

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROGRAMAÇÃO ÓTIMA DE DESLIGAMENTOS
EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO
ALGORITMOS GENÉTICOS**

MARCIO LEONARDO RAMOS ROBERTO

MARCIO LEONARDO RAMOS ROBERTO

**PROGRAMAÇÃO ÓTIMA DE DESLIGAMENTOS EM REDES DE ENERGIA
ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Computação em Potência.

Orientadores: Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D.Sc.
Prof. Milton Brown do Couto Filho, D.Sc.

Niterói

2004

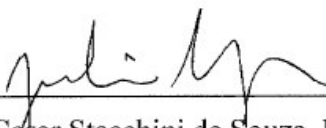
MARCIO LEONARDO RAMOS ROBERTO

**PROGRAMAÇÃO ÓTIMA DE DESLIGAMENTOS EM REDES DE ENERGIA
ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da
Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção
do Grau de Mestre. Área de Concentração: Computação em Potência.

Aprovada em 15 de março de 2004.

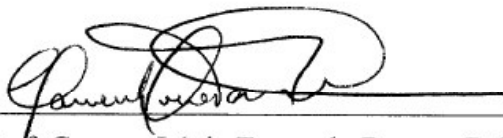
BANCA EXAMINADORA



Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D.Sc. – Orientador
Universidade Federal Fluminense



Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc. – Orientador
Universidade Federal Fluminense



Prof. Carmen Lúcia Tancredo Borges, D.Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Niterói

2004

Aos meus pais, Walter e Marlene,
e a minha esposa Denise, pela vivência do
compromisso solitário, pelo apoio e estímulo
que me foram dados e pelo exemplo
de amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Parte deste trabalho conta com o apoio financeiro da FAPERJ e do CNPQ.

Aos meus orientadores, Prof. Julio César Stacchini de Souza e Prof. Milton Brown do Couto Filho pela orientação constante, incentivo, confiança, amizade e amplo acesso a seus conhecimentos.

Ao Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS pela oportunidade de cursar a Pós-Graduação.

Aos amigos da Gerência de Programação e Desligamentos (GPD) pelos conhecimentos compartilhados.

Aos professores, em especial ao Prof. Marcus T. Schilling, e funcionários do CAA pelo companheirismo e pela ajuda com a qual sempre pude contar.

Aos amigos Tatiana M.L. de Assis, Antônio F. Aquino, Wanda Beatriz Massière y Corrêa e Eduardo S. Machado que me ajudaram a percorrer esse longo e difícil caminho.

Aos meus irmãos, Marcello e Ana Paula, e toda minha família pela compreensão e carinho, sem os quais não seria possível desenvolver esse trabalho.

Aos amigos e professores da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Roberto Legey Leoni e Erly Figueiredo, e a todos aqueles que de forma direta e indireta contribuíram para que alcançasse esta realização.

Finalmente agradeço a Deus, sem a sua presença constante em minha vida nada disso seria possível.

RESUMO

Dentre as tarefas atribuídas aos engenheiros responsáveis pela operação de sistemas elétricos de potência estão a análise de requisições de desligamentos de equipamentos e a respectiva tomada de decisões operativas. Para se estabelecer a ordem de execução dos desligamentos em redes de transmissão é necessário realizar análises da rede nas diversas configurações degradadas, levando em consideração o tempo em que os equipamentos permanecem desligados. Com base nessas análises e na experiência prévia dos engenheiros de operação, é tomada a decisão de negar, adiar ou aceitar a requisição, impondo-se restrições em relação ao instante e intervalo de tempo do desligamento. Atualmente, os sistemas de potência estão operando quase no limite de sua capacidade e a decisão sobre aprovar ou não solicitações de desligamentos que ocorrem simultaneamente torna-se crítica. É fundamental que a análise de desligamentos seja realizada de forma confiável, já que decisões equivocadas podem ocasionar severos danos para a operação do sistema. Atualmente, além da complexidade dos modernos sistemas interligados, existe a dificuldade de não se dispor de ferramentas computacionais integradas para a realização das análises necessárias e que permitam tomar as melhores decisões possíveis. Para um dado conjunto de solicitações de desligamentos e considerando as diferentes situações de operação que o sistema pode experimentar, o número de cenários a serem analisados pode ser extremamente grande. Dessa maneira, uma análise exaustiva de todas as situações se torna inviável para um sistema de grande porte.

Este trabalho apresenta uma metodologia para a análise integrada das solicitações de desligamentos em redes de transmissão, buscando obter a programação que mais se aproxime da inicialmente solicitada, observando o atendimento às restrições operativas do sistema e levando em consideração a prioridade de cada desligamento. A Programação de Desligamentos é tratada como um problema de otimização com restrições e, devido a sua natureza combinatória, a técnica dos algoritmos genéticos é empregada para sua solução. Simulações com o sistema IEEE 14 barras são apresentadas para ilustrar a metodologia proposta e os resultados obtidos.

ABSTRACT

The analysis of maintenance schedules in transmission systems is among the responsibilities of power systems engineers, which have to take operational decisions regarding their execution. In large power systems many analyses are necessary to evaluate the impact of the proposed schedule. These analyses are performed for many different operating conditions, which depends on the outages schedule. Based on such analyses and on previous experience with the system, power engineers will accept, reject or reschedule some proposed outages. Modern power systems are operating near their capacity limits and the decision about accepting or not the outage schedule become critical. It is essential to perform reliable analyses, as inadequate decisions may cause severe damages for system operation. Nowadays, besides the complexity of operating interconnected power systems, there is lack of integrated computational tools for performing the necessary analyses, which would allow taking the best decisions. For a given outage schedule considering different operating conditions that the system may experiment, the number of scenarios that should be analyzed may be extremely large. Then an exhaustive analysis of all possible situations is not feasible for a large power system.

This work presents a methodology for an integrated analysis of outages schedule in transmission systems, which aims to obtain a schedule that will be as close as possible to the original one, observing operational constraints and taking into account outages priorities. The problem is formulated as a constrained optimization problem and, due to its combinatorial nature; the genetic algorithm technique is employed to obtain the optimal solution. Simulations with the IEEE 14 bus test system are presented to illustrate the proposed methodology and the obtained results.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Objetivo do Trabalho.....	3
1.3 Estrutura da Dissertação	4
CAPÍTULO 2: PROGRAMAÇÃO DE DESLIGAMENTOS	5
2.1 Introdução	5
2.2 Critérios para Aprovação de Solicitações de Intervenções [Proc01]	7
2.3 Critérios para Priorização entre Solicitações de Intervenção Incompatíveis	9
2.4 Estágio Atual e Panorama Geral	12
2.5 Caracterização do Problema e Perspectivas Futuras	15
CAPÍTULO 3: INTRODUÇÃO A ALGORITMOS GENÉTICOS	17
3.1 Introdução	17
3.2 Conceitos Básicos sobre Algoritmos Genéticos	19
3.3 Funcionamento dos Algoritmos Genéticos.....	21
3.4 Processamento de um Algoritmo Genético	22
3.5 Módulo de Avaliação	23
3.6 Módulo de Estruturação	23
3.6.1 Técnica Universal ou por Roleta:	24
3.6.2 Técnica por Torneio:.....	25
3.6.3 Módulo de Reprodução.....	25
3.6.4 Técnica de Deleção.....	28
3.6.5 Elitismo	28
3.7 Parâmetros Genéticos	28
3.7.1 Tamanho da População.....	28
3.7.2 Taxa de Cruzamento	29
3.7.3 Taxa de Mutação	29
3.7.4 Intervalo de Geração.....	29
3.8 As Diferenças entre os AGs e os Métodos Tradicionais	29
3.9 Conclusões.....	30
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA PROPOSTA.....	31
4.1 Formulação do Problema.....	31

4.2	Programação de Desligamentos via Algoritmos Genéticos	32
4.2.1	Modelagem dos cromossomos	32
4.2.2	Condições de carregamento	34
4.3	Formulação da Função Aptidão	34
4.3.1	Requisito de Atendimento à Carga.....	35
4.3.2	Requisito de Atendimento aos Limites Operativos dos Equipamentos.....	35
4.3.3	Requisito de Atendimento a Contingências Simples.....	36
4.4	Algoritmo Proposto	37
4.5	Considerações sobre a Metodologia.....	39
CAPÍTULO 5: SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....		41
5.1	Descrição das Simulações	41
5.1.1	Método de Análise de Desempenho em Regime Permanente	42
5.1.2	Solicitações das Intervenções.....	43
5.1.3	Penalidades utilizadas	44
5.1.4	Funções de aptidão testadas	46
5.1.5	Parâmetros testados na convergência do AG.....	47
5.2	Testes Considerando a Programação 1.....	48
5.2.1	Objetivo1: Atendimento a demanda e aos limites operativos.....	48
5.2.2	Objetivo 2: Atendimento a demanda, limites operativos e prioridades.....	54
5.2.3	Objetivo 3: Consideração dos cenários em contingência	60
5.3	Testes Considerando a Programação 2.....	66
5.3.1	Objetivo1: Atendimento a demanda e aos limites operativos.....	66
5.3.2	Objetivo 2: Atendimento a demanda, limites operativos e prioridades.....	71
5.4	Testes Considerando o Sistema de 440kV da Área São Paulo	76
5.4.1	Objetivo1: Atendimento a demanda e aos limites operativos.....	77
5.4.2	Objetivo 2: Atendimento a demanda, limites operativos e prioridades.....	79
5.4.3	Objetivo 3: Consideração dos cenários em contingência	81
5.5	Comentários Sobre os Testes.....	84
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....		87
6.1	Conclusões.....	87
6.2	Contribuições do Trabalho	88
6.3	Propostas para Trabalhos Futuros	89
APÊNDICE A – Sistemas Testados		90
A.1	Configuração Básica do Sistema IEEE 14	90

A.2 Dados de Rede	91
A.3 Dados de Carga	92
A.4 Configuração Básica do Sistema de 440kV de São Paulo	94
A.5 Dados de Rede	95
A.6 Dados de Carga	97
APÊNDICE B – Desempenho do AG	102
REFERÊNCIAS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Exemplo do funcionamento do Algoritmo Genético	22
Figura 3.2 Representação gráfica da roleta.	24
Figura 3.3 Exemplo de mutação.	26
Figura 3.4 Exemplo de operador de cruzamento de um ponto.	27
Figura 4.1 Modelo do Cromossomo	33
Figura 4.2 Fluxograma Básico	38
Figura 5.1 Reprogramação obtida no Teste 1.....	49
Figura 5.2 Reprogramação obtida no Teste 2.....	51
Figura 5.3 Reprogramação obtida no Teste 2.....	53
Figura 5.4 Reprogramação obtida no Teste 4.....	55
Figura 5.5 Reprogramação obtida no Teste 5.....	57
Figura 5.6 Reprogramação obtida no Teste 6.....	59
Figura 5.7 Reprogramação obtida no Teste 7.....	61
Figura 5.8 Reprogramação obtida no Teste 8.....	63
Figura 5.9 Reprogramação obtida no Teste 9.....	67
Figura 5.10 Reprogramação obtida no Teste 10.....	69
Figura 5.11 Reprogramação obtida no Teste 11.....	70
Figura 5.12 Reprogramação obtida no Teste 12.....	72
Figura 5.13 Reprogramação obtida no Teste 13.....	73
Figura 5.14 Reprogramação obtida no Teste 14.....	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Critérios para Análise de Solicitações de Intervenções no SIN.....	10
Tabela 3.1 - Valores de exemplo para ilustrar a seleção por roleta.....	24
Tabela 5.1 - Conjuntos de solicitações de desligamentos.....	43
Tabela 5.2 - Desvios em relação a programação original (Teste 1)	49
Tabela 5.3 - Violações dos limites operativos (Teste 1).....	50
Tabela 5.4 - Desvios em relação a programação original (Teste 2)	51
Tabela 5.5 - Violações dos limites operativos (Teste 2).....	52
Tabela 5.6 - Desvios em relação a programação original (Teste 3)	53
Tabela 5.7 - Violações dos limites operativos (Teste 3).....	54
Tabela 5.8 - Desvios em relação a programação original (Teste 4)	55
Tabela 5.9 - Violações dos limites operativos (teste 4)	56
Tabela 5.10 - Desvios em relação a programação original (Teste 5)	57
Tabela 5.11 - Violações dos limites operativos (Teste 5).....	58
Tabela 5.12 - Desvios em relação a programação original (Teste 6)	59
Tabela 5.13 - Violações dos limites operativos (Teste 6).....	60
Tabela 5.14 - Lista de Contingências.....	60
Tabela 5.15 - Desvios em relação a programação original (Teste 7)	61
Tabela 5.16 - Violações dos limites operativos (Teste 7) – Caso Base	62
Tabela 5.17 - Violações dos limites operativos (Teste 7) – 1ª Contingência.....	62
Tabela 5.18 - Violações dos limites operativos (Teste 7) – 2ª Contingência.....	62
Tabela 5.19 - Violações dos limites operativos (Teste 7) – 3ª Contingência.....	62
Tabela 5.20 - Desvios em relação a programação original (Teste 8)	64
Tabela 5.21 - Violações dos limites operativos (Teste 8)- Caso Base.....	64
Tabela 5.22 - Violações dos limites operativos (Teste 8) – 1ª Contingência.....	64
Tabela 5.23 - Violações dos limites operativos (Teste 8) – 2ª Contingência.....	65

Tabela 5.24 - Violações dos limites operativos (Teste 8) – 3ª Contingência.....	65
Tabela 5.25 - Desvios em relação a programação original (Teste 9)	67
Tabela 5.26 - Violações dos limites operativos (Teste 9).....	68
Tabela 5.27 - Desvios em relação a programação original (Teste 10)	69
Tabela 5.28 - Violações dos limites operativos (Teste 10).....	69
Tabela 5.29 - Desvios em relação a programação original (Teste 11)	70
Tabela 5.30 - Violações dos limites operativos (Teste 11).....	71
Tabela 5.31 - Desvios em relação a programação original (Teste 12)	72
Tabela 5.32 - Violações dos limites operativos (Teste 12).....	73
Tabela 5.33 - Desvios em relação a programação original (Teste 13)	74
Tabela 5.34 - Violações dos limites operativos (Teste 13).....	74
Tabela 5.35 - Desvios em relação a programação original (Teste 14)	75
Tabela 5.36 - Violações dos limites operativos (Teste 14).....	76

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A manutenção de equipamentos em sistemas de energia elétrica tem como objetivo preservar a sua vida útil e garantir seu bom funcionamento quando em operação, o que irá também contribuir para uma maior confiabilidade na operação do sistema no qual eles estão inseridos. A manutenção pode ser realizada de modo a seguir intervalos de tempo especificados pelos fabricantes ou determinados por programas de manutenção das empresas de energia elétrica. Durante a manutenção, os equipamentos são retirados do sistema por períodos de tempo que podem variar de algumas horas a vários dias. Em geral, a retirada de um equipamento é prejudicial ao sistema, pois na maioria das vezes reduz a sua confiabilidade. A retirada de equipamentos para manutenção pode provocar pequenos ou grandes impactos à operação do sistema, dependendo da condição operativa do mesmo, ou seja, do nível de carregamento e da configuração topológica.

Dentre as tarefas atribuídas aos engenheiros responsáveis pela operação de sistemas elétricos de potência estão a análise de requisições de desligamentos de equipamentos e a tomada de decisões operativas. Para se estabelecer a ordem de execução dos desligamentos em redes de transmissão é necessário realizar análises da rede para diversas condições de operação, levando em consideração o tempo em que os equipamentos permanecem desligados. Com base nessas análises e na experiência prévia dos engenheiros de operação, é tomada a decisão de negar, adiar ou aceitar a requisição, impondo-se restrições em relação ao instante e intervalo de tempo do desligamento. Atualmente, os sistemas de potência estão operando quase no limite de sua capacidade e a decisão sobre aprovar ou não solicitações de desligamentos simultâneos torna-se crítica. É fundamental que a análise de desligamentos seja realizada de forma confiável, já que decisões equivocadas podem ocasionar severos danos para a operação do sistema. Estratégias usualmente empregadas são baseadas na experiência sobre a operação do sistema e visam deslocar os desligamentos para períodos onde se acredita que seu impacto seja minimizado (ex: períodos de carga leve). Tal estratégia, além de não considerar todas as análises necessárias

para garantir o bom funcionamento do sistema, não busca atender a solicitação inicial de desligamentos.

Diversas técnicas têm sido propostas na literatura para a programação de manutenção de equipamentos. Tais propostas estão em geral associadas à manutenção de unidades geradoras e são baseadas em diferentes técnicas de otimização, tais como: programação dinâmica [Zurn77], programação inteira [Egan76, Dopa75, Muke91, Chen91, Chatto95], decomposição de Benders [Yellen92, Kham92, Silva95], métodos heurísticos [Garver72, Strem81, Sheik84, Conta89, Juan97], etc. A aplicação de sistemas inteligentes para a programação de desligamentos também tem sido proposta na literatura. Algumas aplicações são baseadas na utilização de Sistemas Especialistas [Kopi01]. Nestas aplicações o conhecimento e a experiência dos especialistas humanos são explorados para a construção de um conjunto de regras que forma o mecanismo de inferência utilizado para a avaliação da programação de desligamentos. Entretanto, sistemas especialistas são capazes de produzir bons resultados apenas para aquelas situações que foram consideradas durante o seu desenvolvimento. A maior limitação desta aplicação reside na dificuldade de tratar novas situações e programações novas com diferentes topologias. Outras aplicações estão associadas à manutenção de unidades geradoras [Lin92, Kim97].

A obtenção de programas de manutenção que levem em conta também desligamentos na rede de transmissão não foi ainda adequadamente tratada na literatura técnica. A consideração de desligamentos na rede de transmissão aumenta ainda mais a complexidade do problema, já que, ao contrário do que geralmente ocorre com equipamentos de geração, o desligamento de equipamentos de transmissão podem ser solicitados com uma pequena antecedência, sendo também estes em maior quantidade. Em [Mans02] é realizada uma análise do impacto que programas de manutenção de equipamentos de geração e transmissão provocam na confiabilidade do sistema. A natureza combinatória e a complexidade da programação de desligamentos em redes de transmissão favorecem a aplicação de técnicas de busca global, tais como os algoritmos genéticos [Gold89], apropriados para a solução deste tipo de problema. A flexibilidade na formulação de objetivos e restrições também contribui para que a aplicação de algoritmos genéticos se torne bastante atraente para este problema.

1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho propõe uma metodologia baseada na aplicação de algoritmos genéticos para a otimização da programação de desligamentos em redes de energia elétrica. A metodologia proposta é baseada em critérios pré-definidos para a avaliação da melhor solução, levando-se em conta aspectos como:

- Minimização da reprogramação de desligamentos solicitados
- Observação das restrições operativas do sistema
- Observação das prioridades pré-estabelecidas para cada desligamento

É formulado um problema de otimização, no qual as restrições a serem consideradas são: a capacidade de atender a demanda em regime normal de operação, a não violação de limites operativos e a capacidade do sistema suportar qualquer contingência simples sem perda de carga ou violação dos limites operativos. A metodologia desenvolvida deverá permitir a análise integrada das solicitações de desligamentos em redes de transmissão, buscando obter a programação que mais se aproxime da inicialmente solicitada, observando os aspectos acima mencionados (atendimento às restrições operativas e às prioridades dos desligamentos). Simulações com o sistema IEEE 14 barras são apresentadas para ilustrar a metodologia proposta e os resultados obtidos.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte maneira:

No Capítulo 2 é apresentado e discutido o problema da programação de desligamentos. As filosofias usualmente utilizadas, bem como os principais critérios e análises, são também apresentados.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão teórica sobre Algoritmos Genéticos.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta, enfocando aspectos como a codificação do problema e a construção da função de aptidão a ser utilizada pelo algoritmo genético.

No Capítulo 5 são ilustrados os testes realizados com o sistema IEEE 14 barras. O processo de simulação é descrito e os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e as propostas para desenvolvimento futuro.

CAPÍTULO 2: PROGRAMAÇÃO DE DESLIGAMENTOS

2.1 Introdução

Em 18 de Abril de 1984 ocorreu no Sistema Interligado Sudeste-Sul brasileiro o primeiro “black-out” de grandes proporções. Esse fato teve como origem um defeito na subestação de Jaguará 500/345 kV, onde a emergência de um dos autotransformadores de 400 MVA deu origem a uma instabilidade generalizada em decorrência de despachos de geração extremamente desbalanceados nas redes de 345 e 500 kV. Constatou-se então que os estudos de planejamento da operação, feitos com antecedência mensal, não tinham avaliado esse desbalanceamento na configuração dos geradores, até porque a situação energética tinha sido radicalmente alterada no decorrer do período em foco.

Essa perturbação alertou para o fato de que, desligamentos programados no Sistema Interligado, possíveis de serem realizados em determinadas condições, tornar-se-iam proibitivos em função de alterações topológicas e/ou de variações nas condições energéticas das bacias.

Outro fator de alerta foi a crescente complexidade operativa do Sistema Interligado, que vislumbrava a necessidade de uma coordenação dos desligamentos programados de elementos da rede de transmissão, sobretudo em Extra Alta Tensão (EAT), para atender a requisitos de confiabilidade para a manutenção desses elementos.

Devido a todas essas constatações, criou-se em 1984 no âmbito do Subcomitê de Estudos elétricos do GCOI (Grupo de Coordenação da Operação Interligada), uma estrutura coordenada pela Eletrobrás, designada por Subgrupo de Estudos de Desligamento – SGED. O objetivo do SGED era de coordenar a programação em curto prazo dos desligamentos de elementos da malha principal da rede de transmissão do Sistema Interligado Nacional.

A partir da formalização do SGED, as empresas do GCOI passaram a submeter àquele órgão as suas solicitações de desligamentos associados aos seus programas de manutenção.

Esse processo continuou até o final da década de 90, quando em 1998 ocorreu a implantação de um novo modelo do setor elétrico brasileiro, o qual tinha como principais características a criação de um ambiente competitivo e de negócios e a desverticalização das empresas do setor com a criação de novos agentes de controle e fiscalização. Dentre esses novos agentes criou-se a figura do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que assumiu o papel de operação e planejamento de todo o Sistema Interligado Nacional (SIN), inclusive o de avaliar os desligamentos programados de elementos da malha de transmissão.

Essa avaliação de desligamentos programados é hoje realizada na Gerência de Programação e Desligamentos (GPD), pertencente a Diretoria de Planejamento e Programação da Operação (DPP) do ONS, seguindo os critérios contidos nos submódulos dos procedimentos de rede que são homologados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Este capítulo tem por objetivo introduzir os conceitos e critérios utilizados para a avaliação da programação de desligamentos.

2.2 Critérios para Aprovação de Solicitações de Intervenções [Proc01]

Uma solicitação de intervenção será aprovada quando:

- (a) Não acarretar a interrupção das cargas em regime normal de operação;

- (b) O sistema suportar dinamicamente contingências, considerando a atuação dos Sistemas Especiais de Proteção existentes, com exceção do ERAC (Esquema Regional de Alívio de Carga) e de outros esquemas que impliquem em corte de carga, ressalvadas as situações explicitadas no item (d);

- (c) O sistema suportar qualquer contingência simples, sem perda de carga, ressalvadas as situações explicitadas no item (d);

- (d) Nas áreas em que seja prevista, mesmo em condições de rede completa, a perda de carga provocada pela pior contingência simples, que a mesma não seja superior aquela admissível, no período de carga pesada;

- (e) Não acarretar violação de limites operativos definidos para regime normal em qualquer elemento na rede de operação;

- (f) Na ocorrência de perturbações durante a realização da intervenção, a mesma não inviabilizar a recomposição do sistema.

Intervenções que levem a violações de quaisquer dos requisitos descritos são programadas de modo a incluir o maior número possível de horas nos períodos de carga leve e mínima, finais de semana ou feriados, de forma a minimizar a perda de carga e o tempo de exposição do sistema ao risco de uma operação inadequada.

Intervenções de urgência, que são aquelas em que se caracteriza risco aos equipamentos e/ou pessoas, são realizadas em qualquer período de carga devendo-se buscar realizá-las no período mais favorável para o sistema.

Intervenções que impliquem em restrições de despacho de usinas em relação à programação sem restrições elétricas deverão ser programadas para dias e horários em que seja minimizado o afastamento em relação às metas energéticas. Caso, na solicitação original, essa condição não seja atendida, cabe ao ONS propor ao Agente períodos alternativos para a realização do serviço.

