caixa preta" onde sabemos apenas o formato das entradas e nos retorna um valor que queremos otimizar. A grande vantagem dos algoritmos genéticos está no fato de não precisarmos saber como

funciona esta função objetivo, apenas tê-la disponível para ser aplicada aos indivíduos e comparar os resultados.

A avaliação é o elo entre o GA (*Genetic Algorithm*) e o mundo externo. A avaliação é feita através de uma função que melhor representa o problema e tem por objetivo fornecer uma medida de aptidão de cada indivíduo na população corrente, que irá dirigir o processo de busca. A função de avaliação é para um GA o que o meio ambiente é para seres humanos. Funções de avaliação são específicas de cada problema. Por exemplo, se a intenção for maximizar a função $f(x) = x^2$, é possível medir a aptidão de cada indivíduo utilizando essa formulação matemática (Ver figura A.3).

Indivíduo	Cromossoma	x	$f(x) = x^2$
C1	0 0 1 0 0 1	9	81
C2	0 0 0 1 0 0	4	16

Figura A.3 – Demonstração para medir a aptidão de dois indivíduos na busca de maximizar a função $f(x) = x^2$

O Indivíduo C1 é mais apto que C2.

A.2.5. Seleção

A seleção também é outra parte chave do algoritmo. O processo de seleção em algoritmos genéticos seleciona indivíduos para a reprodução. O problema é como selecionar esses cromossomas. De acordo com a teoria da evolução de Darwin, o melhor sobrevive para criar a descendência. Em geral, usa-se o algoritmo de seleção por "roleta", onde os indivíduos são ordenados de acordo com a função-objetivo e lhes são atribuídas probabilidades decrescentes de serem escolhidos. A escolha é feita então aleatoriamente de acordo com essas probabilidades. Dessa forma, conseguimos escolher como pais os mais bem adaptados, sem deixar de lado a diversidade dos menos adaptados. Outras formas de seleção podem ser aplicadas dependendo do problema a ser tratado (Goldberg, 1989, p.121).

A seleção é baseada na aptidão dos indivíduos: indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem escolhidos para reprodução. Assim, se f_i é a avaliação do indivíduo i na população corrente, a probabilidade p_i do indivíduo i ser selecionado é proporcional a:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j}$$

(A-2)

Onde N é o número de indivíduos na população.

Na seleção em GA, implementada por uma roleta, cada indivíduo é representado por uma fatia proporcional a sua aptidão relativa (ver figura A.4). Evidentemente os cromossomas com maiores valores de adequação serão selecionados mais vezes.

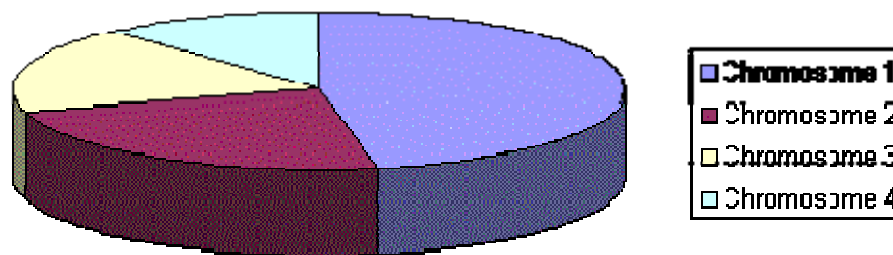


Figura A.4 – Representação da proporção da aptidão relativa a indivíduos no processo de seleção

A literatura identifica cinco principais mecanismos de seleção: proporcional, por torneios, com truncamento, por normalização linear e por normalização exponencial (Blickle, 1996).

A.2.6. Operadores Genéticos

Os operados genéticos atuam no processo de criação de novos indivíduos.

A.2.6.1. Crossover

O *crossover* é um processo que imita o processo biológico homônimo na reprodução sexuada: os descendentes recebem em seu código genético parte do código genético do pai e parte do código da mãe. O operador de *crossover* é considerado a característica fundamental dos GAs. Pares de genitores são escolhidos aleatoriamente da população, baseado na aptidão, e novos indivíduos são criados a partir da troca do material genético. Os descendentes serão diferentes de seus pais, mas com características genéticas de ambos os

genitores. A figura abaixo ilustra o processo de *crossover* entre indivíduos com representação binária:

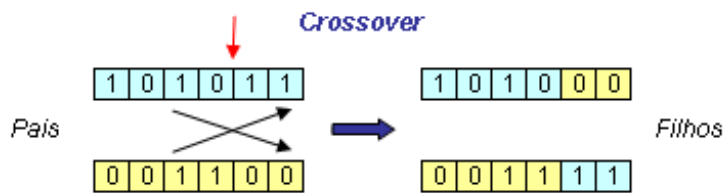


Figura A.5 – Representação ilustrativa da aplicação do operador *crossover*

Esta recombinação garante que os melhores indivíduos sejam capazes de trocar entre si as informações que os levam a ser mais aptos a sobreviver, e assim gerar descendentes ainda mais aptos.

Na sua forma mais simples, o *crossover* de um ponto de corte (*one-point crossover*) corta os dois genitores em uma posição aleatoriamente escolhida, criando dois possíveis descendentes:

A.2.6.2. Mutaç o

Os cromossomas criados a partir do operador de *crossover* s o ent o submetidos   opera o de muta o. Muta o   um operador explorat rio que tem por objetivo aumentar a diversidade na popula o, isto  , tem como objetivo permitir maior variabilidade gen tica na popula o, impedindo que a busca fique estagnada em um m nimo local (Goldberg, 1989, p.147).

O operador de muta o troca o conte do de uma posi o do cromossoma, com uma determinada probabilidade, em geral baixa (<1%).