Quando diferentes pedidos de intervenção se sobrepuserem em um mesmo período e não sendo eles compatíveis entre si, a prioridade será dada de acordo com os critérios relacionados na Tabela 2.1. As intervenções serão consideradas não compatíveis quando a análise indicar que sua realização simultânea, em qualquer período de carga, leva a violação de qualquer dos critérios anteriormente descritos. Tal violação pode ser eliminada ou minimizada se as intervenções forem não coincidentes.

São ainda consideradas incompatíveis intervenções cuja simultaneidade implique em:

(g) Aumento das restrições de intercâmbio entre submercados;

(h) Restrições de despacho em usinas submetidas ao despacho centralizado mais severas do que se as intervenções forem não coincidentes.

Dada a grande complexidade do problema tratado neste trabalho, os critérios utilizados para a otimização da programação de desligamentos são os anteriormente mencionados (a), (c) e (e). Os outros critérios estão fora do escopo do trabalho e serão alvo de investigações futuras.

2.3 Critérios para Priorização entre Solicitações de Intervenção Incompatíveis

Os fatores considerados para priorização de intervenções classificadas com a mesma prioridade na Tabela 2.1 e que não possam ser realizadas simultaneamente são, seqüencialmente, os seguintes:

- (a) Existência de riscos para pessoas ou equipamentos, caracterizada pelo próprio Agente solicitante. Nesses casos, a intervenção deverá ser classificada como Intervenção Corretiva Especial ou Intervenção de Urgência;
- (b) Existência de riscos para o sistema, caracterizada pelo ONS a partir das informações dos Agentes;
- (c) Inexistência de período alternativo, dentro de um horizonte de 60 dias, no caso geral, ou de 15 dias, no caso de manutenções corretivas, em que alguma das intervenções possa ser realocada de comum acordo com o Agente, em função das previsões de demanda, hidrologia ou de outras intervenções já aprovadas;
- (d) Inclusão no Programa Mensal de Intervenções;
- (e) Consideração da taxa de Cancelamentos não Justificados de cada Agente nos últimos 6 meses;
- (f) Apresentação, por parte do agente, de um maior índice de reprogramações solicitadas pelo ONS nos últimos 6 (seis) meses;
- (g) Severidade das restrições de despacho das usinas submetidas ao despacho centralizado, tendo em conta os despachos previstos para o período em questão;

(h) Intervenções envolvendo instalações integrantes da rede de operação ou que, por afetarem o desempenho desta, devam ser aprovadas pelo ONS, deverão ser priorizadas frente às demais;

(i) Precedência da solicitação.

Tabela 2.1 - Critérios para Análise de Solicitações de Intervenções no SIN

INTERVENÇÕES					
Horizonte de Programação	Prazo da Solicitação	Natureza da Intervenção	Avaliação de Risco	Prioridade de Atendimento	
Programa Mensal de Intervenções	≥ 30 dias	Corretiva	Agente pode administrar necessidades para inserir no PMI	2	
		Preventiva		1	
Atualização do Programa Mensal de Intervenções	≥ 15 dias	Corretiva		2	
		Preventiva		1	
Não integrante do Programa Mensal de Intervenções	G1	≥ 9 dias úteis	Corretiva Especial	Agente negocia data e horário com o ONS	3
	G2	≥ 7 dias úteis			
	G3	≥ 5 dias úteis	Corretiva Especial	Agente negocia data e horário com o ONS	3
	G4	≥ 3 dias úteis	Corretiva Especial	Agente negocia data e horário com o ONS	3
Não integrante do Programa Mensal de Intervenções	Prazo Inferior aos anteriores	Urgência	O ONS define o período mais adequado	4	

G1 (Grupo 1)= intervenções para manutenção corretiva especial com desligamento de equipamentos que impliquem corte de carga em regime normal;

G2 (Grupo 2) = intervenções para manutenção corretiva especial com desligamento de equipamentos principais das interligações regionais ou dos sistemas de atendimento à áreas geoeletricas ou de geração que impliquem em análises mais complexas, envolvendo elevados montantes de remanejamento de geração, análise do comportamento dinâmico do sistema, ou manobras na rede de distribuição;

G3 (Grupo 3)= intervenções para manutenção corretiva especial com desligamento de equipamentos principais das interligações regionais ou dos sistemas de atendimento à áreas geoeletricas, com nível de tensão superior ou igual a 345 kV, que não provoquem as implicações mencionadas no critério G1;

G4 (Grupo 4)= demais intervenções para manutenção corretiva especial que não se enquadrem nos critérios G1 ou G2 ou G3.

Sempre que for identificado o risco de perda de carga, em função das intervenções solicitadas, e existindo o recurso de se despacharem preventivamente às usinas da área, (térmicas ou hidráulicas), fora da ordem de mérito, de modo a minimizar a perda de carga em emergência, este recurso deverá ser utilizado.

Em áreas onde existam Sistemas Especiais de Proteção – SEPs que, em condições de rede alterada, levem a cortes de carga superiores aos previstos em condição de rede completa ou se as análises indicarem que os esquemas implantados são insuficientes, existindo risco de perda de carga não controlada, deverá ser considerada a partida ou a elevação da geração térmica da área de modo a restabelecer os níveis de confiabilidade da área.

Quando de intervenções em equipamentos ou linhas de transmissão nas quais, em função do próprio serviço a ser executado, sejam caracterizados elevados riscos de desligamentos acidentais, deve ser considerada na análise a possibilidade de contingências simples do equipamento. Se for identificado que tal evento pode levar a desdobramentos de maior vulto, tais como desligamentos em cascata de equipamentos e linhas de transmissão ou perda de grandes blocos de carga as mesmas deverão ser realizadas em período em que sejam minimizados os reflexos para o sistema.

2.4 Estágio Atual e Panorama Geral

Como mencionado anteriormente, a avaliação de desligamentos programados no SIN é hoje realizada na Gerência de Programação e Desligamentos (GPD) pertencente a Diretoria de Planejamento e Programação da Operação (DPP) do ONS e segue os critérios contidos nos submódulos dos procedimentos de rede que são homologados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

As regras e critérios existentes no submódulo específico, relacionado aos desligamentos no SIN (submódulo 6.5 dos Procedimentos de Rede), foram resumidos nas Seções 2.2 e 2.3 para que fosse possível introduzir a atual dificuldade na avaliação da segurança do sistema frente aos diversos pedidos de desligamentos nos equipamentos da rede básica.

Com a criação dos agentes independentes (tanto de transmissão, quanto de geração), o número de empresas com as quais o ONS se relaciona se encontra, hoje, no patamar de 361 agentes com tendência de aumentar devido às novas licitações em andamento. Com isto cresce também o número de solicitações de manutenção a serem analisadas diariamente.

O processo atual de solicitações é tal que inicialmente todas as empresas geram, internamente, seus Programas Mensais de Intervenções (PMI) e os submetem ao ONS para que o órgão faça a primeira avaliação da compatibilidade dos mesmos e negocie os horários de liberação das manutenções. Este programa é enviado com um mês de antecedência em relação ao início das manutenções e é passível de alteração até o 15º dia subsequente onde ocorrerá a atualização do PMI. Nesta etapa, o número médio dos desligamentos diários se encontra em torno de 60 intervenções abrangendo todas as regiões do SIN (Sul, Sudeste-Centro Oeste, Norte e Nordeste).

A partir do décimo quinto dia, as intervenções só podem ser classificadas como corretivas especiais ou de urgência para que sejam avaliadas no conjunto dos desligamentos existentes. O prazo para que o ONS receba a programação contendo estas intervenções dos agentes é de ≥ 3 dias úteis (corretiva especial) e até mesmo com 24 horas de antecedência (intervenções de urgência). Com o acréscimo dessas intervenções o número médio dos desligamentos diários pode ficar em torno de 80.

Tanto as intervenções constantes do PMI, quanto as que não se incluem no mesmo seguem o mesmo processo de avaliação e os mesmos critérios do submódulo 6.5 [Proc01]. Os engenheiros responsáveis por cada região do SIN analisam seus respectivos programas de manutenção e muitas vezes não conseguem interagir, devido a alta demanda de programações, com os engenheiros de outras áreas para avaliação da interferência e compatibilidade de seus desligamentos. Devido a longa experiência dos técnicos, esses desligamentos são, na maioria dos casos, conhecidos e totalmente compatíveis e quando dos desligamentos de maior impacto na rede os mesmos passam pela análise completa entre as áreas.

A análise das intervenções pelos engenheiros sempre se inicia pela avaliação em regime permanente do mesmo (fluxo de potência), leitura das instruções de operação e instruções de recomposição e, quando necessário, análise de segurança (análise dinâmica).

Devido a não integração das ferramentas e do grande número de cenários de carga e de rede alterada a serem estudados, esses tipos de análise completa demanda um tempo muito grande do analista, principalmente na etapa inicial de regime permanente (o que já filtra, em um primeiro instante, as intervenções incompatíveis).

Além desta análise pura e simples dos desligamentos, é necessário que o Sistema opere sempre atendendo ao critério N-1, ou seja, mesmo em situação de rede alterada (intervenções programadas) o sistema deve ser capaz de suportar a perda de qualquer outro elemento sem afetar a sua operação, nem gerar restrições de atendimento à carga. Neste caso o analista deverá submeter à programação a uma lista de contingências previamente selecionada para avaliar esta integridade do SIN.

Seria ideal nesta etapa (análise de regime permanente com rede alterada e sob contingências) a utilização de uma ferramenta de otimização que pudesse, automaticamente, realizar a melhor programação possível, considerando um conjunto de restrições, fazendo esta primeira filtragem com todas as intervenções e possibilitando aos analistas um maior tempo para o processamento da análise de segurança.

Atualmente está sendo implantado na GPD um programa de apoio para a gestão dos desligamentos via Web onde os agentes informarão seus respectivos PMIs e posterior intervenções de urgência de maneira mais rápida e eficiente além de se contar com um banco de dados integrado com os respectivos desligamentos e características do mesmo para filtragem e caracterizações automáticas, isso irá facilitar o acesso às programações e a possibilidade de se acoplar uma ferramenta de otimização para avaliar automaticamente todos as solicitações carregadas no sistema de gestão.

2.5 Caracterização do Problema e Perspectivas Futuras

Para se estabelecer a ordem de execução dos desligamentos é necessário, como foi visto, realizar a análise em regime permanente da rede nas diversas configurações degradadas, levando-se em consideração o tempo em que os equipamentos permanecem desligados (envolvendo diversos cenários de carga). Por meio dessas análises, e da experiência prévia dos engenheiros de operação do sistema, toma-se a decisão de negar, adiar ou aceitar a requisição solicitada, impondo-se restrições em relação ao instante e intervalo de tempo do desligamento.

Atualmente, como o Sistema está operando quase no limite de sua capacidade, a tomada de decisão em aprovar ou não solicitações de desligamentos que ocorrem no mesmo período tornou-se crítica. A análise dos desligamentos solicitados através de métodos confiáveis é muito importante, já que decisões equivocadas sobre sua realização, ou mesmo suas medidas preventivas, podem trazer severas conseqüências para a operação do sistema.

A grande dificuldade encontrada hoje em dia é a de não se dispor de ferramentas computacionais integradas que possam avaliar tanto as restrições de regime, como as de segurança (estudos dinâmicos) e de natureza transitória (transitórios eletromagnéticos). Além disso, deve também ser realizada a análise em situações de contingência.

Para um dado conjunto de solicitações de desligamentos, o número de cenários a serem analisados pode ser extremamente grande. Dessa maneira, dada a natureza combinatória do problema, uma análise exaustiva, não automática, de todas as situações, se torna inviável para um sistema de grande porte como, por exemplo, o Sistema Brasileiro.

Os algoritmos genéticos (AGs) são uma técnica de otimização combinatória baseada nos processos observados na evolução natural das espécies e utilizados em problemas nos quais uma das características é a natureza combinatória dos mesmos. A idéia básica consiste em que, de forma similar a teoria biológica dos sistemas naturais, os melhores indivíduos sobrevivem e geram descendentes com suas características. Estes elementos, que comporão as novas gerações, tendem a serem melhores que seus antecessores.

Esse tipo de técnica foi utilizada neste trabalho para propor a construção de uma metodologia de avaliação automática das restrições de regime permanente (tensão, fluxos e atendimento a carga) que possa servir de auxílio à tomada de decisão dos especialistas em relação à realização ou reprogramação de uma intervenção.

A idéia básica consiste em se formular uma função, chamada Função de Aptidão, que será avaliada automaticamente pelo Algoritmo Genético, o qual poderá avaliar se uma dada solução estará adequada ou não, obedecendo a uma série de restrições impostas. As restrições são as anteriormente mencionadas na Seção 2.2 (tópicos (a), (c) e (e)). A função de aptidão será tal que deverá considerar a minimização da mudança de horário (reprogramação) das intervenções inicialmente solicitadas pelos agentes no PMI.

Ainda como perspectiva futura, pode-se pensar em ter uma ferramenta, como a aqui proposta, comunicando-se diretamente com o programa de apoio para a gestão dos desligamentos (SGI) via Web que está sendo implantado na GPD.

O próximo capítulo apresenta uma revisão teórica sobre Algoritmos Genéticos, ferramenta a ser utilizada no desenvolvimento da metodologia proposta.

CAPÍTULO 3: INTRODUÇÃO A ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1 Introdução

Charles Darwin introduziu a idéia da “Teoria da Evolução”, onde afirma que as espécies naturais vão evoluindo para adaptar-se ao meio em que vivem. Aqueles indivíduos que melhor se adaptarem terão maior probabilidade de sobrevivência até a idade adulta e procriar, fazendo assim com que suas características genéticas passem de geração em geração.

Os Algoritmos Genéticos (AGs) constituem uma classe de procedimentos estocásticos de inteligência artificial, baseados no modelo de evolução de sistemas naturais: preservação de informação genética e busca da sobrevivência através da adaptação ao ambiente [Mic96]. Foram concebidos por Holland [Hol75] com o intuito de simular a evolução de um conjunto de indivíduos vivos em um ambiente natural, percebendo-se, posteriormente, seu potencial como uma técnica para otimização global.

Antes do desenvolvimento dos AGs, diversos cientistas da computação utilizavam-se formalmente de outros sistemas evolucionários para resolver problemas de otimização em engenharia [Mitch96]. Posteriormente, a inovação em submeter, seqüencialmente, um conjunto de indivíduos a um vetor de operações ditas genéticas [Gold89], distinguiu os AG dos algoritmos evolucionários até então existentes.

Algumas vantagens a eles comumente associadas são: i) possibilitam busca global em funções multimodais; ii) permitem o tratamento simultâneo de variáveis reais e inteiras; iii) dispensam a avaliação de derivadas, sendo aplicáveis a funções não diferenciáveis ou não convexas. Por outro lado, em decorrência de sua natureza probabilística, não há garantia da obtenção da solução ótima, já tendo sido relatadas simulações nas quais um ótimo local, não global, foi obtido [Gold89].

Segundo [Mitch96], o sucesso ou insucesso dos AG depende da sua capacidade em equilibrar dois objetivos aparentemente antagônicos: i) exploração de várias regiões do domínio; ii) perpetuação das informações contidas na população vigente.

Estudos valiosos de cunho tanto experimental quanto teórico têm sido desenvolvidos no sentido de melhorar o entendimento dos operadores genéticos. Por bastante tempo, o Teorema Fundamental dos Algoritmos Genéticos [Hol75] constituiu a base teórica para análise dos AGs, entretanto este teorema tem limitações que são pouco perceptíveis à primeira vista. De fato, alheios a algumas sutilezas presentes no Teorema Fundamental dos Algoritmos Genéticos, usuários dos AGs valeram-se, indevidamente, deste teorema para justificar alguns de seus resultados.

A limitação do Teorema Fundamental dos Algoritmos Genéticos motivou trabalhos recentes que procuraram aprimorar o entendimento teórico dos AG tratando-os como processos estocásticos modelados analiticamente. Os resultados obtidos por estes trabalhos, embora representem um avanço teórico notável em relação à base originalmente proposta, ainda não explicam satisfatoriamente o modo como os operadores genéticos atuam, não permitindo estabelecer estratégias práticas definitivas de ajuste dos parâmetros dos AG.

Outra linha de pesquisa bastante explorada consiste na investigação experimental dos operadores genéticos, cujos primeiros relatos datam da proposição dos algoritmos.

3.2 Conceitos Básicos sobre Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos são uma família de modelos computacionais inspirados na evolução, os quais modelam uma solução, para um problema específico, em uma estrutura de dados como a de um cromossomo. Neles se aplicam operadores que re-combinam estas estruturas preservando informações críticas durante o processo de busca por uma melhor solução.

Os AGs combinam o princípio da sobrevivência dos mais aptos com trocas de informações genéticas entre indivíduos para o desenvolvimento de métodos de otimização simples e robustos. A estratégia de busca é paralela e estruturada, mas aleatória, voltada em direção ao reforço da busca de pontos de “alta aptidão”, ou seja, de pontos nos quais a função a ser minimizada (ou maximizada) tem valores relativamente baixos (ou altos).

Através de processos iterativos, exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos. Cada iteração é chamada de geração.

Numa população de candidatos, são aplicados os princípios de seleção e se determinam quais indivíduos conseguirão se reproduzir, gerando um número determinado de descendentes para a próxima geração, com uma probabilidade determinada pelo seu índice de aptidão. Aqueles indivíduos com maior adaptação têm maiores chances de se reproduzir.

Este processo adaptativo pode ser usado para resolver problemas de otimização combinatória, sobre um complexo espaço de busca, formulados como:

$$\text{Max } f(x)$$

$$\text{s/a } g_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, r$$

$$x \in S$$

Onde:

$f(x)$ - função objetivo

$g_i(x)$ - restrição de igualdade

$h_j(x)$ - restrição de desigualdade

$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - conjunto de variáveis do problema

S - espaço de busca n-dimensional

Na representação de um problema busca-se codificar as informações de maneira análoga aos cromossomos biológicos. A maior parte das representações são genótípicas, utilizando vetores de tamanho finito e um alfabeto finito.

Na representação através de vetores binários, cada elemento de um vetor denota a presença (1) ou ausência (0) de uma determinada característica (genótipo). Estes elementos também podem ser combinados formando as características reais do indivíduo (fenótipo). Na representação em vetores binários, as operações padrão podem ser utilizadas, facilitando o seu emprego em diferentes classes de problemas.

O critério de seleção vai fazer com que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. Através dos operadores genéticos, uma dada população, consegue gerar populações sucessivas que melhorem sua aptidão com o tempo. Estes operadores são: cruzamento e mutação. Com estes operadores se obtém uma geração totalmente nova, mas que possui, de alguma forma, características genéticas dos pais, ou seja, a população se diversifica e ao mesmo tempo mantém as características de adaptação adquiridas através das gerações. O operador de elitismo é utilizado para prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos. Assim, eles podem ser simplesmente repetidos a cada nova geração.

3.3 Funcionamento dos Algoritmos Genéticos.

O princípio básico do funcionamento dos Algoritmos Genéticos é que um critério de seleção vai fazer com que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. A maioria dos métodos de seleção são projetados para escolher preferencialmente indivíduos com maiores notas de aptidão, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população.

Um conjunto de operações é necessário para que, dada uma população, se consiga gerar populações sucessivas que (espera-se) melhorem sua aptidão com o tempo. Estes operadores são: cruzamento (crossover), inversão de partes do cromossomo e mutação. Eles são utilizados para assegurar que a nova geração seja totalmente nova, mas possuí, de alguma forma, características de seus pais, ou seja, a população se diversifica e mantém características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. Para prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos, eles podem ser automaticamente colocados na próxima geração, através da reprodução elitista. As mutações provêm certa variação e ocasionalmente introduzem alterações benéficas aos cromossomos. A inversão é um mecanismo de alteração pela inversão do código do cromossomo. O cruzamento é o responsável pelo intercâmbio de material genético proveniente dos cromossomos geradores. Usando o cruzamento, as chances das características ideais se perpetuarem durante o processamento aumentam devido os pais com graus de adaptações maiores se reproduzirem com maior frequência. Esse ciclo é repetido um determinado número de vezes.

A Figura 3.1 mostra o ciclo de funcionamento de um algoritmo genético básico.

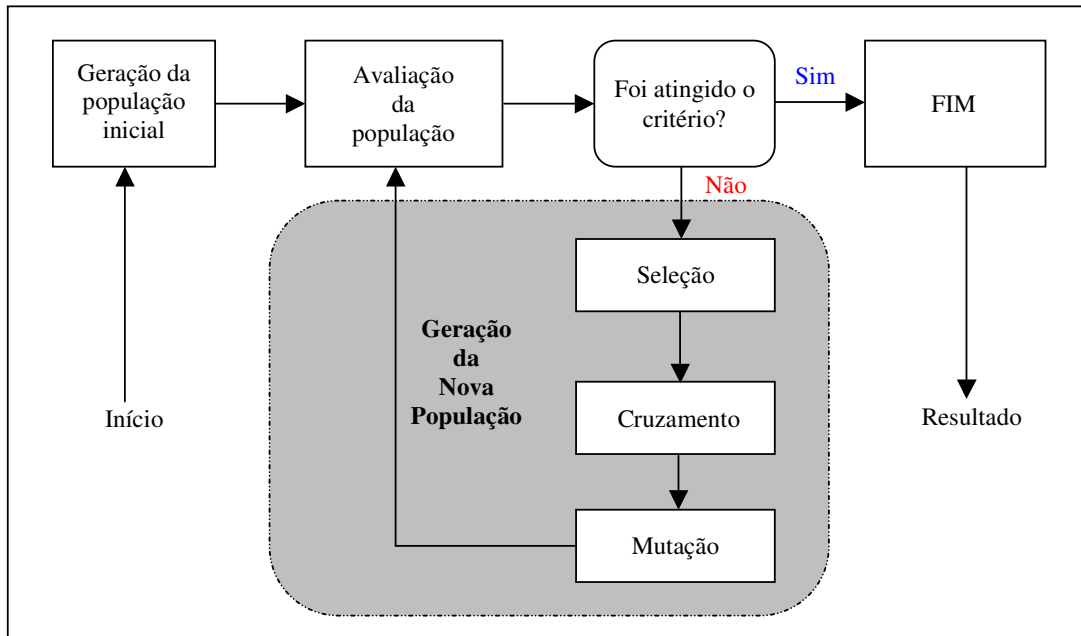


Figura 3.1 Exemplo do funcionamento do Algoritmo Genético

Este processo consiste dos seguintes passos:

1. É gerada uma população inicial aleatoriamente.
2. Avaliação dos indivíduos da população de acordo com a função aptidão (ou *fitness*).
3. Verifica-se se já algum critério de parada já é satisfeito (normalmente um número máximo de gerações).
4. Executam-se as operações de seleção, cruzamento e mutação para gerar uma nova população.
5. A nova população voltará a ser avaliada conforme o passo 2.

3.4 Processamento de um Algoritmo Genético

Como vimos anteriormente, um Algoritmo Genético possui várias tarefas que precisam ser feitas para solucionar problemas e agora você vai entender qual a função de cada um.

3.5 Módulo de Avaliação

O módulo de avaliação é onde se encontra a ligação entre o algoritmo e o problema sendo resolvido. Neste módulo a função de avaliação (*fitness*) é responsável por determinar o grau de aptidão dos indivíduos, o qual é determinado através do cálculo da função objetivo do problema de otimização que foi formulado.

3.6 Módulo de Estruturação

Responsável pelas seguintes tarefas:

1. Representação

Dados representados através de codificação em um alfabeto finito (ex: binário), facilitando o processo de seleção e reprodução dos indivíduos.

2. Inicialização

A inicialização da primeira população, denominada primeira geração, geralmente é aleatória, mas também pode partir de um conjunto pré-definido de indivíduos.

3. Seleção dos pais

Para escolher os indivíduos na população que criarão os descendentes para a próxima geração, existem muitos mecanismos de seleção, sendo as mais utilizadas as técnicas da roleta e do torneio. A probabilidade de seleção de um cromossomo S_i é dada por:

$$P_{sel}(S_{si}) = \frac{a(S_i)}{\sum_{j=1}^n a(S_j)} \quad (3.1)$$

3.6.1 Técnica Universal ou por Roleta:

Inicialmente proposto por Goldberg [Gold89]. É um método bastante simples que consiste em criar uma roleta na qual cada cromossomo possui um segmento proporcional à sua aptidão. Suponhamos uma população de 6 cromossomos cuja aptidão é dada por uma função qualquer (neste caso é simplesmente a conversão de binário para decimal) conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de exemplo para ilustrar a seleção por roleta

Cromossomo nº	String	Aptidão	% do total
1	0101101	45	13,2
2	1011001	89	26,2
3	1111101	125	36,7
4	0010101	21	6,1
5	0110100	52	15,2
6	0001001	9	2,6
	Total	341	100,0

Com os valores percentuais constantes na quarta coluna da tabela, pode-se elaborar a roleta constante da Figura 3.2. Esta roleta irá ser girada 6 vezes para efetuar a seleção da população auxiliar (amostra) levando em conta que, os indivíduos com maior área na roleta tem, conseqüentemente, maiores chances de serem selecionados mais vezes que os indivíduos menos aptos.

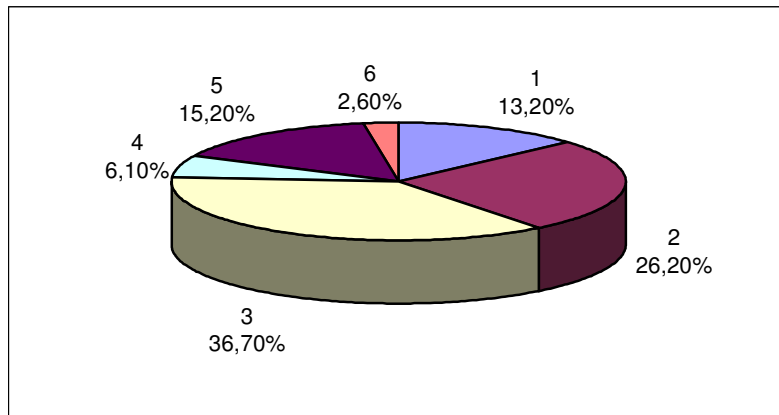


Figura 3.2 Representação gráfica da roleta.

3.6.2 Técnica por Torneio:

Neste método cada elemento da amostra é selecionado elegendo-se o melhor indivíduo de um conjunto de z elementos tomados aleatoriamente na população base. Isto é repetido o número de vezes necessárias para completar a amostra. O valor do parâmetro z costuma ser um valor inteiro pequeno em relação ao tamanho total da população base, sendo em geral 2 ou 3.

É comum se adotar também estratégias de seleção que levem em conta o elitismo, onde se busca garantir que o melhor (ou melhores) indivíduos de uma geração estarão presentes na geração seguinte. Neste caso, tais indivíduos são sempre selecionados e simplesmente copiados para a próxima geração.

3.6.3 Módulo de Reprodução

O módulo de reprodução é utilizado nos indivíduos “pais” selecionados para efetuar a reprodução, garantindo a próxima geração de indivíduos. Geralmente são utilizados os operadores de mutação e de cruzamento em um ponto, descritos a seguir.

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 dada estrutura fornecendo assim, meios para introdução de novos elementos na população. Desta forma, 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, pois com este mecanismo, altera-se levemente a direção da busca. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação; geralmente se utiliza uma taxa de mutação pequena (<1%), pois é um operador genético secundário.

$$P_{mut}^t = P_{mut}^{t-1} \times \exp^{-C_{mut} \times ger} \quad (3.2)$$

Onde:

P_{mut}^t é a probabilidade de mutação na geração t;

C_{mut} é uma constante que define a taxa de decréscimo da probabilidade de mutação;

ger é o numero da geração

A mutação na representação binária é realizada pela troca de um por zero e vice-versa, conforme pode ser notado na Figura 3.3

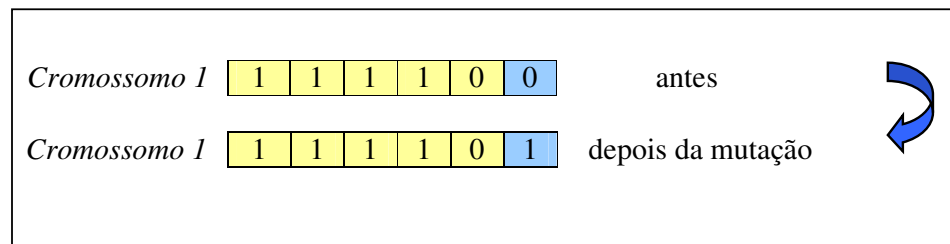


Figura 3.3 Exemplo de mutação.

Cruzamento em um ponto:

O operador de cruzamento em um ponto corresponde a uma divisão do material genético dos pais em um ponto aleatório para misturá-los e gerar o novo cromossomo que pertencerá ao filho. A seleção natural responde pelo ajuste dos cromossomos e a seleção dos pais, enquanto que a mutação e o cruzamento respondem pela diversidade genética dos filhos.

Uma observação importante a respeito do cruzamento é que se podem gerar filhos completamente diferentes dos pais e mesmo assim contendo diversas características em comum. Outra questão é que o cruzamento não modifica um bit na posição em que os pais têm o mesmo valor, considerada uma característica cada vez mais importante com o passar das gerações.

Um exemplo deste operador pode ser visto na seguinte figura:

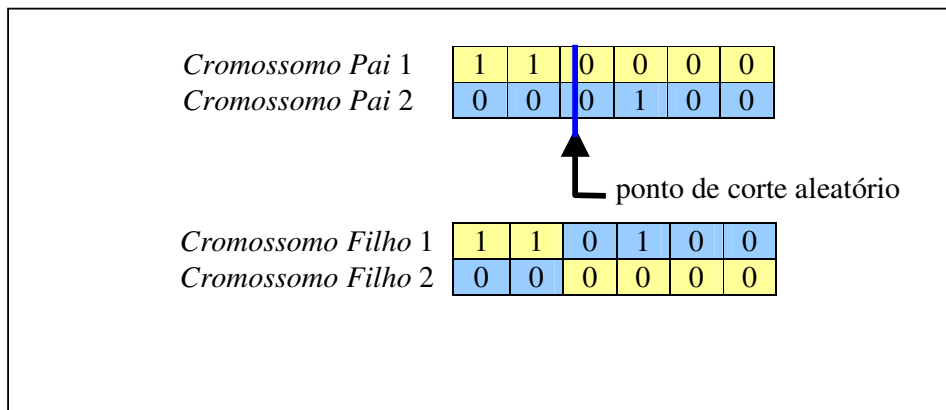


Figura 3.4 Exemplo de operador de cruzamento de um ponto.

São utilizados também algumas variações desta técnica onde pode haver troca de material genético entre os indivíduos em vários pontos, comumente chamado de Cruzamento em Vários Pontos e um outro que não utiliza pontos de cruzamento, mas determina, através de um parâmetro global, qual a probabilidade de cada variável ser trocada entre os pais, chamado Cruzamento Uniforme.

3.6.4 Técnica de Deleção

Está implícita na rotina de cruzamento e mutação. Quando o vetor de população recebe os filhos resultantes da reprodução dos pais escolhidos, a população anterior é automaticamente destruída.

3.6.5 Elitismo

A técnica mais utilizada para melhorar a convergência dos AGs é a reprodução elitista, que tem como objetivo prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos, assim esta técnica força ao AG reter um certo número de “melhores” indivíduos para ser colocados na próxima geração. Uma outra técnica muito utilizada é a reprodução por gerações, em que a nova geração substitui inteiramente o lugar da primeira.

3.7 Parâmetros Genéticos

É importante também, analisar de que maneira alguns parâmetros influem no comportamento dos AGs, para que se possa estabelecê-los conforme as necessidades do problema e dos recursos disponíveis.

3.7.1 Tamanho da População

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos AGs. Com uma população pequena o desempenho pode cair, pois deste modo a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. 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, ao se trabalhar com grandes populações, são maiores os requisitos computacionais e pode se ter uma convergência mais lenta.

3.7.2 Taxa de Cruzamento

Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se esta for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente, assim, a maior parte da população será substituída podendo ocorrer perda de estruturas de alta aptidão. Com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento.

3.7.3 Taxa de Mutação

Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada posição fique estancada em um valor, além de possibilitar que se chegue em qualquer ponto do espaço de busca. Com uma taxa muito alta a busca se torna essencialmente aleatória.

3.7.4 Intervalo de Geração

Controla a porcentagem da população que será substituída durante a próxima geração. Com um valor alto, a maior parte da população será substituída podendo ocorrer perda de estruturas de alta aptidão. Com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento.

3.8 As Diferenças entre os AGs e os Métodos Tradicionais

A seguinte lista é uma breve descrição das diferenças essenciais entre AGs e outras formas de otimização.

1. Os algoritmos genéticos utilizam uma forma codificada dos valores de uma função (conjunto paramétrico), em vez dos valores reais. Esse tipo de codificação apresenta inúmeras vantagens no decorrer do processo de otimização como tornar as operações genéticas mais fáceis de serem executadas; tornar possível o trabalho com variáveis que assumam valores contínuos; facilitar a variação da faixa de trabalho dos parâmetros; além de apresentar relativa simplicidade na variação da precisão dos valores de cada parâmetro.

2. Os algoritmos genéticos usam um conjunto, ou população, de pontos para conduzir uma pesquisa, não somente um ponto isolado do espaço de pesquisa. Isto dá aos AGs a capacidade de pesquisar em espaços ruidosos com vários pontos ótimos locais. Os AGs observam diferentes áreas do espaço do problema de uma só vez e usam todas estas informações para se guiarem.
3. Os algoritmos genéticos usam somente informações geradas por si mesmos para se guiarem pelo espaço de pesquisa. Muitas outras técnicas necessitam de uma grande variedade de informações para guiarem-se. O método *hill-climbing* requer derivadas, por exemplo. A única informação utilizada pelos AGs é uma medida de adaptabilidade de cada ponto no espaço (as vezes conhecida como valor da função objetiva). Uma vez conhecido este valor sobre um ponto, os AGs podem usá-lo para continuar a pesquisa pelo valor ótimo.
4. Os algoritmos genéticos possuem natureza probabilística, não determinística. Isto é resultado direto das técnicas randômicas usadas pelos AGs.
5. Os algoritmos genéticos são inerentemente paralelos. Este é um dos mais importantes e poderosos aspectos dos AGs. Desta maneira tratam um grande número de pontos (strings) simultaneamente.

3.9 Conclusões

Os algoritmos genéticos é um representante de uma família de modelos computacionais inspirados na evolução. Eles modelam uma solução, para um problema específico, em uma estrutura de dados como a de um cromossomo e utilizam operadores que recombina estas estruturas preservando informações críticas durante o processo de busca por uma melhor solução. Estes algoritmos são utilizados para lidar com problemas complexos de otimização combinatória, como o aqui tratado.

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 Formulação do Problema

Em um sistema interligado, as solicitações de desligamentos originadas de diferentes empresas devem ser coordenadas para que o desempenho da operação do sistema não seja comprometido. O problema de programação de desligamentos em redes de energia elétrica é formulado neste trabalho como um problema de otimização, no qual busca-se a minimização de uma função que representa a reprogramação de uma série de desligamentos. Neste caso é desejável, na medida do possível, manter as solicitações originadas de diferentes empresas. Para tal, o conjunto de restrições que devem ser atendidas são: a capacidade de atender toda a demanda em regime normal de operação, a não ocorrência de violação dos limites operativos nominais e a capacidade de suportar qualquer contingência simples sem perda de carga e sem ocorrer violações dos limites operativos de emergência.

Não serão abordadas neste trabalho as restrições dinâmicas do sistema elétrico, que dizem respeito ao amortecimento das oscilações eletromecânicas das máquinas rotativas frente a contingências e perturbações.

Intervenções que levem a qualquer violação nas restrições anteriormente descritas deverão ser reprogramadas para períodos onde as mesmas sejam eliminadas ou reduzidas com o mínimo de desvio possível em relação à solicitação original. Quando diferentes pedidos de intervenções se sobrepuserem em um mesmo período, não sendo compatíveis entre si, deve-se levar em consideração a prioridade de cada uma, conforme discutido na Tabela 2.1. Logo, o problema pode ser formulado como:

Min (R_{int})
s/a solução do fluxo de potência (atendimento à demanda);
requisito de inviolabilidade dos limites operativos dos equipamentos;
requisito de suportabilidade a contingências simples;
requisito de observação às prioridades das intervenções

onde: R_{int} - Reprogramação de Intervenções.

A minimização na reprogramação se faz necessário para tentar preservar a programação original de cada empresa, minimizando custos e o risco dos equipamentos ficarem indisponíveis à operação do sistema devido ao um adiamento de sua manutenção.

4.2 Programação de Desligamentos via Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos são algoritmos de otimização global, baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética. Eles empregam uma estratégia de busca paralela e estruturada, mas aleatória, que é voltada em direção ao reforço da busca de pontos de "alta aptidão", ou seja, pontos nos quais a função a ser minimizada (ou maximizada) tem valores relativamente baixos (ou altos).

4.2.1 Modelagem dos cromossomos

A forma de representar os dados na maioria das implementações de Algoritmos Genéticos é a binária, já que a mesma facilita os processos de seleção e reprodução dos indivíduos. No presente problema, de minimização da reprogramação de desligamentos sujeito a restrições, esta representação foi adotada e codifica os horários iniciais de todos os desligamentos a serem considerados. A duração de cada desligamento é previamente conhecida.

Neste trabalho, um cromossomo é representado por um vetor contendo segmentos binários, onde cada segmento é composto por m genes e representa o horário inicial de cada desligamento. Isto está ilustrado na Figura 4.1:

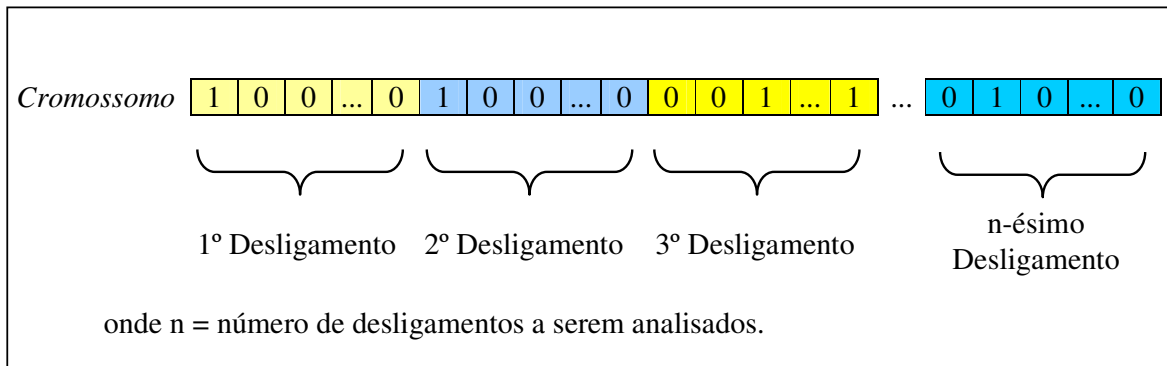


Figura 4.1 Modelo do Cromossomo

Pode-se observar que, no cromossomo onde está representado a programação a ser analisada, cada segmento de m genes contém a representação binária do horário inicial de um desligamento. Na definição do número de genes m deve-se avaliar inicialmente o período da programação que se quer representar (ex: um dia, uma semana, etc). De acordo com o número de genes dos segmentos (m), os mesmos podem representar diferentes números binários, cujo valor máximo correspondente no sistema decimal será um intervalo de tempo onde, a partir de 0:00 do dia do primeiro desligamento, todos os outros desligamentos da programação deverão ocorrer. O tamanho ideal deste intervalo não é conhecido a priori, mas deve ser tal que permita uma programação de desligamentos que atenda os objetivos definidos no problema de otimização anteriormente apresentado. A definição de m define também o espaço de busca pela solução ótima. Por exemplo, ao se definir $m=5$ é possível estabelecer programações onde os horários iniciais de todos os desligamentos estão compreendidos entre 0:00h e 31:00h (ou seja, 7:00h do dia seguinte). As representações dos instantes de tempo $t=0:00$ e $t=31:00$ são ilustradas abaixo:

0	0	0	0	0
---	---	---	---	---

→
t = 0 (0:00h do 1° dia)

1	1	1	1	1
---	---	---	---	---

→
t = 31 (7:00h do 2° dia)

4.2.2 Condições de carregamento

Em um cromossomo estão representados os horários nos quais os desligamentos se iniciam (programação de desligamentos proposta). Como a duração de cada desligamento é conhecida a priori, é possível saber a configuração do sistema em cada instante de um dia, sendo possível saber se um ou mais equipamentos estarão desligados em uma dada hora. Isto será importante para compor os cenários de análise do sistema sob desligamentos. Além de conhecer os desligamentos em um determinado instante, é importante também conhecer o nível de carregamento do sistema para que a análise de desempenho possa ser realizada. Neste trabalho considerou-se os seguintes níveis de carregamento em função da hora do dia a se realizar uma análise:

- Entre 0:00h e 8:00h – nível de carga leve
- Entre 8:00h e 18:00h – nível de carga média
- Entre 18:00h e 24:00h – nível de carga pesada

4.3 Formulação da Função Aptidão

Conforme discutido no Capítulo 3, os AGs necessitam apenas do valor da função de aptidão para guiar o processo de busca pela solução ótima. Tal função deve refletir adequadamente o compromisso entre a minimização das reprogramações e as restrições a serem atendidas.

A função R_{int} , apresentada anteriormente deverá ser tal que penalize os desvios em relação ao objetivo de minimizar a reprogramação das intervenções. Além disso, ela deverá levar em consideração também a prioridade de cada desligamento (conforme Tabela 2.1). Isto pode ser representado através da expressão (4.1):

$$R_{int} = \left[\sum_{i=1}^n \Delta h(i) * P_{ri}(i) \right] * P_{dsv} \quad (4.1)$$

Onde $\Delta h(i)$ é o desvio em horas do i -ésimo desligamento de uma programação proposta em relação ao correspondente horário na programação inicial, $P_{ri}(i)$ é a prioridade associada ao i -ésimo desligamento e P_{dsv} a penalidade aplicada ao desvio na programação. O valor de n representa o número de desligamentos considerados na programação.

4.3.1 Requisito de Atendimento à Carga

Para cada cromossomo (solução proposta), este requisito é avaliado durante a execução de um programa de Fluxo de Potência para cada hora do dia onde ao menos um desligamento é considerado. Caso seja detectado o não atendimento a carga (através da não convergência do Fluxo de Potência), um incremento correspondente a uma penalidade é imposto à função de aptidão. Com isto o problema passa a ser formulado como:

$$Min[R_{int} + (P_{dem} * \sum_{t=1}^{na} k_t)] \quad (4.2)$$

onde P_{dem} é a penalidade imposta pelo não atendimento à carga, sendo $k_t=1$ quando a carga não é atendida durante a análise do t -ésimo cenário e $k_t=0$ quando a carga é atendida em tal cenário, na representa o número de cenários analisados. Nota-se de (4.2) que, considerando o objetivo de minimizar R_{int} (reprogramação de desligamentos) o acréscimo da parcela correspondente a penalização pelo não atendimento a demanda pode fazer com que maiores afastamentos da programação original sejam admitidos para que o atendimento a demanda seja sempre respeitado.

4.3.2 Requisito de Atendimento aos Limites Operativos dos Equipamentos

Para cada cromossomo (solução proposta), este requisito é avaliado durante a execução de um programa de Fluxo de Potência e, caso seja detectado o não atendimento aos limites operativos dos equipamentos, um incremento correspondente a uma penalidade é imposto à função de aptidão. Com isto o problema passa a ser formulado como:

$$\text{Min}[R_{\text{int}} + (P_{\text{dem}} * \sum_{t=1}^{na} k_t) + (P_v * \sum_{i=1}^{nv} \text{Viol}v_i) + (P_n * \sum_{j=1}^{nFn} \text{Viol}Fn_j) + (P_e * \sum_{k=1}^{nFe} \text{Viol}Fe_k)] \quad (4.3)$$

Onde:

P_v – penalidade imposta quando ocorrem violações de tensão na programação analisada

P_n – penalidade imposta quando ocorrem violações de limites de fluxo nominal

P_e – penalidade imposta quando ocorrem violações de limites de fluxo de emergência

$\text{Viol}v_i$ – magnitude da i -ésima violação de tensão observada

$\text{Viol}Fn_j$ – magnitude da j -ésima violação de limite de fluxo nominal observada

$\text{Viol}Fe_k$ – magnitude da k -ésima violação de limite de fluxo de emergência observada

nv - número total de violações de tensão observadas na programação

nFn - número total de violações de limites de fluxo nominal observadas na programação

nFe - número total de violações de limites de fluxo de emergência observadas

A diferença entre a avaliação das violações de fluxo e as violações de tensão é a de que para os fluxos de potência existem dois limites superiores sendo observados: o limite nominal e o limite de emergência, este segundo de valor maior, porém devendo ser de curta duração. Dada a maior severidade da violação do limite de emergência, isto deve ser levado em conta na atribuição dos valores das penalidades, devendo-se ter $P_e > P_n$.

4.3.3 Requisito de Atendimento a Contingências Simples

Para cada cromossomo (solução proposta), este requisito é avaliado durante a análise de um conjunto de contingências e, caso seja detectada o não atendimento a carga ou o não atendimento aos limites operativos dos equipamentos, um incremento correspondente a uma penalidade é imposto à função de aptidão. Com isto o problema passa a ser formulado como:

$$\begin{aligned}
& \text{Min}[[R_{\text{int}} + (P_{\text{dem}} * \sum_{t=1}^{na} k_t) + (Pv * \sum_{i=1}^{nv} \text{Viol}V_i) + (Pn * \sum_{j=1}^{nFn} \text{Viol}Fn_j) + (Pe * \sum_{k=1}^{nFe} \text{Viol}Fe_k)] + \\
& + \sum_{l=1}^{nctg} [(P_{\text{dem}}^{(l)} * \sum_{t=1}^{na(l)} k_t^{(l)}) + (Pv^{(l)} * \sum_{i=1}^{nv(l)} \text{Viol}V_i^{(l)}) + (Pe^{(l)} * \sum_{k=1}^{nFe(l)} \text{Viol}Fe_k^{(l)})]] \quad (4.4)
\end{aligned}$$

Onde $nctg$ é o número de contingências a analisar. Pode-se observar que, neste caso, o atendimento a demanda e aos limites operativos também deve ser verificado também para os cenários da rede em contingência, podendo-se definir diferentes penalidades para cada contingência considerada. A principal diferença neste caso é que são observados apenas os limites de emergência, não sendo observados os limites nominais de fluxo dos equipamentos, pois já se configura uma situação de emergência na rede elétrica.

4.4 Algoritmo Proposto

O algoritmo proposto é desenvolvido a partir de uma programação inicial de intervenções, a ser otimizada segundo os critérios anteriormente apresentados. Entre as informações necessárias para que se realize o processo de busca pela solução ótima está uma lista de equipamentos a sofrer manutenção, a duração da intervenção, assim como a prioridade associada a cada desligamento.

A cada geração obtida com o algoritmo genético tem-se uma população de cromossomos, cada um representando uma solução proposta para o problema. No processo de avaliação de cada cromossomo, são identificados os instantes onde ocorrem os desligamentos, se existem superposições entre eles e os níveis de carregamento associados, compondo cada um destes instantes um cenário para análise. Durante a análise do cromossomo o atendimento às restrições é verificado e, se necessário, as correspondentes penalidades são aplicadas, obtendo-se finalmente o valor da aptidão. Esse processo ocorre repetidas vezes com as programações propostas ao longo da evolução do algoritmo genético. Estas programações são melhoradas a cada geração e ao final do processo a melhor solução obtida na última geração será assumida como a solução do problema.

A Figura 4.2 apresenta o fluxograma básico das etapas a serem processadas no algoritmo proposto.