A figura abaixo ilustra o processo de muta o entre indiv duos com representa o bin ria:



Figura A.6 – Representa o ilustrativa da aplica o do operador muta o

A.2.6.3. Outros operadores genéticos

Existem outros tipos de operadores genéticos. Podemos citar: *crossover* de um-ponto, *crossover* de dois-pontos, *crossover* uniforme, *non-uniform mutation* e *arithmetic crossover*.

A.2.7. Inicialização da população

A inicialização da população determina o processo de criação dos indivíduos para o primeiro ciclo do algoritmo. Tipicamente, a população inicial é formada a partir de indivíduos aleatoriamente criados. Populações iniciais aleatórias podem ser semeadas com bons cromossomas para uma evolução mais rápida, quando se conhece, a priori, o valor de boas “sementes”.

Uma técnica eficiente para se encontrar por GA boas soluções em um problema consiste em executar evoluções (rodadas) sucessivas, semeando-se a população inicial da evolução seguinte com as melhores soluções encontradas na anterior.

A.3. Técnicas de reprodução

Técnicas, parâmetros e tipos de operadores genéticos afetam significativamente o desempenho de um algoritmo genético. Em geral, o algoritmo genético é extremamente sensível a introdução ou combinação de técnicas empregadas. A escolha de técnicas, parâmetros e tipos de operadores é empírica, porém em sintonia com o problema.

As técnicas de reprodução determinam o critério de substituição dos indivíduos de uma população para a próxima geração. Existem basicamente os seguintes métodos:

a) **Troca de toda população**: a cada ciclo, N novos indivíduos são criados substituindo a população anterior: N/2 pares são escolhidos para o acasalamento, gerando N descendentes.

b) **Elitismo** – troca de toda a população com elitismo: todos os cromossomas são substituídos, sendo o cromossoma mais apto da população corrente copiado na população seguinte.

c) **Steady State** – troca parcial da população: gera M indivíduos ($M < N$), que substituem os piores indivíduos da população corrente (o número de indivíduos

substituídos também é conhecido como GAP). Técnica elitista que mantém população mais estática, permitindo, portanto, a utilização de operadores menos conservadores como o *crossover* uniforme.

d) **Steady State sem duplicados** – troca parcial da população: semelhante ao anterior, sem permitir a presença de indivíduos duplicados que são descartados da população. Garante, assim, o melhor aproveitamento do paralelismo intrínseco dos GAs (N pontos diferentes do espaço de busca sendo avaliados a cada ciclo). Todavia, implica em “*overhead*” para a detecção de duplicados e criação de novos indivíduos.

A.4. Parâmetros e critérios de parada

Em algoritmos genéticos vários parâmetros controlam o processo evolucionário:

- **Tamanho da População:** número de pontos do espaço de busca sendo considerados em paralelo a cada ciclo.
- **Taxa de Crossover:** probabilidade de um indivíduo ser re combinado com outro.
- **Taxa de Mutação:** probabilidade do conteúdo de uma posição/gene do cromossoma ser alterado.
- **Número de Gerações:** total de ciclos de evolução de um GA.
- **Total de Indivíduos:** tamanho da população x número de gerações.

Os dois últimos parâmetros são em geral empregados como critério de parada de um algoritmo genético. Um algoritmo genético pode ser descrito como um processo contínuo que repete ciclos de evolução controlados por um critério de parada.

A.5. Métodos de solução

Definem representação e operadores. Devem ser pré-determinados quando da aplicação de programas de otimização como o *RiskOptimizer* (*Palisade Corporation*), que tem como um de seus suplementos o *Evolver*, que realiza o processo de busca de melhor solução através da técnica de GA. A escolha depende das características do problema que está sendo analisado. Os principais métodos são:

- **Recipe Solving Method:** Método “Receita de Bolo” onde as variáveis podem ser ajustadas independentemente umas das outras. Restrição apenas do domínio: (mín, máx).
- **Order Solving Method:** Busca a melhor maneira de ordenar os itens de uma lista. Valores dos itens devem ser definidos nos campos ajustáveis da planilha, antes da execução.
- **Grouping Solving Method:** Usado em problemas que envolvem múltiplas variáveis para serem arranjadas em grupos.

A.6. Algumas Recomendações

Nesta seção são dadas recomendações básicas para a implementação inicial de um algoritmo genético. Essas recomendações não são regras, isto é, não representam uma teoria geral que possa ser aplicada no auxílio da sintonia dos parâmetros dos GA para qualquer problema. As recomendações são obtidas a partir de resultados encontrados mais freqüentemente, ou seja, é um processo empírico.

- **Taxa de *crossover*:** a taxa de *crossover* deve em geral ser alta, cerca de 80% a 95%. Entretanto, alguns resultados mostram que para alguns tipos de problemas, uma taxa de cerca de 60% também pode ser utilizada gerando boas soluções.
- **Taxa de Mutação:** por outro lado, a taxa de mutação deve ser mais baixa. As melhores taxas parecem estar na faixa de 0,5% a 1%.
- **Tamanho da População:** um bom tamanho para a população é cerca de 20 a 30, entretanto às vezes tamanhos de 50 a 100 são relatados como os melhores. Pode ser um pouco surpreendente que populações de tamanho muito grande, normalmente não aumentam o desempenho do GA (no sentido de aumentar a velocidade com que são encontradas as soluções).
- **Seleção:** a seleção através da Roleta pode ser usada, mas às vezes a Seleção por Normalização pode ser melhor.
- **Elitismo:** recomendável o seu uso.
- **Steady State:** também pode ser testado.
- **Representação:** A representação depende do tipo de problema e sua complexidade.