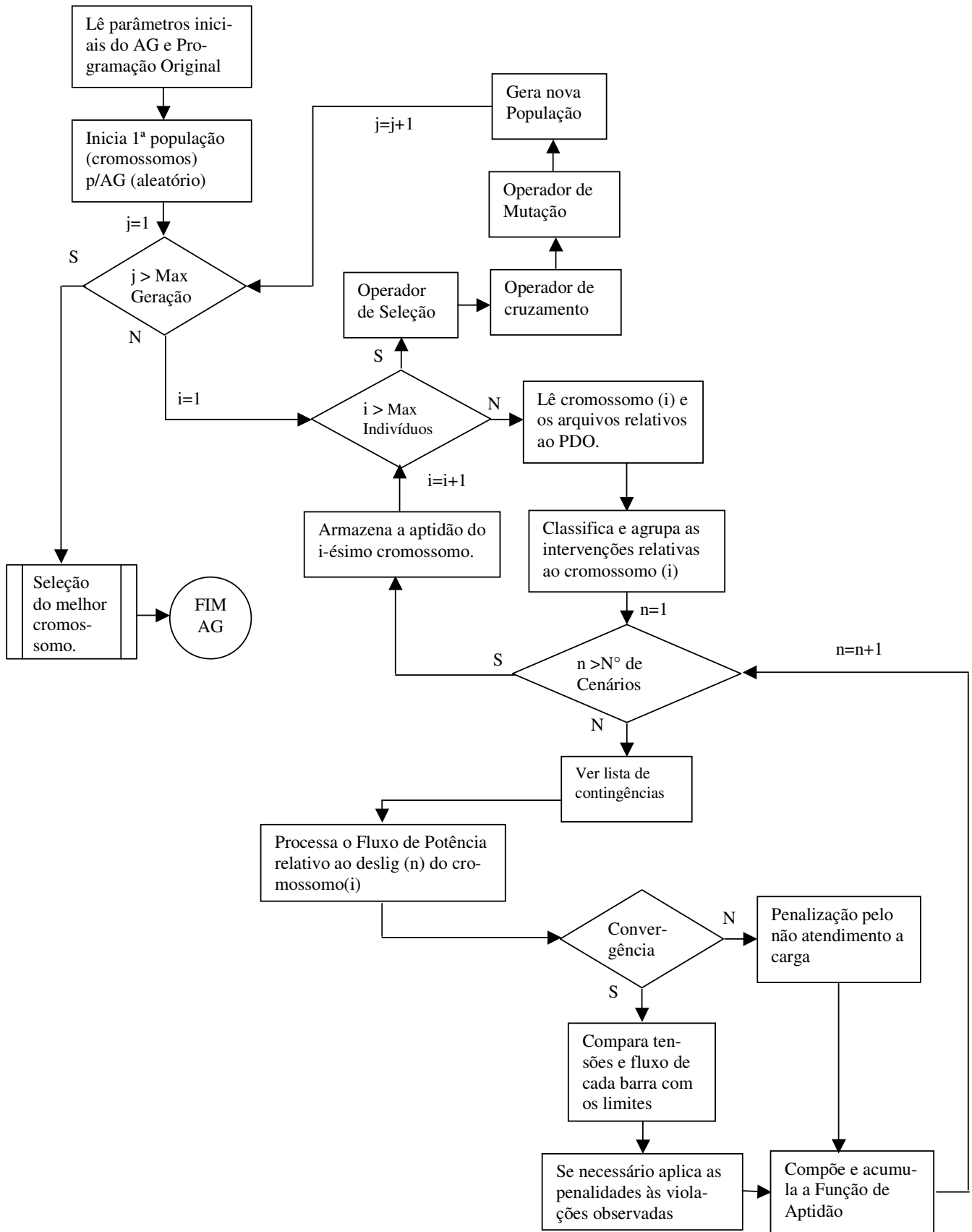


Figura 4.2 Fluxograma Básico

4.5 Considerações sobre a Metodologia

A metodologia proposta depende de uma série de fatores para que se tenha um bom desempenho ao longo do processo de busca pela solução ótima. Alguns destes fatores são comentados a seguir.

Conforme discutido na Subseção 4.2.1, pode-se concluir que a modelagem dos cromossomos é muito importante no processamento do algoritmo genético, pois irá definir o espaço de busca que contém diversas possíveis soluções para a programação de desligamentos. Neste trabalho foi adotado um modelo de cromossomo contendo genes que são agrupados em diversos segmentos, cada segmento sendo uma representação binária do horário inicial de um desligamento específico. A dimensão do cromossomo depende do número de desligamentos a serem considerados e do intervalo de tempo máximo admitido para a realização da programação (início de todos os desligamentos). Por exemplo, para 10 intervenções a serem realizados em um intervalo de 31 horas, o tamanho do cromossomo seria de 50 genes (10 segmentos de 5 genes), para 14 intervenções no mesmo intervalo de tempo o tamanho seria de 70 genes e assim por diante. Considerando o intervalo de 31 horas para a realização dos desligamentos, cada segmento de 5 genes pode assumir representações binárias que variam de “00000” (que corresponde ao instante $t=0$, ou a 0:00h de um dia) a “11111” (que corresponde ao instante de tempo $t=31$, ou às 7:00 do dia seguinte). Este intervalo seria escolhido para acomodar a Programação Diária da Operação (PDO).

Por outro lado, se a intenção for de avaliar uma programação quinzenal de intervenções, o agrupamento de genes deverá obviamente ser superior a 5 para que o intervalo possa cobrir as 360h (15 dias) relativas ao período de manutenção e ainda contemplar uma margem de busca por horários alternativos adjacentes. Isto significa que a modelagem do cromossomo deve prever a possibilidade de, caso seja necessário, extrapolar o período previsto para a ocorrência de todos os desligamentos, de forma a atender às restrições operativas.

Na Seção 4.3 foi apresentada e discutida a função de aptidão utilizada neste trabalho. Conforme discutido, este é um parâmetro fundamental para a convergência do algoritmo e a sua formulação deve ser a mais representativa possível da característica do problema a ser otimizado.

É possível perceber que o modelo adotado é fortemente influenciado pelas penalidades associadas às restrições, as quais propiciam também uma maior flexibilidade ao projetista para formular o problema e também incluir aspectos qualitativos e que levem também em consideração a experiência com o sistema. Por exemplo, em determinada análise é possível priorizar o atendimento a certas restrições em relação a outras promovendo um ajuste apropriado das penalidades impostas a elas. Por exemplo, na função de aptidão descrita por (4.4) é possível levar em consideração o conhecimento qualitativo de que uma contingência é menos importante (ou então de ocorrência mais improvável) do que outra atribuindo penalidades diferentes para o não atendimento às restrições em cada um dos cenários pós-contingência.

No Sistema Interligado Nacional (SIN), por exemplo, pode-se pensar em associar penalidades diferentes às diferentes regiões ou áreas de interesse. Em São Paulo, na região do Paranapanema, onde existe um grande controle de reativos devido a presença de grandes blocos de geração e a preocupação maior é com o escoamento da geração (carregamentos na rede de transmissão) e não com o controle da tensão, as penalidades associadas às violações de limites de fluxo nominal e de emergência poderiam ser muito maiores que as penalidades associadas às violações de tensão.

A busca inicial pelos melhores valores e para o equilíbrio entre as penalidades implica em uma extensa etapa de testes e processamentos até que a resposta do algoritmo genético reflita a expectativa de atendimento à função objetivo e às restrições. Neste trabalho foram pesquisados vários parâmetros para estas penalidades e os valores escolhidos serão apresentados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5: SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A metodologia apresentada no Capítulo 4 foi testada utilizando o sistema IEEE 14 barras e no sistema de 440kV de São Paulo. Este capítulo apresenta a descrição das simulações realizadas, os parâmetros e penalidades utilizadas, bem como os resultados obtidos.

5.1 Descrição das Simulações

O sistema IEEE 14 barras, ilustrado no Apêndice A, possui como principal característica uma grande concentração de unidades geradoras em um extremo da rede e concentração de carga no outro, sendo os mesmos interligados por um sistema de transmissão.

Este tipo de arranjo carga-geração, bastante similar ao sistema de 440 kV da região de São Paulo, é bastante desfavorável para aos estudos visando à liberação de intervenções. Isto ocorre porque o sistema é muito sensível ao limite de escoamento da geração necessária para o atendimento à carga, ou seja, qualquer desligamento na malha de transmissão tem a tendência de elevar bastante o carregamento da rede, principalmente no circuito paralelo ao que sofre a manutenção.

A escolha deste tipo de configuração de sistema foi muito importante para testar a robustez da metodologia diante de um quadro desfavorável à otimização. Em outra situação, com uma geração mais distribuída e com o malha de transmissão mais interconectada, as violações tenderiam a ser menores e a convergência para a solução mais suave.

Os dados e a configuração do sistema IEEE 14 barras podem ser encontrados nos Apêndices A.1, A.2 e A.3 e são utilizados por um programa desenvolvido na linguagem FORTRAN, que contempla um módulo contendo o algoritmo genético em si e outro contendo a avaliação da função de aptidão, onde estão incluídas a análise de fluxo de potência, análise de contingências, monitoração do atendimento aos limites operativos, bem como o cálculo da aptidão de cada cromossomo.

Além dos dados citados, é também necessário conhecer dados sobre a carga do sistema, tendo sido utilizados 3 patamares de carga (Pesada, Média e Leve), assim como é feito nas Áreas de Planejamento, que cobrem o intervalo de tempo de interesse para o estudo. Em sistemas reais, como o Sistema Interligado Nacional, pode-se observar que a diferença do patamar de máximo carregamento para o de médio carregamento varia em torno de 15 a 20% e para o patamar de leve em torno de 20 a 35%, diferença esta que depende também da região e da época do ano (sazonalidade da carga) a ser avaliada. Neste trabalho escolheu-se para o patamar de carga média um fator de 0,15 (um carregamento 15% inferior ao patamar de carga pesada) e para o de leve um fator de 0,20 (um carregamento 20% inferior ao patamar de carga pesada).

5.1.1 Método de Análise de Desempenho em Regime Permanente

Na análise de cada cromossomo, o que inclui a análise do sistema submetido a desligamentos e também sob contingências, utilizou-se um fluxo de potência baseado no método desacoplado rápido [Mont83]. Este método se baseia no desacoplamento existente entre os problemas $P\theta$ e QV e tem a vantagem de manter as submatrizes jacobianas H ($\partial P/\partial \theta$) e L ($\partial Q/\partial V$) constantes ao longo de todo o processo iterativo. Isto faz com que o esforço computacional, na busca das soluções seja reduzido, o que é interessante nesta aplicação, pois o número de casos e soluções investigadas tende a ser bastante elevado. Outras técnicas como, por exemplo, o método dos fatores de distribuição ou o fluxo de potência linearizado para análise de contingências poderiam também serem adotados para reduzir ainda mais o esforço computacional. Porém, as violações de tensão deixariam de ser monitoradas.

5.1.2 Solicitações das Intervenções

Nas simulações realizadas foram considerados dois conjuntos distintos de solicitações de desligamentos. Tais conjuntos de solicitações, denominados de Programação 1 e Programação 2 são programações inicialmente propostas, as quais devem ser avaliadas e, se necessário, reprogramadas de uma maneira ótima utilizando a metodologia proposta. É importante ressaltar que as programações 1 e 2 foram utilizadas apenas para testar o desempenho da metodologia utilizando programações iniciais diferentes.

Em ambas as programações considerou-se um conjunto de cinco desligamentos. Este número baseou-se na quantidade de elementos série do sistema (total de 20 elementos) e nas estatísticas da Gerência de Programação e Desligamentos (GPD) e seu respectivo Programa Diário de Intervenções (PDI) a respeito do percentual de equipamentos solicitados diariamente em relação à quantidade total de elementos do sistema.

Basicamente, o que difere a “Programação 1” da “Programação 2” diz respeito à duração dos períodos das intervenções, sendo que na Programação 2 esses são maiores.

Na

Tabela 5.1 são apresentados os dois conjuntos de solicitações analisados.

Tabela 5.1 - Conjuntos de solicitações de desligamentos

<i>Intervenção</i>	<i>Circuito Desligado</i>		<i>Programação 1</i>		<i>Programação 2</i>	
	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Horário Inicial</i>	<i>Duração</i>	<i>Horário Inicial</i>	<i>Duração</i>
1	2	5	8:00h	6h	8:00h	11h
2	2	4	10:00h	5h	10:00h	7h
3	4	7	14:00h	6h	14:00h	6h
4	12	13	18:00h	6h	18:00h	10h
5	10	11	15:00h	4h	15:00h	4h

É importante notar que a dimensão dos cromossomos contendo os horários iniciais das duas programações propostas é idêntica. Da mesma forma, é idêntico o cromossomo que representa as duas programações. Porém, as diferentes durações dos desligamentos têm impacto sobre o processo de busca pela solução ótima através do AG.

5.1.3 Penalidades utilizadas

Como já mencionado anteriormente, os valores escolhidos para as penalidades têm impacto direto sobre o processo de convergência e a solução ótima obtida. A escolha destes valores é realizada com base no conhecimento sobre o problema e ajustada em função dos resultados obtidos durante o processo de simulação. Nesta seção serão apresentados os valores atribuídos às penalidades e detalhados os processos de avaliação da função de aptidão.

Na função de aptidão, a parcela correspondente à consideração da violação às restrições operativas será:

$$(Pv * \sum_{i=1}^{nv} Violv_i) + (Pn * \sum_{j=1}^{nFn} ViolFn_j) + (Pe * \sum_{k=1}^{nFe} ViolFe_k) \quad (5.1)$$

Na equação (5.1) a primeira parcela diz respeito às violações de tensão enquanto a segunda e terceira dizem respeito às violações de carregamento. O cálculo para a quantificação de $Viol_v$, $Viol_{Fn}$ e $Viol_{Fe}$ foi implementado comparando-se os resultados obtidos na análise de fluxo de potência (valores convergidos de todas as tensões de barra e carregamento de linhas de transmissão) com os respectivos valores limites previamente conhecidos. Caso estes limites sejam violados, os desvios destes em relação aos valores convergidos (em valores por unidade) são multiplicados pelas correspondentes penalidades. Para a avaliação dos limites de tensão temos de analisar o atendimento a tensão mínima e máxima de suprimento, ou seja, podem ser encontradas violações nos limites inferiores ou superiores. No caso da avaliação quanto ao carregamento, os limites a serem respeitados são o nominal (operação normal) e o de emergência (operação sob

contingência) esses limites, na maioria dos casos, dizem respeito à capacidade térmica dos equipamentos. À violação do limite de emergência, mais indesejada, é atribuída uma penalidade maior.

Os valores utilizados para as penalidades P_v , P_n e P_e foram respectivamente 100, 100 e 150 e, antes da escolha dos mesmos, foram testados valores entre 10 e 200 para cada um.

A penalização pelo desvio das programações propostas durante o processamento do AG em relação à programação original é representada pelo seguinte termo:

$$R_{int} = \left[\sum_{i=1}^n \Delta h(i) * P_{ri}(i) \right] * P_{dsv} \quad (5.2)$$

Durante o processamento todos os cromossomos (soluções) propostos pelo AG são comparados com a programação original (a qual é arbitrariamente introduzida na primeira população através de um cromossomo que a codifica). Assim, para todos os desligamentos são calculados os valores absolutos das diferenças dos horários propostos (representados em cada cromossomo) com aqueles inicialmente pretendidos (programação original). Estes valores, relativos aos desvios em relação à programação inicial, são ponderados segundo as prioridades individuais de cada desligamento $P_{ri}(i)$ e, após somados, são multiplicados pela penalidade P_{dsv} . Os valores $P_{ri}(i)$ utilizados nas Programações 1 e 2 são lidos a partir de arquivo de dados e variam entre 0 (sem prioridade) e 4 (maior prioridade). Diferentes prioridades foram utilizadas nos testes realizados e serão apresentadas mais adiante. Para a penalidade P_{dsv} foram testados os valores 0,2, 1,0 e 10,0 sendo que os melhores resultados, os quais serão aqui reproduzidos, ocorreram quando se utilizou o primeiro valor.

A parcela relativa ao não atendimento à demanda é expressa por:

$$P_{dem} * \sum_{t=1}^{na} K_t \quad (5.3)$$

A atribuição de valor a esta parcela ocorre quando não se obtém convergência na análise do fluxo de potência. Sempre que isto ocorrer, o valor de k_t em (5.3) é feito igual a 1 (sendo igual a 0 em caso contrário) e a penalidade P_{dem} é imposta. O valor utilizado para esta penalidade foi igual a 100.

Nas simulações realizadas neste trabalho os mesmos valores foram utilizados para penalizar as violações das restrições tanto quando observadas no caso base quanto nos cenários em contingência.

5.1.4 Funções de aptidão testadas

Nos testes realizados considerou-se a aplicação de diferentes objetivos, através da correspondente adaptação da função de aptidão. As situações consideradas foram:

Objetivo 1: Atendimento aos requisitos de demanda e limites de equipamentos

Neste caso, o objetivo é apenas atender a eliminação de violações dos limites operativos do sistema no caso base, sem considerar a prioridade de cada uma, os respectivos desvios em relação à programação original, nem os cenários em contingência. Logo, a solução ótima não deve ter compromisso com a minimização das reprogramações, mas apenas com o alívio das violações dos limites operativos. A implementação deste objetivo se dá fazendo as penalidades associadas aos cenários em contingência e aos desvios em relação à programação original serem iguais a zero.

Objetivo 2: Atendimento aos requisitos de demanda, limites de equipamentos e prioridades dos desligamentos

Neste caso são consideradas também as prioridades dos desligamentos. O AG tem como objetivo não apenas eliminar as violações operativas como também minimizar a reprogramação, levando em consideração a importância relativa de cada desligamento. Dessa maneira, diferente da situação anterior (Objetivo 1), o valor da penalidade associada aos desvios em relação a programação original não é mais feito igual a zero.

Objetivo 3: Atendimento aos requisitos de demanda, limites de equipamentos, prioridades dos desligamentos e contingências simples

Neste caso são incluídas também as restrições quanto ao regime operativo em contingência e dessa maneira as penalidades associadas a estes cenários não são mais feitas iguais a zero.

5.1.5 Parâmetros testados na convergência do AG

Como discutido anteriormente, os parâmetros genéticos são responsáveis pela diversidade e desempenho do processo de busca pela solução do problema de otimização e a escolha de valores para estes parâmetros deve também ser investigada durante as simulações.

Durante as simulações foram testados diferentes valores para definir o tamanho da população, o número máximo de gerações, a taxa de cruzamento, a taxa de mutação e o tipo de operador de cruzamento. A técnica de seleção implementada foi a de Torneio. Além disso, sempre foi utilizado o operador de *Elitismo* para a reprodução do melhor indivíduo nas gerações subseqüentes. O processo de convergência do AG para cada teste apresentado a seguir encontra-se ilustrado no APÊNDICE B.

Abaixo são apresentados os valores investigados para estes parâmetros durante as simulações.

- Tamanho da população: 50, 100 e 150
- Número máximo de gerações: 300, 500, 700 e 2000
- Taxa de cruzamento: 0,5 (50%) e 0,9 (90%)
- Taxa de Mutação: 0,02 (2%) e 0,3 (30%)
- Tipo de operador de Cruzamento: Cruzamento em um ponto e Cruzamento Uniforme.

5.2 Testes Considerando a Programação 1

Diversos testes foram realizados tendo como programação inicial (desligamentos solicitados) a Programação 1 da Tabela 5.1 . Os testes envolveram os diferentes objetivos descritos na Subseção 5.1.4.

5.2.1 Objetivo1: Atendimento a demanda e aos limites operativos

Considerando a programação 1 e o objetivo 1, diversas simulações foram realizadas, nas quais vários parâmetros foram testados para a convergência do AG. A seguir são apresentados alguns destes testes. Os resultados apresentados ilustram a programação original e a programação ótima obtida pelo AG, assim como o desvio médio (em unidade de tempo) entre elas. Além disso, são também apresentadas as violações às restrições observadas em cada caso. Tais violações correspondem às máximas violações observadas para cada elemento da rede.

Teste 1:

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 50
- Número máximo de gerações: 500
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

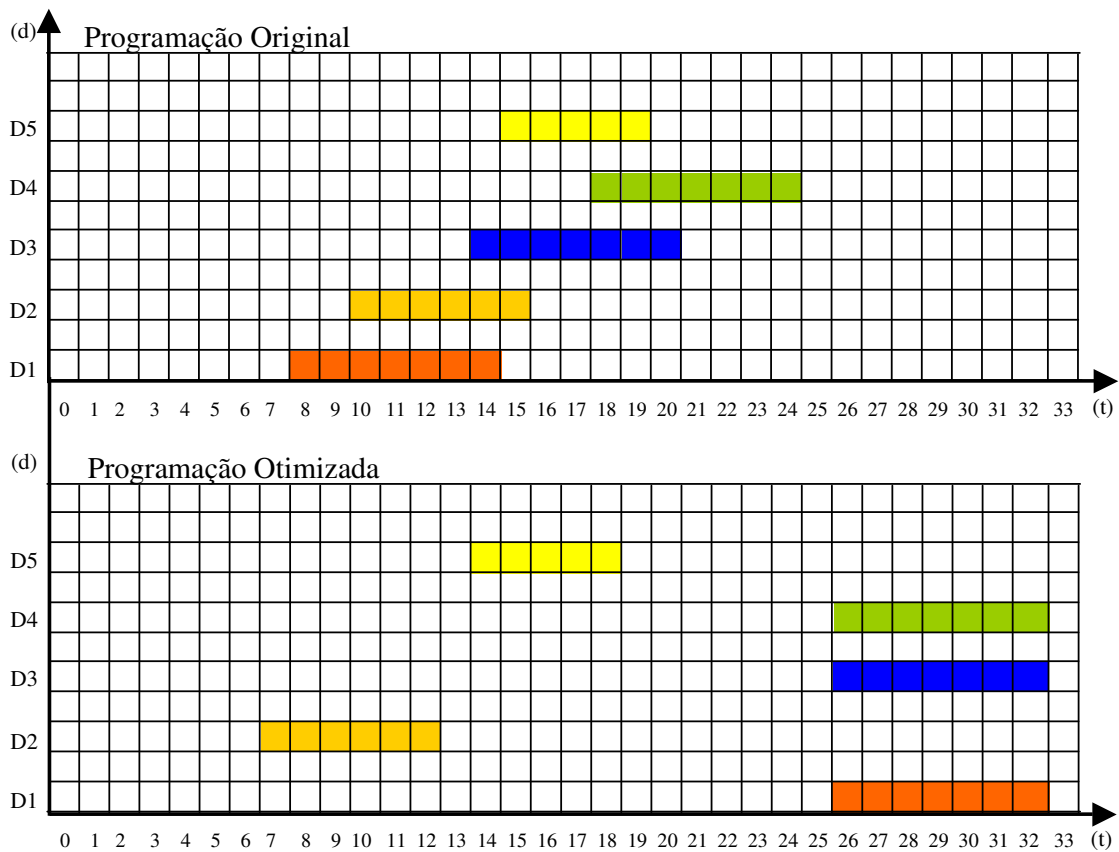


Figura 5.1 Reprogramação obtida no Teste 1

Tabela 5.2 - Desvios em relação a programação original (Teste 1)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	0	8h	26h	+ 18h
2	0	10h	7h	- 03h
3	0	14h	26h	+ 12h
4	0	18h	26h	+ 08h
5	0	15h	14h	- 01h
Desvio Médio entre as Programações				8h24min

Tabela 5.3 - Violações dos limites operativos (Teste 1)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)				
	2-3	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal				
Original	9,88	7,31	7	30,7	-
Otimizada	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência				
Original	-	-	-	-	51,8
Otimizada	-	-	-	-	-

Teste 2:

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 500
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

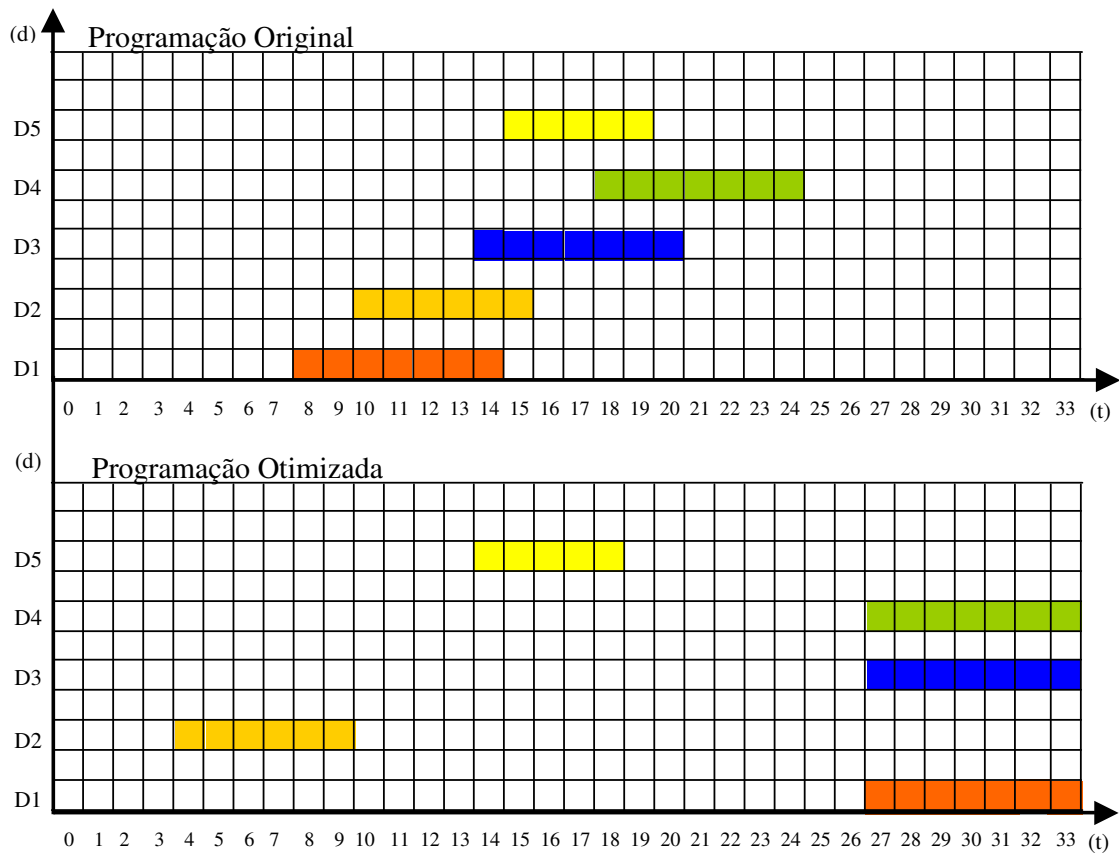


Figura 5.2 Reprogramação obtida no Teste 2

Tabela 5.4 - Desvios em relação a programação original (Teste 2)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	0	8h	27h	+ 19h
2	0	10h	4h	- 06h
3	0	14h	27h	+ 13h
4	0	18h	27h	+ 09h
5	0	15h	14h	- 01h
Desvio Médio entre as Programações				9h36min

Tabela 5.5 - Violações dos limites operativos (Teste 2)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)				
	2-3	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal				
Original	9,88	7,31	7	30,7	-
Otimizada	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência				
Original	-	-	-	-	51,8
Otimizada	-	-	-	-	-

Teste 3:

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 150
- Número máximo de gerações: 500
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

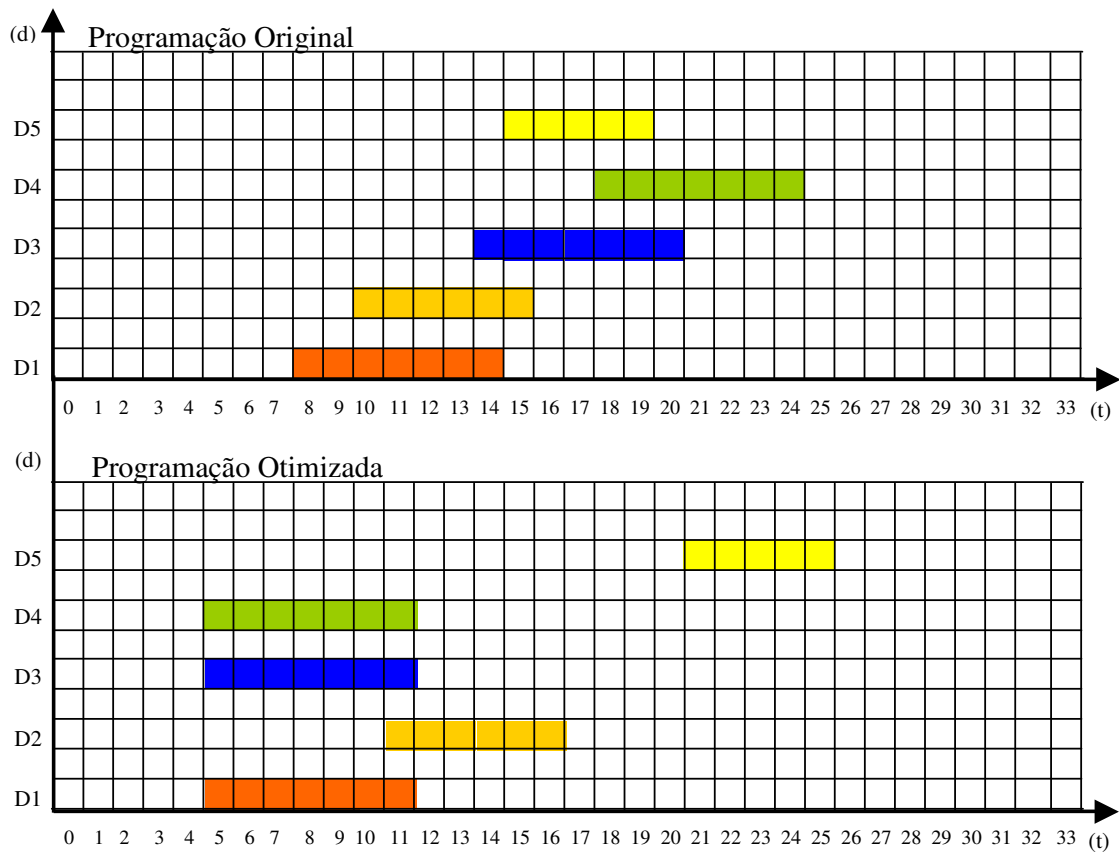


Figura 5.3 Reprogramação obtida no Teste 2

Tabela 5.6 - Desvios em relação a programação original (Teste 3)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	0	8h	05h	- 03h
2	0	10h	11h	+ 01h
3	0	14h	05h	- 09h
4	0	18h	05h	- 13h
5	0	15h	21h	+ 06h
Desvio Médio entre as Programações				6h24min

Tabela 5.7 - Violações dos limites operativos (Teste 3)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)				
	2-3	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal				
Original	9,88	7,31	7	30,7	-
Otimizada	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência				
Original	-	-	-	-	51,8
Otimizada	-	-	-	-	-

5.2.2 Objetivo 2: Atendimento a demanda, limites operativos e prioridades

Considerando ainda a programação 1 e agora o objetivo 2, diversas simulações foram realizadas e alguns dos resultados obtidos são apresentados a seguir.

Teste 4: Prioridade de urgência no desligamento do ramo 2-5

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 700
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

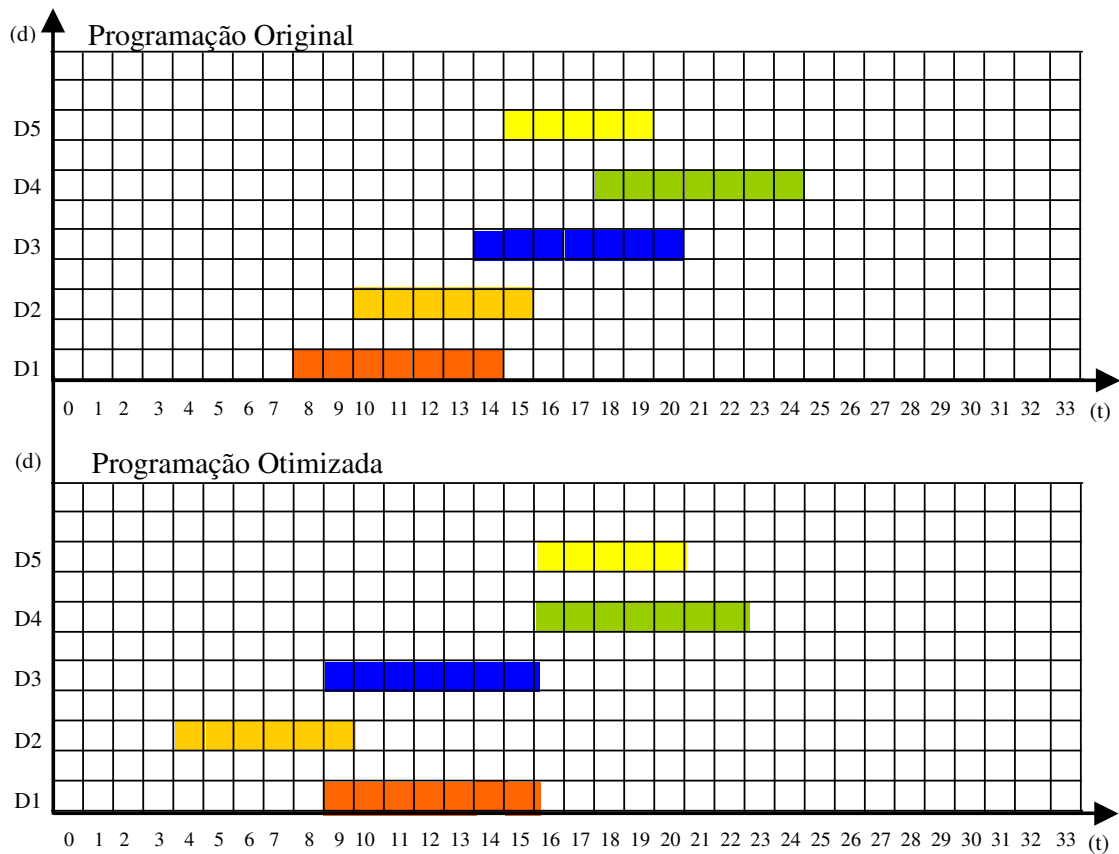


Figura 5.4 Reprogramação obtida no Teste 4

Tabela 5.8 - Desvios em relação a programação original (Teste 4)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original Horário de Inicial da Manutenção	Programação Otimizada Horário de Inicial da Manutenção	Diferença (h)
1	4	8h	9h	+ 01h
2	1	10h	4h	- 06h
3	1	14h	9h	- 05h
4	1	18h	16h	- 02h
5	1	15h	16h	+ 01h
Desvio Médio entre as Programações				3h00min

Tabela 5.9 - Violações dos limites operativos (teste 4)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)				
	2-3	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal				
Original	9,88	7,31	7	30,7	-
Otimizada	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência				
Original	-	-	-	-	51,8
Otimizada	-	-	-	-	-

Teste 5: Prioridade de urgência no desligamento do ramo 4-7

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 700
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

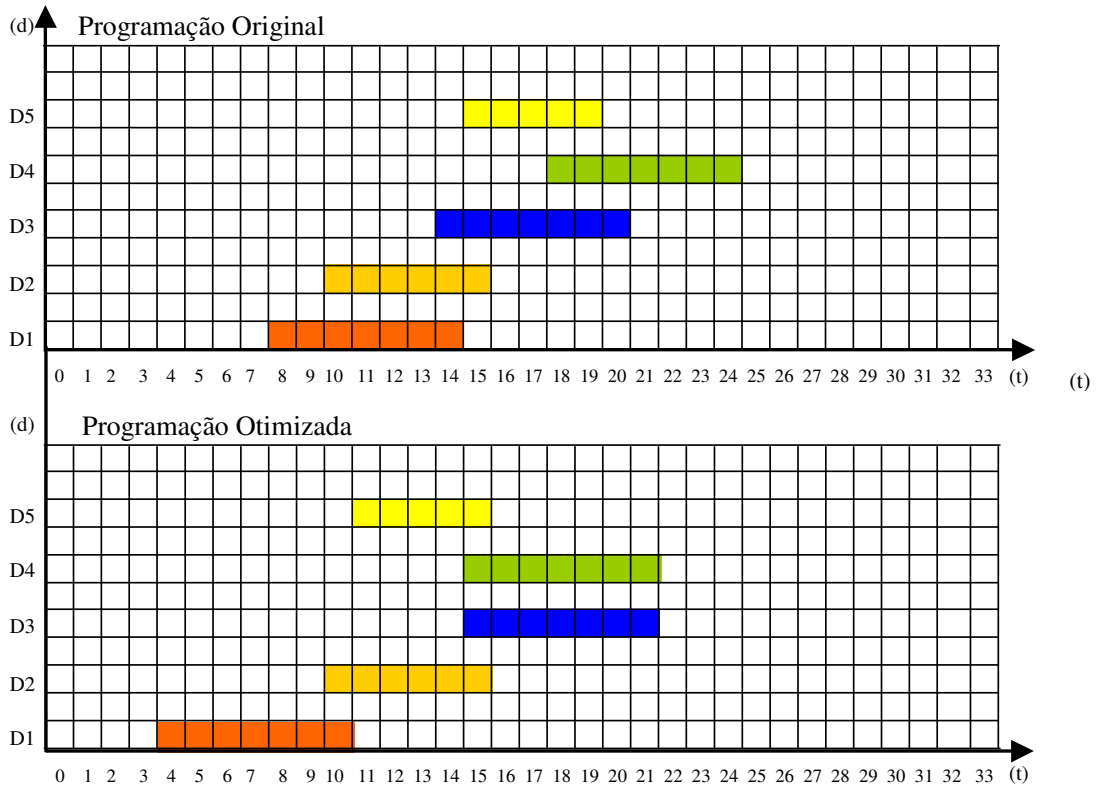


Figura 5.5 Reprogramação obtida no Teste 5

Tabela 5.10 - Desvios em relação a programação original (Teste 5)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	1	8h	4h	- 04h
2	1	10h	10h	-
3	4	14h	15h	+ 01h
4	1	18h	15h	- 03h
5	1	15h	11h	- 04h
Desvio Médio entre as Programações				2h24min

Tabela 5.11 - Violações dos limites operativos (Teste 5)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)				
	2-3	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal				
Original	9,88	7,31	7	30,7	-
Otimizada	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência				
Original	-	-	-	-	51,8
Otimizada	-	-	-	-	-

Teste 6: Prioridade de urgência no desligamento do ramo 12-13 e prioridade 3 no desligamento do ramo 2-4

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 700
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

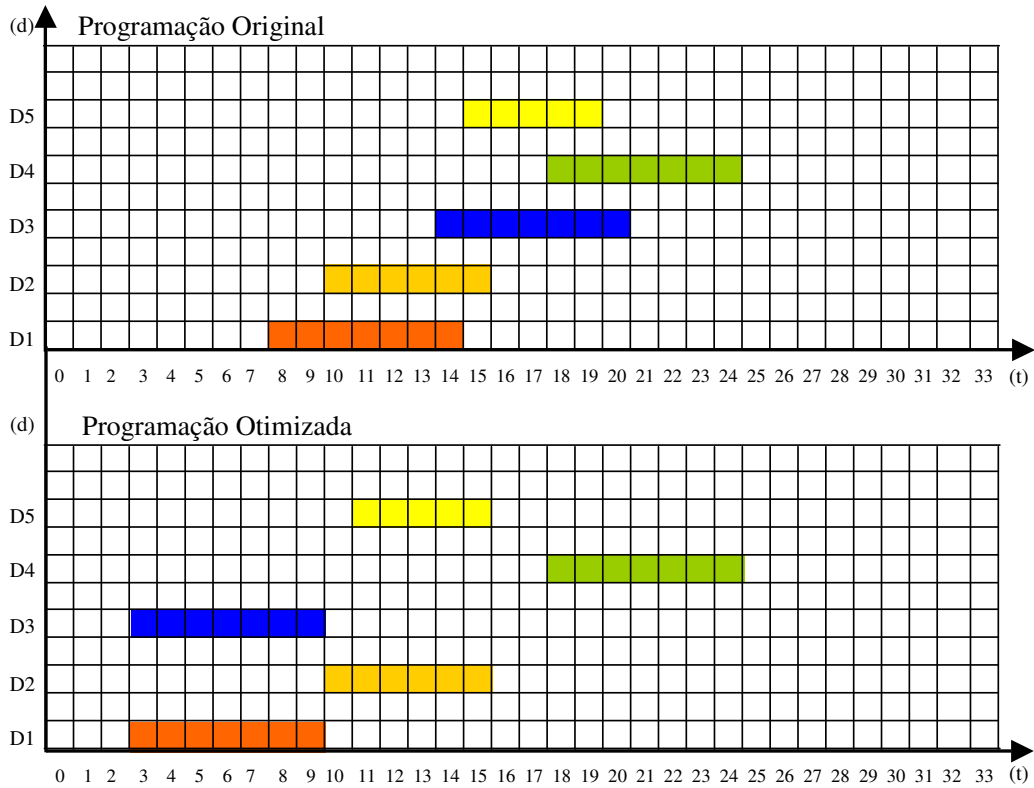


Figura 5.6 Reprogramação obtida no Teste 6

Tabela 5.12 - Desvios em relação a programação original (Teste 6)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original Horário de Inicial da Manutenção	Programação Otimizada Horário de Inicial da Manutenção	Diferença (h)
1	1	8h	3h	- 05h
2	3	10h	10h	-
3	1	14h	3h	- 11h
4	4	18h	18h	-
5	1	15h	11h	- 04h
Desvio Médio entre as Programações				4h00min

Tabela 5.13 - Violações dos limites operativos (Teste 6)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)				
	2-3	4-9	5-6	6-13	13-14
Limite Nominal					
Original	9,88	7,31	7	30,7	-
Otimizada	-	-	-	-	-
Limite de Emergência					
Original	-	-	-	-	51,8
Otimizada	-	-	-	-	-

5.2.3 Objetivo 3: Consideração dos cenários em contingência

Nesta subseção será avaliado o desempenho do AG frente a um cenário sob contingências baseado na Programação 1 da Tabela 5.1 . Foram escolhidas 3 contingências para serem associadas aos desligamentos da programação analisada. Tais contingências se encontra na Tabela 5.14 .

Tabela 5.14 - Lista de Contingências

Contingência	Circuito Desligado	
	De	Para
1	3	4
2	6	13
3	13	14

Teste 7: Análise considerando contingências, sem prioridades e atendendo às restrições operativas.

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 700
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

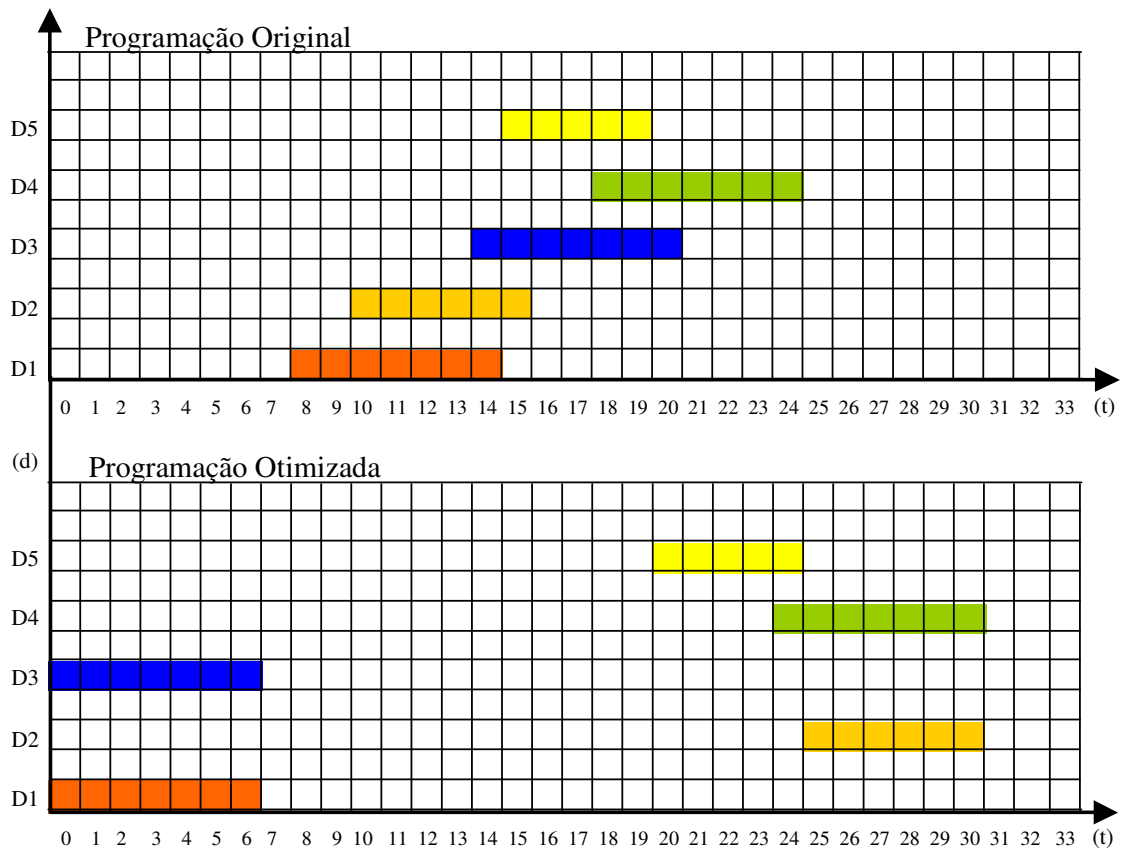


Figura 5.7 Reprogramação obtida no Teste 7

Tabela 5.15 - Desvios em relação a programação original (Teste 7)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	0	8h	0h	- 08h
2	0	10h	25h	+15h
3	0	14h	0h	- 14h
4	0	18h	24h	+06h
5	0	15h	20h	+05h
Desvio Médio entre as Programações				9h36min

Tabela 5.16 - Violações dos limites operativos (Teste 7) – Caso Base

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)				
	2-3	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal				
Original	9,88	7,31	7	30,7	-
Otimizada	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência				
Original	-	-	-	-	51,8
Otimizada	-	-	-	-	-

Tabela 5.17 - Violações dos limites operativos (Teste 7) – 1ª Contingência

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)			
	2-3	4-9	5-6	6-13
	Limite Nominal			
Original	-	-	-	-
Otimizada	-	-	-	-
	Limite de Emergência			
Original	-	1,8	-	-
Otimizada	-	-	-	-

Tabela 5.18 - Violações dos limites operativos (Teste 7) – 2ª Contingência

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)						
	2-3	4-9	6-11	6-12	9-10	9-14	10-11
	Limite Nominal						
Original	-	-	-	-	-	-	-
Otimizada	-	-	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência						
Original	-	81,12	72	62,8	-	31,12	26,33
Otimizada	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.19 - Violações dos limites operativos (Teste 7) – 3ª Contingência

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)			
	2-3	4-9	6-11	9-14
	Limite Nominal			
Original	-	-	-	-
Otimizada	-	-	-	-
	Limite de Emergência			
Original	-	43	19	-
Otimizada	-	-	-	-

Teste 8: Análise considerando contingências, com prioridade de urgência no desligamento do ramo 2-5

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 700
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

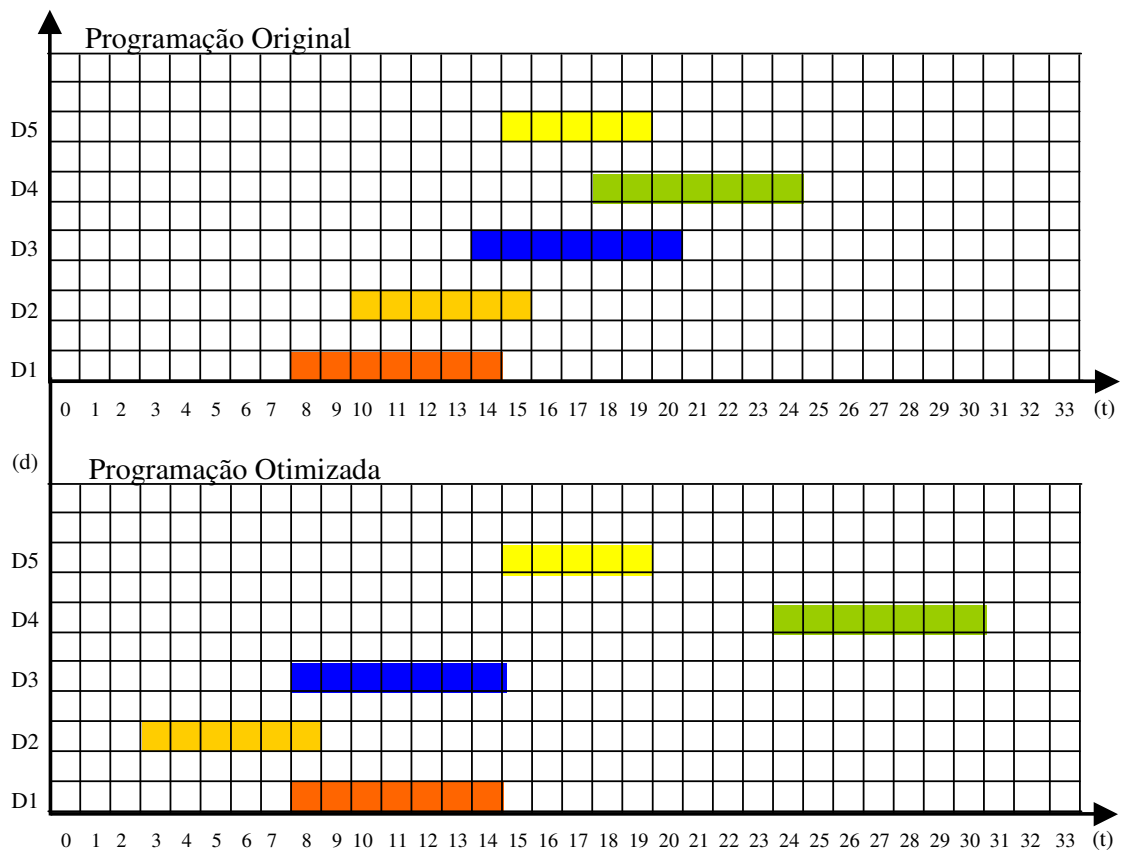


Figura 5.8 Reprogramação obtida no Teste 8

Tabela 5.20 - Desvios em relação a programação original (Teste 8)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	4	8h	8h	-
2	1	10h	3h	- 07h
3	1	14h	8h	- 06h
4	1	18h	24h	+06h
5	1	15h	15h	-
Desvio Médio entre as Programações				3h48min

Tabela 5.21 - Violações dos limites operativos (Teste 8)- Caso Base

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)				
	2-3	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal				
Original	9,88	7,31	7	30,7	-
Otimizada	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência				
Original	-	-	-	-	51,8
Otimizada	-	-	-	-	-

Tabela 5.22 - Violações dos limites operativos (Teste 8) – 1ª Contingência

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)			
	2-3	4-9	5-6	6-13
	Limite Nominal			
Original	-	-	-	-
Otimizada	-	-	-	-
	Limite de Emergência			
Original	-	1,8	-	-
Otimizada	-	-	-	-

Tabela 5.23 - Violações dos limites operativos (Teste 8) – 2ª Contingência

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)						
	2-3	4-9	6-11	6-12	9-10	9-14	10-11
	Limite Nominal						
Original	-	-	-	-	-	-	-
Otimizada	-	-	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência						
Original	-	81,12	72	62,8	-	31,12	26,33
Otimizada	-	-	-	5,0	-	3,96	-

Tabela 5.24 - Violações dos limites operativos (Teste 8) – 3ª Contingência

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)			
	2-3	4-9	6-11	9-14
	Limite Nominal			
Original	-	-	-	-
Otimizada	-	-	-	-
	Limite de Emergência			
Original	-	43	19	-
Otimizada	-	-	-	-

5.3 Testes Considerando a Programação 2

Diversos testes também foram realizados tendo como programação inicial (desligamentos solicitados) a Programação 2 da Tabela 5.1. Alguns resultados obtidos quando se considerou os objetivos descritos na Subseção 5.1.4 são apresentados a seguir.

5.3.1 Objetivo1: Atendimento a demanda e aos limites operativos

Considerando a programação 2 e o objetivo 1, diversas simulações foram realizadas, nas quais vários parâmetros foram testados para a convergência do AG. A seguir são apresentados alguns destes testes. Assim como nos testes realizados quando se considerou a programação 1 como a programação original, os resultados apresentados neste caso ilustram a programação original e a programação ótima obtida pelo AG, apresentando também as violações às restrições observadas em cada caso.

Teste 9:

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 50
- Número máximo de gerações: 500
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

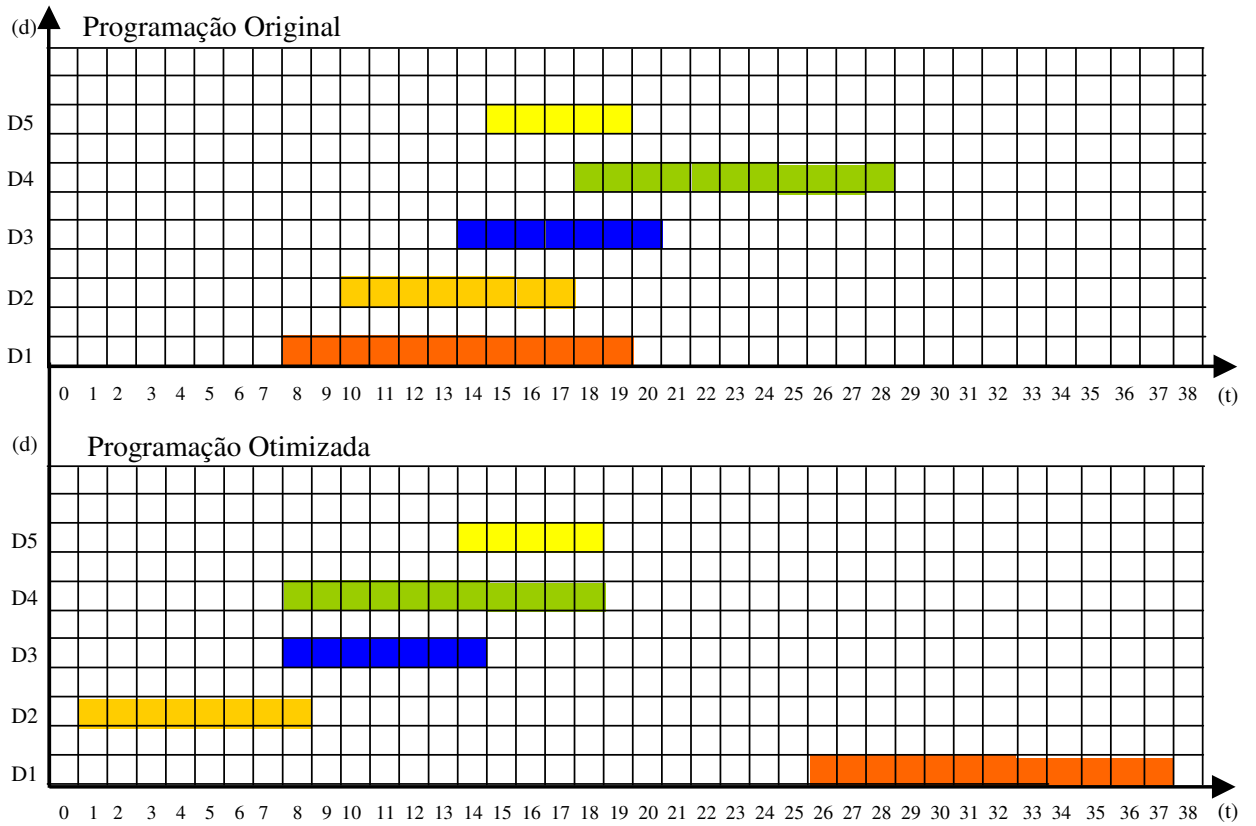


Figura 5.9 Reprogramação obtida no Teste 9

Tabela 5.25 - Desvios em relação a programação original (Teste 9)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	0	8h	26h	+ 18h
2	0	10h	01h	- 09h
3	0	14h	08h	- 06h
4	0	18h	08h	- 10h
5	0	15h	14h	- 01h
Desvio Médio entre as Programações				8h48min

Tabela 5.26 - Violações dos limites operativos (Teste 9)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)					
	2-3	2-4	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal					
Original	10,0	12,2	7,3	7,0	27,5	-
Otimizada	-	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência					
Original	-	-	3,53	-	-	44,96
Otimizada	-	-	-	-	-	-

Teste 10:

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 500
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

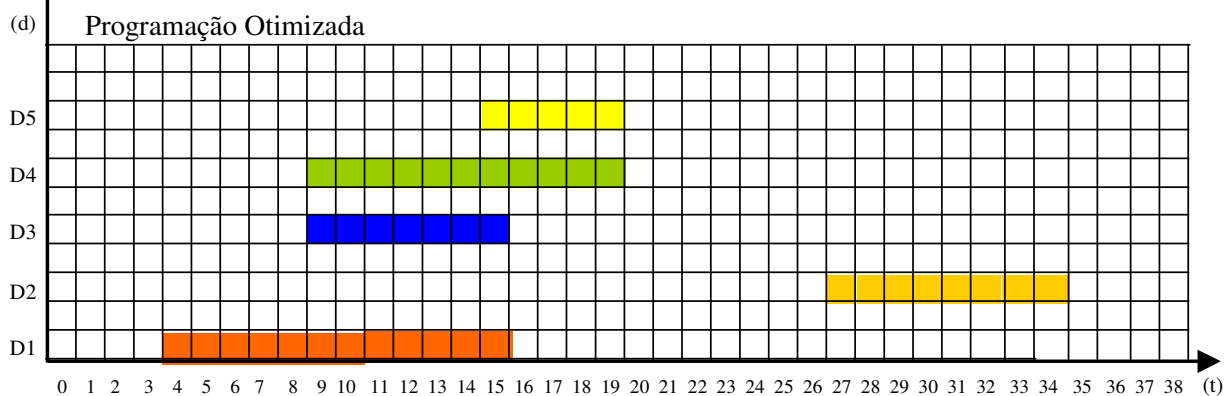
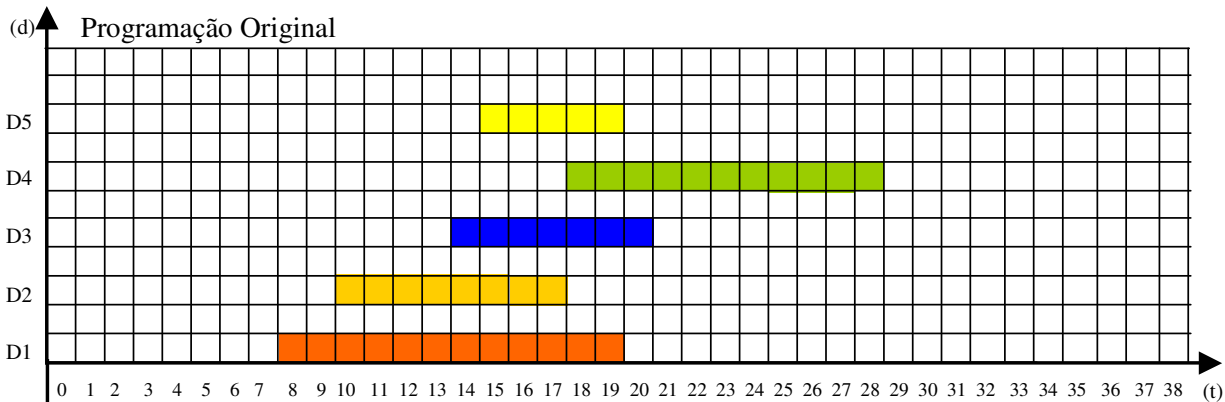


Figura 5.10 Reprogramação obtida no Teste 10

Tabela 5.27 - Desvios em relação a programação original (Teste 10)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	0	8h	04h	- 04h
2	0	10h	27h	+ 17h
3	0	14h	09h	- 05h
4	0	18h	09h	- 09h
5	0	15h	15h	-
Desvio Médio entre as Programações				7h00min

Tabela 5.28 - Violações dos limites operativos (Teste 10)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)					
	2-3	2-4	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal					
Original	10,0	12,2	7,3	7,0	27,5	-
Otimizada	-	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência					
Original	-	-	3,53	-	-	44,96
Otimizada	-	-	-	-	-	-

Teste 11:

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 150
- Número máximo de gerações: 500
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

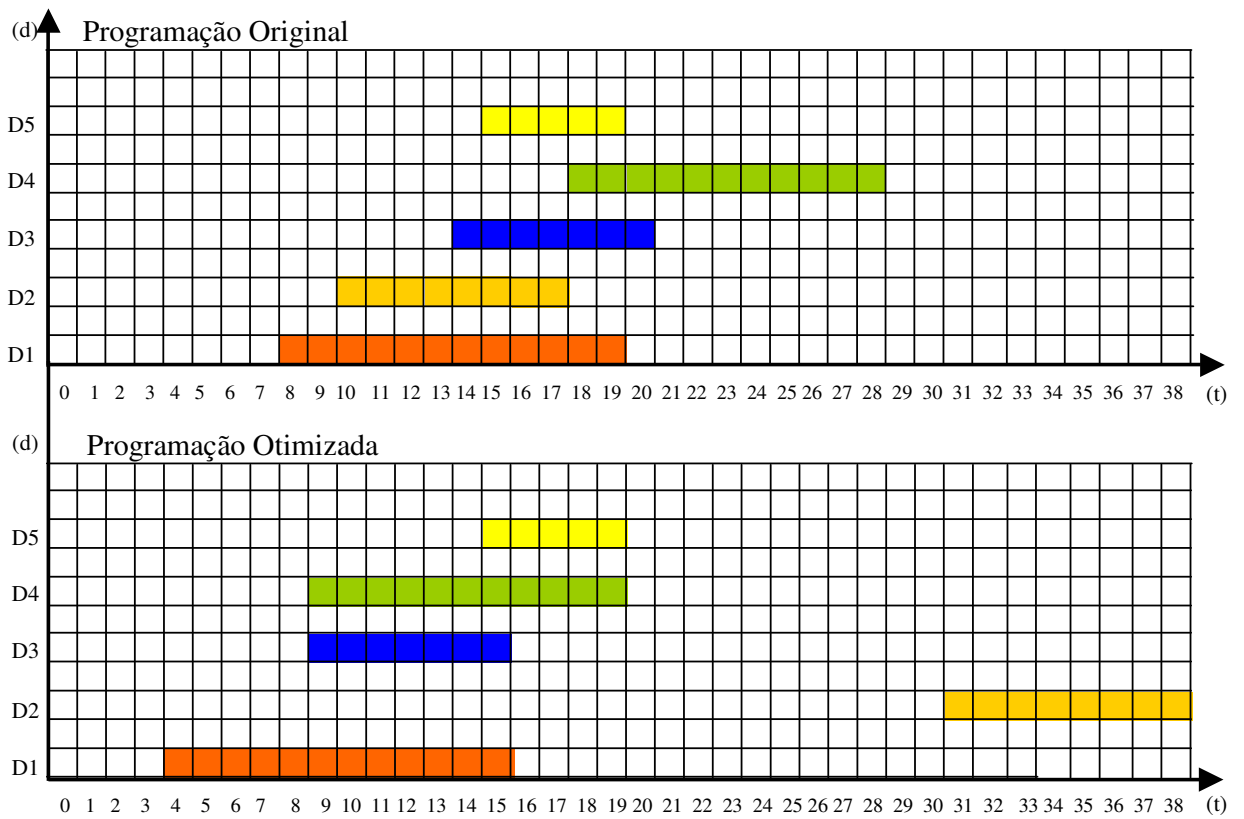


Figura 5.11 Reprogramação obtida no Teste 11

Tabela 5.29 - Desvios em relação a programação original (Teste 11)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	0	8h	04h	- 04h
2	0	10h	31h	+21h
3	0	14h	09h	- 05h
4	0	18h	09h	- 09h
5	0	15h	15h	-
Desvio Médio entre as Programações				7h48min

Tabela 5.30 - Violações dos limites operativos (Teste 11)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)					
	2-3	2-4	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal					
Original	10,0	12,2	7,3	7,0	27,5	-
Otimizada	-	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência					
Original	-	-	3,53	-	-	44,96
Otimizada	-	-	-	-	-	-

5.3.2 Objetivo 2: Atendimento a demanda, limites operativos e prioridades

Para os testes considerando a programação 2 e o objetivo 2, alguns dos resultados obtidos são apresentados a seguir.

Teste 12: Prioridade de urgência no desligamento do ramo 2-5

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 700
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

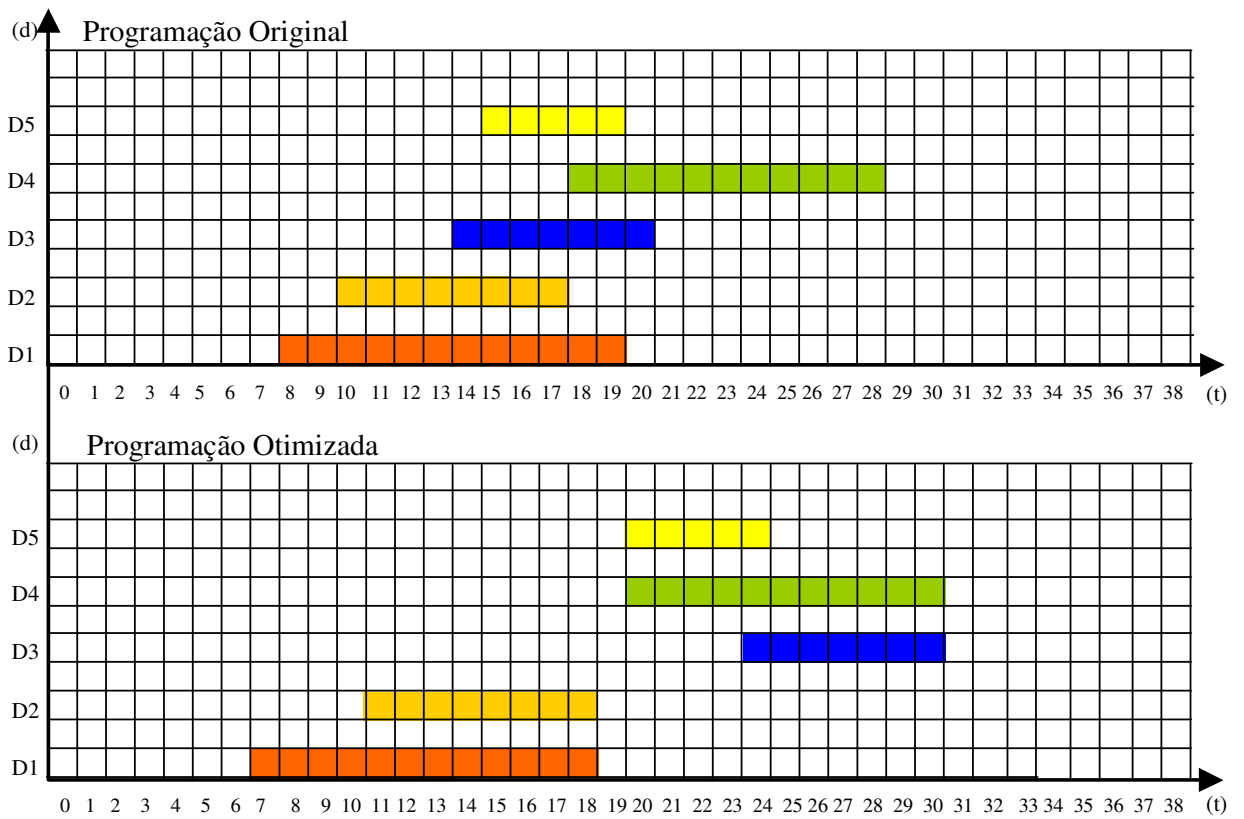


Figura 5.12 Reprogramação obtida no Teste 12

Tabela 5.31 - Desvios em relação a programação original (Teste 12)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	4	8h	07h	- 01h
2	1	10h	11h	+ 01h
3	1	14h	24h	+ 10h
4	1	18h	20h	+ 02h
5	1	15h	20h	+ 05h
Desvio Médio entre as Programações				3h48min

Tabela 5.32 - Violações dos limites operativos (Teste 12)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)					
	2-3	2-4	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal					
Original	10,0	12,2	7,3	7,0	27,5	-
Otimizada	-	-	-	-	-	-
	Limite de Emergência					
Original	-	-	3,53	-	-	44,96
Otimizada	4,38	-	-	-	-	-

Teste 13: Prioridade de urgência no desligamento do ramo 4-7

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 700
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

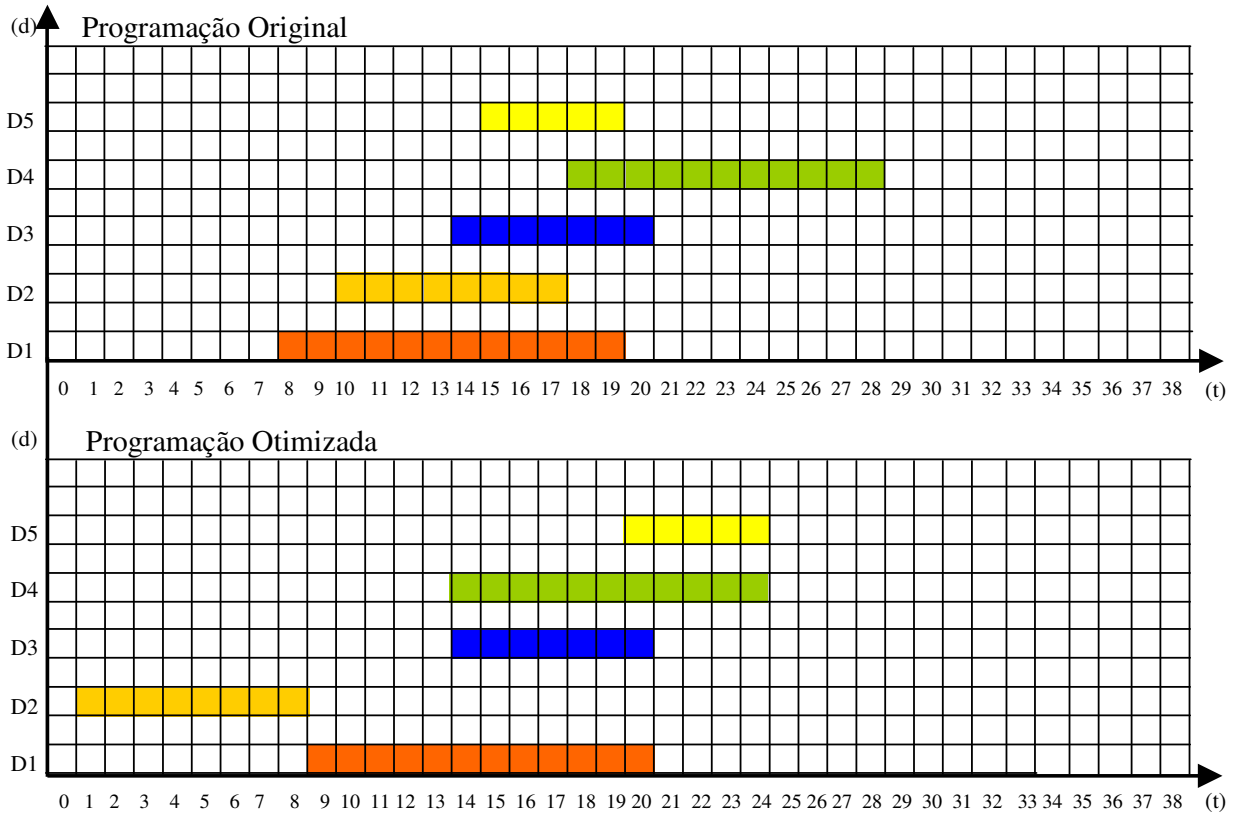


Figura 5.13 Reprogramação obtida no Teste 13

Tabela 5.33 - Desvios em relação a programação original (Teste 13)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	1	8h	09h	+ 01h
2	1	10h	01h	- 09h
3	4	14h	14h	-
4	1	18h	14h	- 04h
5	1	15h	20h	+ 05h
Desvio Médio entre as Programações				3h48min

Tabela 5.34 - Violações dos limites operativos (Teste 13)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)					
	2-3	2-4	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal					
Original	10,0	12,2	7,3	7,0	27,5	-
Otimizada	-	11,0	10,0	4,9	3,57	14,56
	Limite de Emergência					
Original	-	-	3,53	-	-	44,96
Otimizada	-	-	-	-	-	-

Teste 14: Prioridade de urgência no desligamento do ramo 12-13 e prioridade 3 no desligamento do ramo 2-4

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 700
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

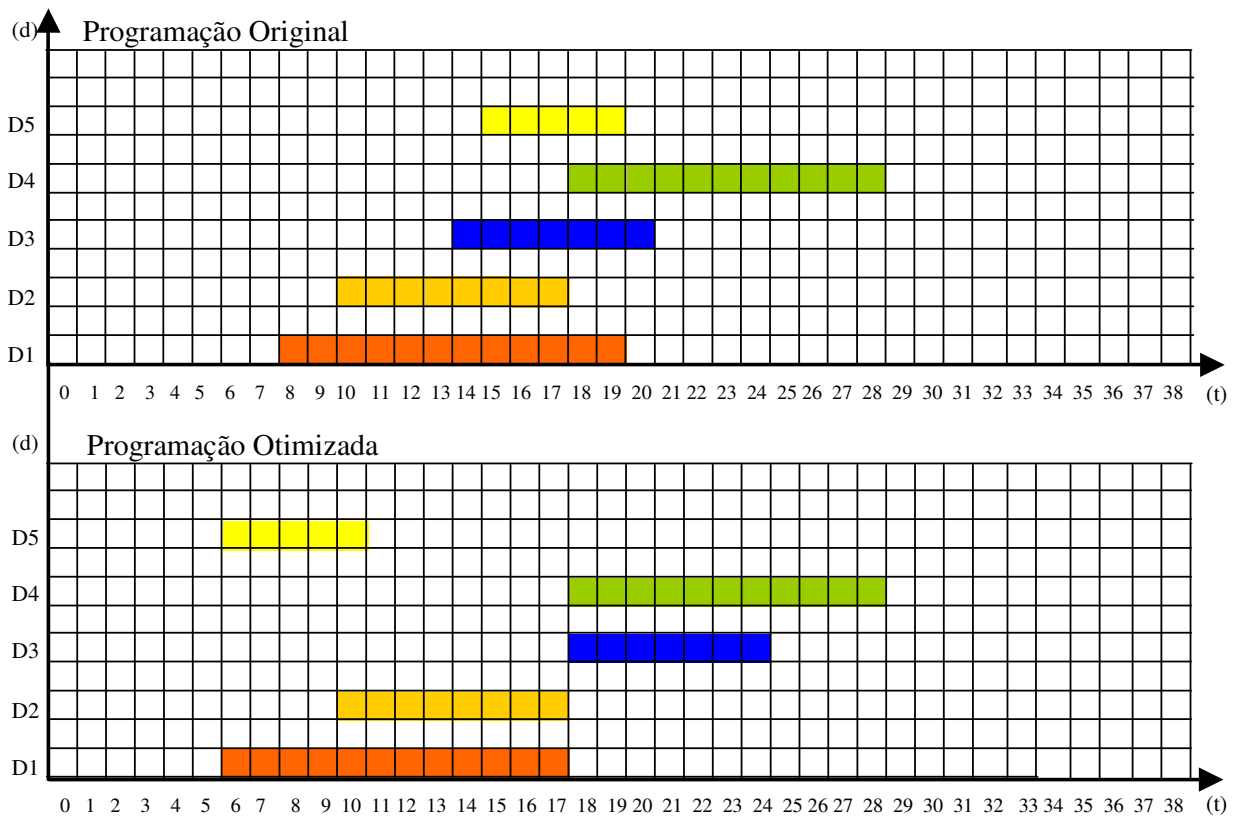


Figura 5.14 Reprogramação obtida no Teste 14

Tabela 5.35 - Desvios em relação a programação original (Teste 14)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original Horário de Inicial da Manutenção	Programação Otimizada Horário de Inicial da Manutenção	Diferença (h)
1	1	8h	06h	- 02h
2	3	10h	10h	-
3	1	14h	18h	+ 04h
4	4	18h	18h	-
5	1	15h	06h	- 09h
Desvio Médio entre as Programações				3h00min

Tabela 5.36 - Violações dos limites operativos (Teste 14)

Programação	Violações de Fluxo em Equipamentos Série (%)					
	2-3	2-4	4-9	5-6	6-13	13-14
	Limite Nominal					
Original	10,0	12,2	7,3	7,0	27,5	-
Otimizada	9,88	-	7,3	7,0	5,36	19,3
	Limite de Emergência					
Original	-	-	3,53	-	-	44,96
Otimizada	-	-	-	-	-	-

5.4 Testes Considerando o Sistema de 440kV da Área São Paulo

O sistema de 440kV de São Paulo, ilustrado no Apêndice A, possui como principal característica uma grande concentração de unidades geradoras em um extremo da rede e concentração de carga no outro, sendo os mesmos interligados por um sistema de transmissão. Este sistema contém 55 barras e 67 linhas de transmissão, sendo que os pontos de interligação com outros sistemas do SIN foram representados por gerações e reatâncias equivalentes. Esta configuração representa o caso base mensal de Março de 2004, disponível no sítio do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Este tipo de arranjo carga-geração é bastante desfavorável para aos estudos visando à liberação de intervenções. Isto ocorre porque o sistema é muito sensível ao limite de escoamento da geração necessária para o atendimento à carga. Devido a esta característica, as programações que possuem desligamentos simultâneos neste sistema, principalmente nos períodos de carga média e pesada, são evitadas. Normalmente é possível programar de 02 a 03 desligamentos simultâneos de linhas de 440kV nestes períodos.

Outra característica importante deste sistema é que, devido à geração estar concentrada no noroeste do estado (região do Paranapanema), o controle de tensão nos centros de carga se torna bastante difícil e as intervenções nas linhas de transmissão, que possuem susceptâncias elevadas, tendem a agravar essa situação.

Os dados e a configuração do sistema de 440kV podem ser encontrados no Apêndice A e são utilizados por um programa desenvolvido na linguagem FORTRAN, que contempla um módulo contendo o algoritmo genético em si e outro contendo a avaliação

da função de aptidão, onde estão incluídas a análise de fluxo de potência, análise de contingências, monitoração do atendimento aos limites operativos, bem como o cálculo da aptidão de cada cromossomo.

A programação para os testes com o sistema de 440kV é a descrita na Tabela 5.37.

Tabela 5.37 - Conjuntos de solicitações de desligamentos

<i>Intervenção</i>	<i>Circuito Desligado</i>			<i>Programação</i>	
	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Nº</i>	<i>Horário Inicial</i>	<i>Duração</i>
1	15	28	C1	8:00h	6h
2	15	28	C2	08:00h	6h
3	43	28	C1	10:00h	5h
4	49	32	C1	14:00h	6h

5.4.1 Objetivo1: Atendimento a demanda e aos limites operativos

Considerando o objetivo 1, diversas simulações foram realizadas, nas quais vários parâmetros foram testados para a convergência do AG. A seguir são apresentados alguns destes testes. Os resultados apresentados ilustram a programação original e a programação ótima obtida pelo AG, assim como o desvio médio (em unidade de tempo) entre elas. Além disso, são também apresentadas as violações às restrições observadas em cada caso. Tais violações correspondem às máximas violações observadas para cada elemento da rede.

Teste 15:

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 500
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

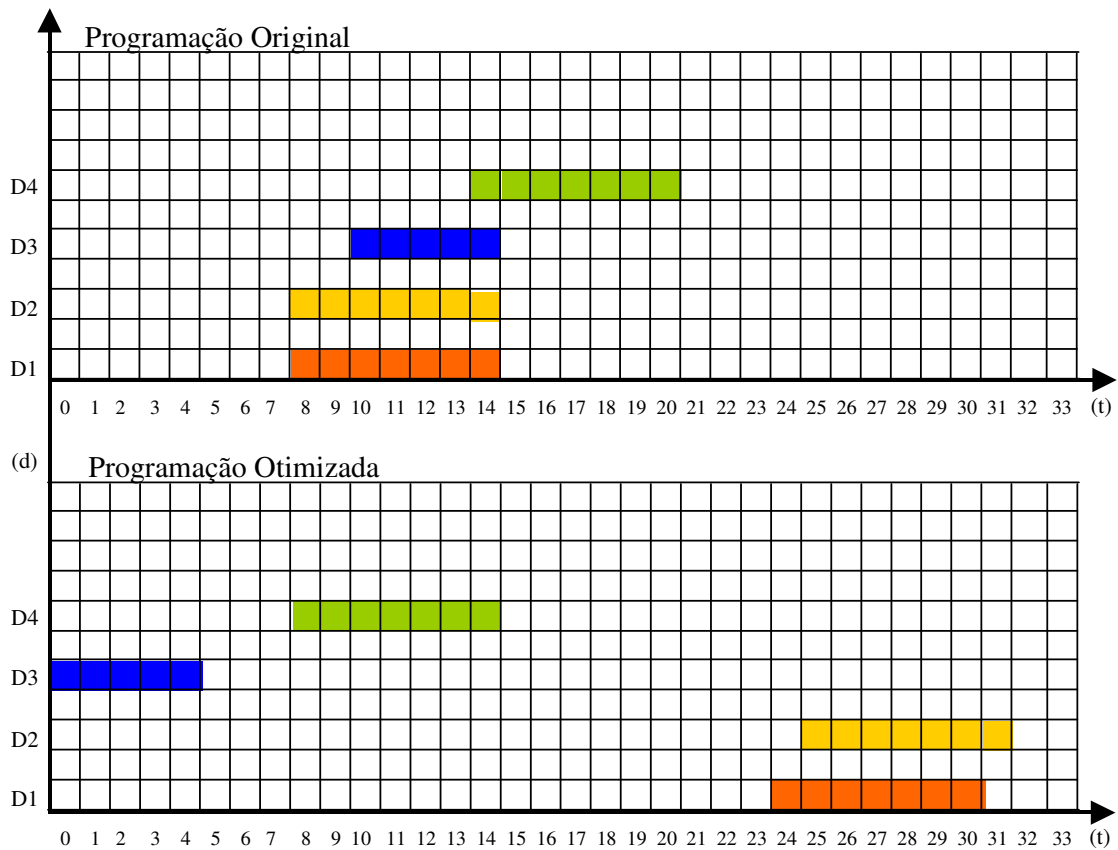


Figura 5.15 Reprogramação obtida no Teste 15

Tabela 5.38 - Desvios em relação a programação original (Teste 15)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original	Programação Otimizada	Diferença (h)
		Horário de Inicial da Manutenção	Horário de Inicial da Manutenção	
1	0	08h	24h	+16h
2	0	08h	25h	+17h
3	0	10h	0h	-10h
4	0	14h	08h	-06h
Desvio Médio entre as Programações				12h15min

Tabela 5.39 - Violações dos limites operativos (Teste 15)

Programação	Violações de Tensão em Barras (%)															
	27	28	32	33	34	35	37	38	39	40	41	42	45	46	47	48
Original	3	3,2	5	5,8	3,5	4,8	3,5	4,4	3	3,5	4	3	3	3,8	4,3	6,2
Otimizada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5.4.2 Objetivo 2: Atendimento a demanda, limites operativos e prioridades

Teste 16: Prioridade de urgência no desligamento do ramo 43-28

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 500
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

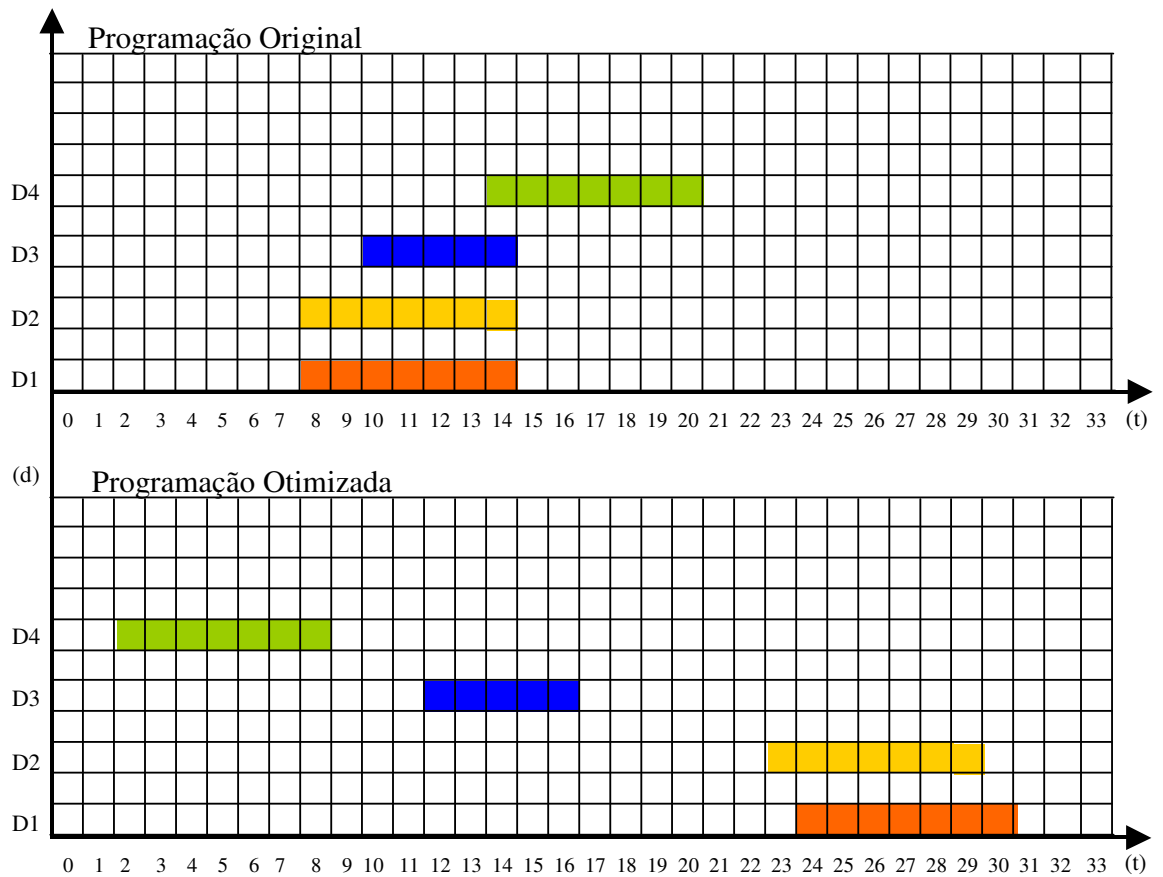


Figura 5.16 Reprogramação obtida no Teste 16

Tabela 5.40 - Desvios em relação a programação original (Teste 16)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original Horário de Inicial da Manutenção	Programação Otimizada Horário de Inicial da Manutenção	Diferença (h)
1	1	08h	24h	+16h
2	1	08h	23h	+15h
3	4	10h	12h	+02h
4	1	14h	2h	-12h
Desvio Médio entre as Programações				11h15min

Tabela 5.41 - Violações dos limites operativos (Teste 16)

Programação	Violações de Tensão em Barras (%)															
	27	28	32	33	34	35	37	38	39	40	41	42	45	46	47	48
Original	3	3,2	5	5,8	3,5	4,8	3,5	4,4	3	3,5	4	3	3	3,8	4,3	6,2
Otimizada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5.4.3 Objetivo 3: Consideração dos cenários em contingência

Nesta subseção será avaliado o desempenho do AG frente a um cenário sob contingências baseado na Programação da Tabela 5.37 . Foram escolhidas 3 contingências para serem associadas aos desligamentos da programação analisada. Tais contingências são apresentadas na Tabela 5.42.

Tabela 5.42 - Lista de Contingências

Contingência	Circuito Desligado	
	De	Para
1	37	24
2	49	26
3	49	43

Teste 17: Análise considerando contingências, com prioridade de urgência no desligamento do ramo 43-28

Parâmetros genéticos utilizados nesta simulação:

- Tamanho da população: 100
- Número máximo de gerações: 500
- Taxa de Cruzamento e Taxa de Mutação: 0,9 e 0,02

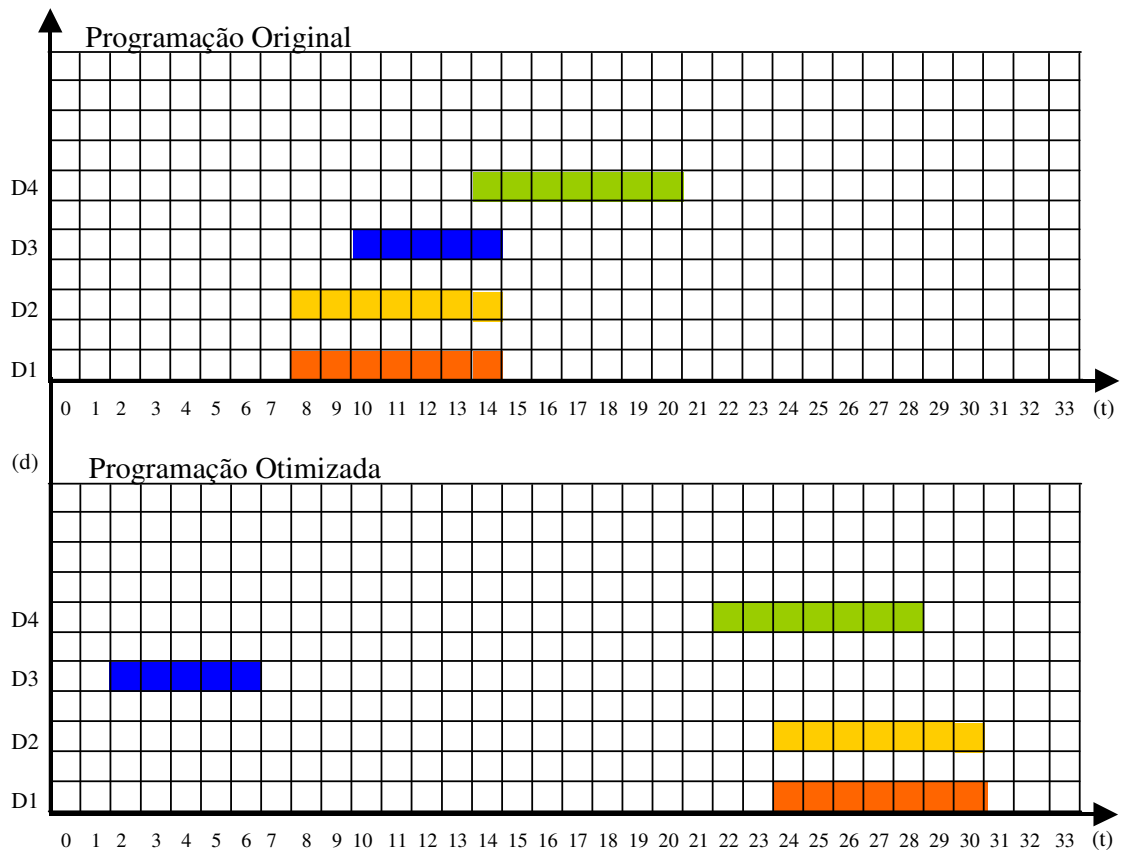


Figura 5.17 Reprogramação obtida no Teste 17

Tabela 5.43 - Desvios em relação a programação original (Teste 17)

Reprogramação das Solicitações				
Intervenção	Prioridade	Programação Original Horário de Inicial da Manutenção	Programação Otimizada Horário de Inicial da Manutenção	Diferença (h)
1	1	08h	24h	+16h
2	1	08h	24h	+16h
3	4	10h	02h	-08h
4	1	14h	22h	+08h
Desvio Médio entre as Programações				12h00min

Tabela 5.44 - Violações dos limites operativos (Teste 17) – Caso Base

Programação	Violações de Tensão em Barras (%)															
	27	28	32	33	34	35	37	38	39	40	41	42	45	46	47	48
Original	3	3,2	5	5,8	3,5	4,8	3,5	4,4	3	3,5	4	3	3	3,8	4,3	6,2
Otimizada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.45 - Violações dos limites operativos (Teste 17) – 1ª Contingência

Programação	Violações de Tensão em Barras (%)															
	27	28	32	33	34	35	37	38	39	40	41	42	45	46	47	48
Original	5,4	4,2	5	5,8	4,5	4,8	7,5	4,4	4	3,5	4	3	3	3,8	4,0	6,0
Otimizada	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.46 - Violações dos limites operativos (Teste 17) – 2ª Contingência

Programação	Violações de Tensão em Barras (%)															
	27	28	32	33	34	35	37	38	39	40	41	42	45	46	47	48
Original	5,4	4,2	5	5,8	4,5	4,8	3,5	4,4	4	3,5	6	4	5,2	3,8	6,0	6,5
Otimizada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.47 - Violações dos limites operativos (Teste 17) – 3ª Contingência

Programação	Violações de Tensão em Barras (%)															
	27	28	32	33	34	35	37	38	39	40	41	42	45	46	47	48
Original	4	3,2	5,2	5,8	4,5	4,8	3,5	4,4	3	3,5	4	6	6	3,8	4,0	6,0
Otimizada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5.5 Comentários Sobre os Testes

Haja vista as simulações realizadas e os resultados obtidos, a seguir são apresentados alguns comentários a respeito do desempenho da metodologia proposta.

Nos Testes 1 a 3 foram consideradas apenas as restrições de atendimento a demanda e aos limites operativos dos equipamentos, não havendo o compromisso com a minimização da reprogramação, ou seja, as intervenções não possuíam prioridades a serem atendidas. Os resultados destes testes mostraram que foi possível atender aos requisitos considerados, tendo sido obtidas soluções diferentes para cada caso testado. É possível perceber que, neste caso, qualquer solução onde as restrições acima mencionadas são atendidas é uma solução aceitável para o problema, independente da programação inicial apresentada.

Quando se introduziu a restrição de observação às prioridades de desligamento, onde é desejável também o menor afastamento possível da programação original, observa-se que o AG busca uma solução ótima que minimize os desvios em relação à programação original, principalmente para os desligamentos de maior prioridade, cujo afastamento em relação ao horário inicialmente desejado é mais penalizado na função de aptidão utilizada neste trabalho. Isto pode ser observado nos Testes 4, 5 e 6. É possível observar que os desvios de horário observados foram nitidamente menores do que aqueles observados nos testes anteriores. Ajustando as penalidades associadas aos desvios em relação à programação original é possível obter ainda soluções com menores desvios. Porém, isto pode ter como consequência violações nas restrições operativas.

Quando se considerou também os cenários da rede em contingência, foi possível perceber que em algumas situações a solução ótima encontrada apresentava ainda algumas violações dos limites operativos. Ao não se considerar as prioridades nos desligamentos (Teste 7) ocorreram apenas violações nos limites nominais do equipamento, o que é normal visto que as condições são de contingência, neste cenário só devem ser observados os limites de emergência dos equipamentos. Pode-se perceber também que o desvio médio em relação a programação original programações foi igual a apresentada no Teste 2,

demonstrando que é possível atingir o mesmo objetivo (eliminação das restrições operativas) mesmo em contingência. Em relação ao Teste 8, onde as prioridades são levadas em consideração, observa-se que correm ainda violações após a otimização da programação. Isto se deve ao fato de que quanto mais se impõem restrições quanto às prioridades do desligamento, maior peso se dá a minimizar os desvios em relação à programação original, em detrimento de possíveis violações dos limites operativos. Pode-se perceber também que o desvio médio em relação a programação original foi maior que a apresentada no Teste 4, demonstrando que a inclusão das contingências tem maior impacto sobre a reprogramação dos desligamentos quando as prioridades são consideradas.

Nos testes realizados tendo como programação original a Programação 2 foi possível perceber que em algumas situações a solução ótima encontrada apresentava ainda algumas violações dos limites operativos. É importante observar que as durações dos desligamentos foram deliberadamente aumentadas em relação aqueles da Programação 1, de forma a impor condições mais severas ao problema. Observa-se que, nos Testes 12, 13 e 14 ocorrem ainda violações após a otimização da programação. É possível observar ainda que à medida que se impõem mais restrições quanto às prioridades do desligamento, maior peso se dá a minimizar os desvios em relação à programação original, em detrimento de possíveis violações dos limites operativos. A eliminação dos problemas operativos pode ocorrer com um ajuste relativo entre as penalidades associadas ao desvio em relação à programação original e às violações das restrições operativas. Este efeito pode ser observado, em um caso extremo, nos resultados obtidos nos Testes 9, 10 e 11.

Haja vista as simulações realizadas com o sistema de 440kV da área São Paulo e os resultados obtidos, são apresentados a seguir alguns comentários a respeito do desempenho da metodologia proposta.

No Teste 15 foram consideradas apenas as restrições de atendimento a demanda e aos limites operativos dos equipamentos, não havendo o compromisso com a minimização da reprogramação, ou seja, as intervenções não possuíam prioridades a serem atendidas. Os resultados destes testes mostraram que foi possível atender aos requisitos estabelecidos, valendo ressaltar que, devido ao carregamento considerado e aos limites de carregamento elevados nas linhas de transmissão de 440kV, os principais problemas encontrados foram quanto ao controle de tensão.

Quando se introduziu a restrição de observação às prioridades de desligamento, onde é desejável também o menor afastamento possível da programação original, observa-se que o AG busca uma solução ótima que minimize os desvios em relação à programação original, principalmente para os desligamentos de maior prioridade, cujo afastamento em relação ao horário inicialmente desejado é mais penalizado na função de aptidão utilizada neste trabalho. Isto pode ser observado no Teste 16. É possível observar que os desvios em relação à programação original foram menores do que aqueles observados nos testes anteriores. Porém, devido a não introdução dos controles na solução do fluxo de potência, é possível ainda observar desvios significativos na programação, sendo isto consequência do atendimento às restrições de tensão. Ajustando-se as penalidades associadas aos desvios em relação à programação original é possível obter soluções com menores desvios. Porém, isto pode ter como consequência violações nas restrições operativas.

Quando se considerou também os cenários da rede em contingência, foi possível perceber que, com relação a primeira contingência, a solução ótima apresentou ainda pequena violação no limite operativo (barra 37). Pode-se perceber também que o desvio médio em relação a programação original programações foi menor que a apresentada no Teste 15, demonstrando que é possível atingir o mesmo objetivo (eliminação das violações operativas) mesmo em contingência, embora as contingências tenham contribuído para um desvio maior entre as programações em relação ao Teste 16.

A eliminação dos problemas operativos pode ocorrer com um ajuste relativo entre as penalidades associadas ao desvio em relação à programação original e às violações das restrições operativas.

Nos testes realizados no sistema de 440kV, assim como no restante deste trabalho, não foram realizadas simulações dinâmicas para avaliação de segurança do SIN.

Com relação ao desempenho computacional da metodologia proposta, foi possível observar que os tempos obtidos nas simulações realizadas foram inferiores a 50 minutos, tendo sido utilizada uma estação com processador de 750Mhz e 64Mb de memória RAM.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Em um sistema interligado, diversas solicitações de desligamentos de equipamentos para manutenção são recebidas e devem ser coordenadas a um nível central, de modo a avaliar o impacto sobre o sistema. Tais solicitações indicam equipamentos a serem desconectados e os respectivos horários para tais ocorrências. Os desligamentos, se atendidos conforme solicitados, podem implicar em intervenções (simultâneas ou não), onde o impacto sobre a operação do sistema pode ser extremamente indesejável. Portanto, é necessário avaliar o impacto de tais solicitações de uma forma conjunta, caracterizando assim a análise de uma programação de desligamentos. Além disso, é necessário reprogramar as intervenções na rede elétrica (associadas às solicitações de desligamento), de modo a evitar problemas operativos. Estratégias usualmente empregadas para a reprogramação são baseadas na experiência sobre a operação do sistema e visam deslocar os desligamentos para períodos onde se acredita que seu impacto seja minimizado (ex: períodos de carga leve). Tal estratégia, além de não considerar todas as análises necessárias para garantir o bom funcionamento do sistema, não busca atender a solicitação inicial de desligamentos.

Este trabalho apresentou uma metodologia que utiliza algoritmos genéticos para a otimização da programação de desligamentos em redes de energia elétrica. A metodologia proposta foi desenvolvida levando em consideração a necessidade de atendimento a demanda, a necessidade de atendimento aos limites operativos e buscando atender, na medida do possível, as solicitações de desligamento inicialmente proposta. O atendimento a demanda foi considerado observando-se a convergência do processo de análise de fluxo de potência, enquanto o atendimento aos limites operativos foi considerado confrontando valores observados de magnitudes de tensão e de fluxos de potência em relação aos seus respectivos valores limite. A metodologia permite a verificação do atendimento a estas restrições em situações da rede sob desligamentos e ainda em cenários derivados destes, quando a ocorrência de contingências também é considerada. Para tal análise é realizado um processo de análise de contingências.

O problema alvo desta dissertação foi então formulado como um problema de otimização, cujo objetivo é a minimização do desvio (em horas) da programação ótima em relação à programação originalmente proposta, sujeita ao atendimento às restrições anteriormente mencionadas. Na formulação utilizando AGs, foi utilizada uma função de aptidão flexível, a qual permite levar em consideração uma ou mais restrições e diferentes objetivos, através da utilização adequada de penalidades associadas ao não atendimento às restrições e de prioridades associadas a importância de se atender cada solicitação inicialmente proposta. A representação do cromossomo utilizada no AG contém a representação binária do horário inicial de cada desligamento, sendo as respectivas durações previamente conhecidas.

A metodologia foi testada com o sistema IEEE 14 barras, quando foram consideradas programações iniciais de diferentes durações, o atendimento a diferentes objetivos e a diferentes restrições. Os resultados obtidos mostraram a capacidade da metodologia em tratar o problema alvo da dissertação, sendo uma ferramenta com potencial aplicação na programação ótima de manutenção, podendo ter aplicação localizada (programação de uma única empresa) ou a um nível central, onde as solicitações de diferentes empresas que operam em um sistema interligado devem ser coordenadas.

6.2 Contribuições do Trabalho

O problema de Programação de Desligamentos tem recebido pouca atenção na literatura técnica, especialmente no caso de desligamentos em uma rede de transmissão de um sistema interligado, quando as solicitações devem ser coordenadas em um nível central. Dentre as contribuições deste trabalho pode-se destacar:

- Desenvolvimento de uma metodologia integrada para a obtenção de programações de desligamento, levando em consideração não apenas o atendimento às restrições operativas, como também a solicitação inicial dos desligamentos.

- Formulação do problema de programação de desligamentos, notadamente de natureza combinatória, como um problema de otimização a ser resolvido através da técnica dos algoritmos genéticos.
- Proposição de uma função objetivo flexível, que permite considerar diferentes objetivos e diferentes restrições através do ajuste adequado de um conjunto de penalidades.

6.3 Propostas para Trabalhos Futuros

O problema tratado nesta dissertação apresenta grande complexidade e a linha de pesquisa nesta área apresenta ainda muitos desafios. Dentre as propostas para trabalhos futuros pode-se destacar:

- Testes com sistemas de maior porte e representação do carregamento em cada período de análise de acordo com a curva de carga diária ao invés de utilizar patamares de carga leve, média e pesada;
- Implementação da função de redespacho de potência ativa das usinas, para um melhor atendimento às restrições de carregamentos elevados nos equipamentos;
- Inclusão da Análise Dinâmica, de forma a avaliar a segurança do sistema, no que diz respeito às oscilações das máquinas frente a perturbações (contingências);
- Utilização de técnicas de processamento paralelo, para acelerar o tempo computacional de busca da solução ótima;
- Investigação de outras técnicas de computação evolutiva;

APÊNDICE A – Sistemas Testados

A.1 Configuração Básica do Sistema IEEE 14

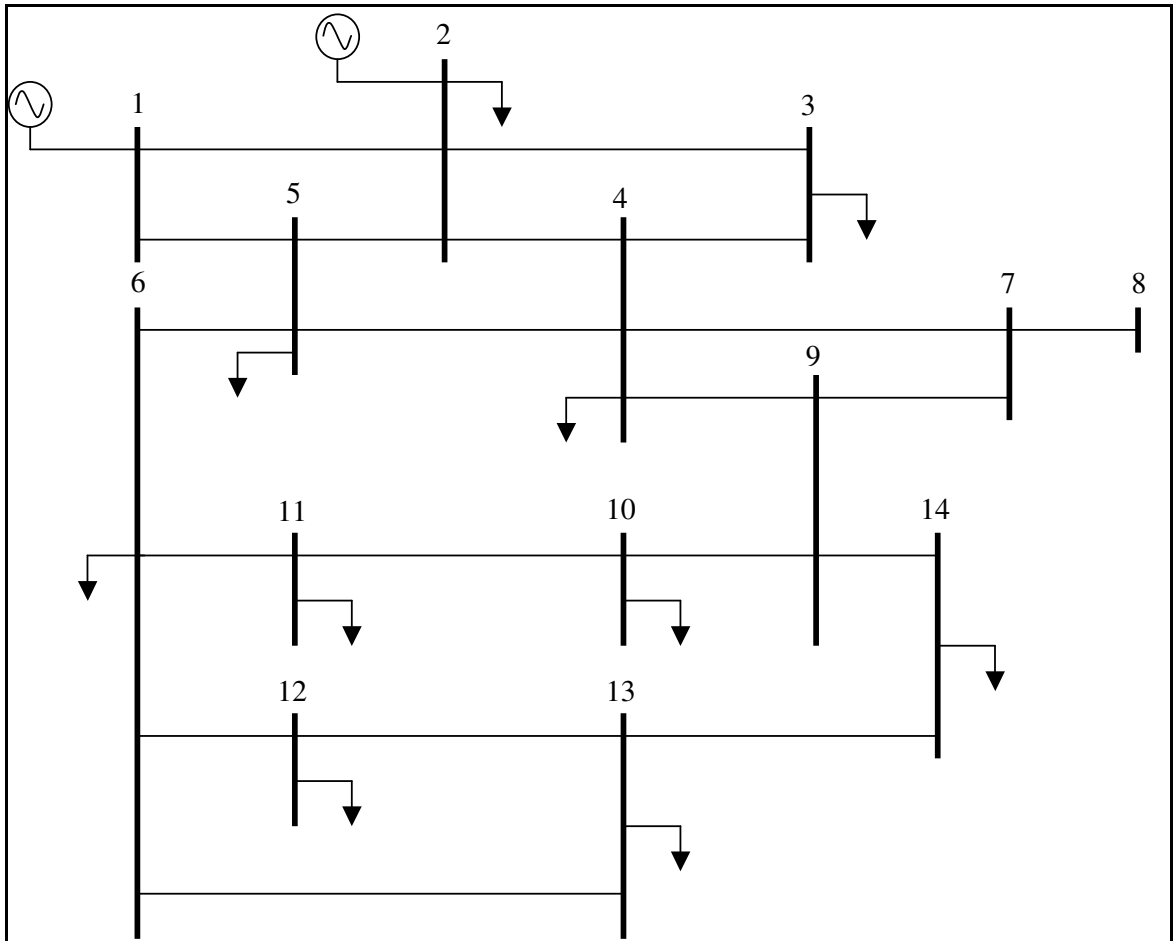


Figura A1 - Configuração da Rede – IEEE 14

A.2 Dados de Rede

Tabela A 1 – Parâmetros de Rede

Circuito		Parâmetros		
De	Para	R(pu)	X(pu)	B(pu)
1	2	0,19380	0,59170	0,528
1	5	0,54030	0,22304	0,492
2	3	0,46990	0,19797	0,438
2	4	0,58110	0,17632	0,374
2	5	0,56950	0,17388	0,340
3	4	0,67010	0,17103	0,346
4	5	0,13350	0,42110	0,128
4	7	0,00000	0,20912	0,000
4	9	0,00000	0,55618	0,000
5	6	0,00000	0,25202	0,000
6	11	0,94980	0,19890	0,000
6	12	0,12291	0,25581	0,000
6	13	0,66150	0,13027	0,000
7	8	0,00000	0,17615	0,000
7	9	0,00000	0,11001	0,000
9	10	0,31810	0,84500	0,000
9	14	0,12711	0,27038	0,000
10	11	0,82050	0,19207	0,000
12	13	0,22092	0,19988	0,000
13	14	0,17093	0,34082	0,000

A.3 Dados de Carga

Tabela A 2 – Dados de Carga Pesada

Dados de Carga para o Patamar de Carga Pesada					
Barra	Tipo de Barra (*)	Tensão Inicial (pu)	Potência Ativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	2	1,060	1869,5	0,0	0,0
2	1	1,045	40,0	14,49	8,48
3	1	1,010	0,0	63,85	12,88
4	0	1,019	-	32,26	-2,63
5	0	1,020	-	5,09	1,07
6	1	1,070	0,0	7,52	5,03
7	0	1,062	-	0,0	0,0
8	1	1,090	0,0	0,0	0,0
9	0	1,056	-	19,57	11,01
10	0	1,051	-	6,03	3,88
11	0	1,057	-	2,35	1,21
12	0	1,055	-	4,07	1,07
13	0	1,050	-	8,98	3,86
14	0	1,036	-	9,99	3,35

Tabela A 3 – Dados de Carga Média

Dados de Carga para o Patamar de Carga Média					
Barra	Tipo de Barra (*)	Tensão Inicial (pu)	Potência Ativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	2	1,060	1589,07	0,0	0,0
2	1	1,045	34,0	12,31	7,19
3	1	1,010	0,0	54,27	10,94
4	0	1,019	-	27,41	-2,23
5	0	1,020	-	4,32	0,91
6	1	1,070	0,0	6,38	4,28
7	0	1,062	-	0,0	0,0
8	1	1,090	0,0	0,0	0,0
9	0	1,056	-	16,63	9,36
10	0	1,051	-	5,12	3,29
11	0	1,057	-	1,98	1,03
12	0	1,055	-	3,45	0,90
13	0	1,050	-	7,62	3,27
14	0	1,036	-	8,49	2,85

Tabela A 4 – Dados de Carga Leve

Dados de Carga para o Patamar de Carga Leve					
Barra	Tipo de Barra (*)	Tensão Inicial (pu)	Potência Ativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	2	1,060	1495,60	0,0	0,0
2	1	1,045	32,0	11,58	6,78
3	1	1,010	0,0	51,08	10,29
4	0	1,019	-	25,88	-2,11
5	0	1,020	-	4,07	0,86
6	1	1,070	0,0	6,01	4,02
7	0	1,062	-	0,0	0,0
8	1	1,090	0,0	0,0	0,0
9	0	1,056	-	15,65	8,81
10	0	1,051	-	4,82	3,11
11	0	1,057	-	1,87	0,96
12	0	1,055	-	3,24	0,84
13	0	1,050	-	7,18	3,08
14	0	1,036	-	7,99	2,68

(*) Tipos de Barra:

Barra tipo 0 → Barra PQ

Barra tipo 1 → Barra PV

Barra tipo 2 → Barra de Referência

A.4 Configuração Básica do Sistema de 440kV de São Paulo

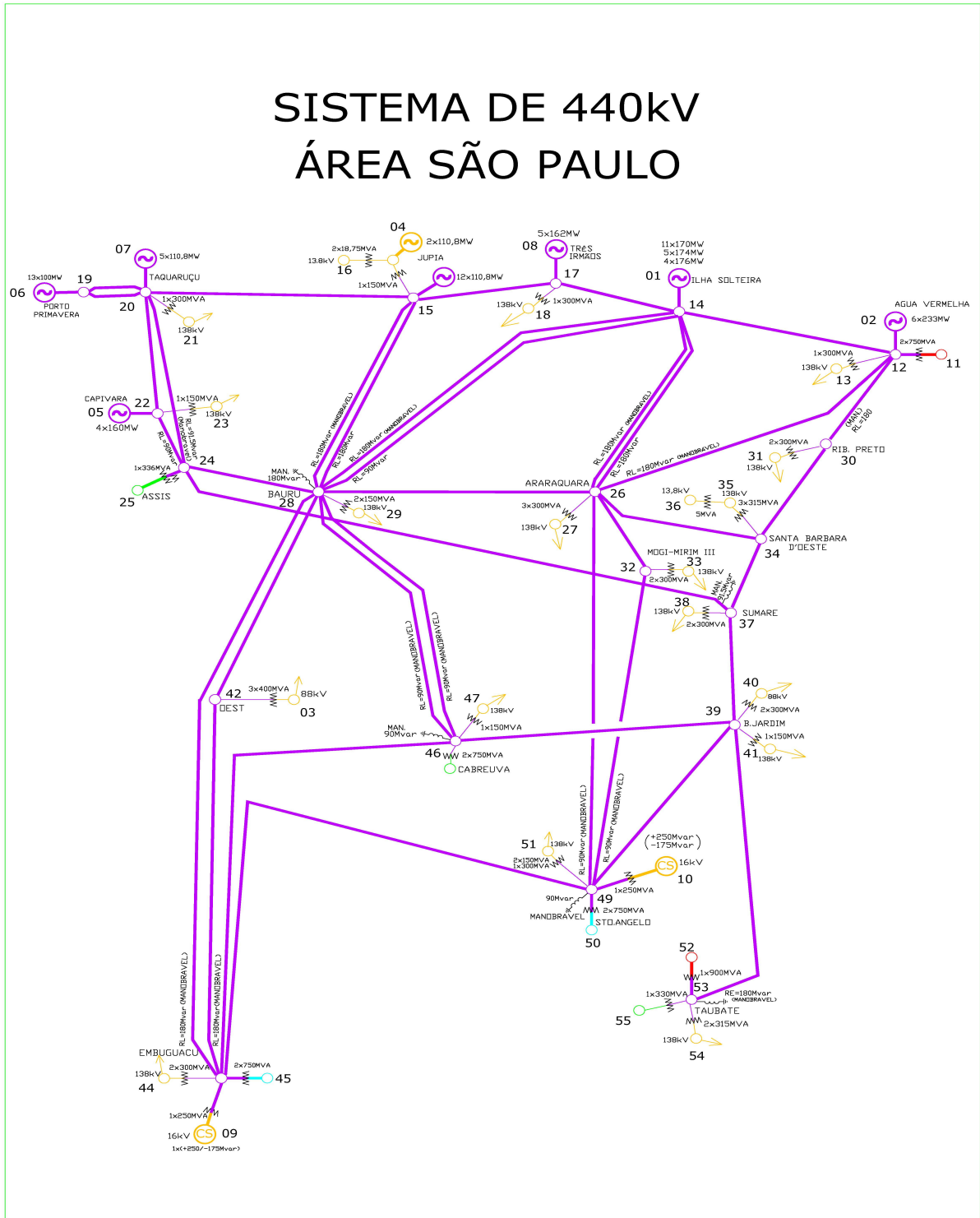


Figura A4 - Configuração da Rede – Área São Paulo

A.5 Dados de Rede

Tabela A 5 – Parâmetros de Rede

Circuito		Parâmetros		
De	Para	R(pu)	X(pu)	B(pu)
1	14	0,00000	0,00390	0,00000
2	12	0,00000	0,01367	0,00000
3	42	0,00000	0,00020	0,01560
4	15	0,00000	0,00880	0,00000
5	22	0,00000	0,02880	0,00000
6	19	0,00000	0,00850	0,00000
7	20	0,00000	0,03720	0,00000
8	17	0,00000	0,01656	0,00000
9	43	0,00000	0,03760	0,00000
10	49	0,00000	0,03760	0,00000
11	12	0,00000	0,00740	0,00000
12	13	0,00000	0,04700	0,00000
14	12	0,00190	0,02520	1,36890
14	26	0,00240	0,02980	1,92480
14	28	0,00210	0,02540	1,63900
15	16	0,00000	0,08330	0,00000
15	28	0,00390	0,04960	3,19725
17	14	0,00060	0,00810	0,48630
17	15	0,00060	0,00730	0,43830
17	18	0,00000	0,04450	0,00000
20	15	0,00270	0,03600	1,97090
20	19	0,00080	0,00970	0,54370
20	21	0,00000	0,04660	0,00000
22	20	0,00090	0,01200	0,66940
22	23	0,00000	0,01078	0,00000
24	20	0,00240	0,03140	1,75770
24	22	0,00140	0,01820	1,02200
24	25	0,00000	0,07240	0,00000
26	12	0,00400	0,05360	2,90920
26	27	0,00000	0,01590	0,00000
28	24	0,00180	0,02370	1,32670
28	26	0,00130	0,01710	1,02880
28	29	0,00000	0,04350	0,00000
30	12	0,00410	0,05640	3,04120
30	31	0,00000	0,02330	0,00000
32	26	0,00210	0,02650	1,70710
32	33	0,00000	0,02270	0,00000
34	26	0,00180	0,02380	1,34800
34	30	0,00220	0,03030	1,63370
34	35	0,00000	0,02270	0,00000
34	36	0,00000	0,04650	0,00000
37	24	0,00430	0,05690	3,18890

Circuito		Parâmetros		
37	34	0,00030	0,00340	0,19210
37	38	0,00000	0,02390	0,00000
37	39	0,00060	0,00800	0,45810
39	40	0,00000	0,09660	0,00000
39	41	0,00000	0,02300	0,00000
42	28	0,00280	0,03540	2,28280
43	28	0,00390	0,04860	3,13390
43	42	0,00110	0,01320	0,85110
43	44	0,00000	0,00360	0,00000
43	45	0,00000	0,02320	0,00000
43	46	0,00090	0,01220	0,73500
46	28	0,00150	0,01880	1,21030
46	39	0,00030	0,00380	0,23710
46	47	0,00000	0,00370	0,00000
46	48	0,00000	0,08270	0,00000
49	26	0,00380	0,04700	3,03360
49	32	0,00230	0,02880	1,85570
49	39	0,00150	0,01980	1,18810
49	43	0,00090	0,01220	0,73610
49	50	0,00000	0,00360	0,00000
49	51	0,00000	0,02350	0,00000
52	53	0,00000	0,01030	0,00000
53	39	0,00200	0,02560	1,51950
53	54	0,00000	0,04770	0,00000
53	55	0,00000	0,02320	0,00000

A.6 Dados de Carga

Tabela A 6 – Dados de Carga Pesada

Dados de Carga para o Patamar de Carga Pesada					
Barra	Tipo de Barra (*)	Tensão Inicial (pu)	Potência Ativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	2	1,030	2352,8	0,0	0,00
2	1	1,045	480,0	0,0	0,00
3	0	1,014	-	0,0	0,00
4	1	1,050	880,0	0,0	0,00
5	1	1,040	377,3	0,0	0,00
6	1	1,030	1040,0	0,0	0,00
7	1	1,010	198,6	0,0	0,00
8	1	1,025	480,0	0,0	0,00
9	1	1,020	0,0	0,0	0,00
10	1	1,030	0,0	0,0	0,00
11	1	1,074	98,16	0,0	0,00
12	0	1,045	-	0,0	0,00
13	0	1,050	-	63,6	8,60
14	0	1,036	-	0,0	0,00
15	0	1,046	-	0,0	0,00
16	0	1,045	-	46,3	-15,04
17	0	1,039	-	0,0	0,00
18	0	1,048	-	85,7	2,32
19	0	1,032	-	0,0	0,00
20	0	1,027	-	0,0	0,00
21	0	1,020	-	84,7	3,12
22	0	1,016	-	0,0	0,00
23	0	1,040	-	80,0	18,40
24	0	0,995	-	0,0	0,00
25	0	1,010	-	196,0	-17,20
26	0	1,015	-	0,0	0,00
27	0	1,030	-	388,0	32,72
28	0	1,005	-	0,0	0,00
29	0	1,030	-	64,8	28,00
30	0	0,996	-	0,0	0,00
31	0	1,020	-	195,3	47,76
32	0	1,019	-	0,0	0,00
33	0	1,036	-	289,2	56,00
34	0	0,974	-	0,0	0,00
35	0	1,020	-	218,4	88,00
36	0	1,020	-	116,2	10,48
37	0	0,974	-	0,0	0,00
38	0	1,020	-	288,0	62,00
39	0	0,984	-	0,0	0,00
40	0	1,035	-	83,6	34,00
41	0	1,020	-	367,1	70,40

Dados de Carga para o Patamar de Carga Pesada					
Barra	Tipo de Barra (*)	Tensão Inicial (pu)	Potência Ativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
42	0	1,014	-	0,0	0,00
43	0	1,018	-	0,0	0,00
44	0	0,996	-	339,4	-95,60
45	0	1,050	-	280,0	38,40
46	0	0,980	-	0,0	0,00
47	0	1,022	-	1100,0	165,20
48	0	1,029	-	96,8	24,48
49	0	1,027	-	0,0	0,00
50	0	1,003	-	41,6	-17,20
51	0	1,050	-	309,0	26,80
52	1	1,062	156,8	0,0	0,00
53	0	1,018	-	0,0	0,00
54	0	1,010	-	161,6	47,20
55	0	1,020	-	204,8	25,60

Tabela A 7 – Dados de Carga Média

Dados de Carga para o Patamar de Carga Média					
Barra	Tipo de Barra (*)	Tensão Inicial (pu)	Potência Ativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	2	1,030	1999,8	0,00	0,00
2	1	1,045	408,0	0,00	0,00
3	0	1,014	-	0,00	0,00
4	1	1,050	748,0	0,00	0,00
5	1	1,040	320,8	0,00	0,00
6	1	1,030	884,0	0,00	0,00
7	1	1,010	168,8	0,00	0,00
8	1	1,025	408,0	0,00	0,00
9	1	1,020	0,0	0,00	0,00
10	1	1,030	0,0	0,00	0,00
11	1	1,074	83,4	0,00	0,00
12	0	1,045	-	0,00	0,00
13	0	1,050	-	54,06	7,31
14	0	1,036	-	0,00	0,00
15	0	1,046	-	0,00	0,00
16	0	1,045	-	39,37	-12,78
17	0	1,039	-	0,00	0,00
18	0	1,048	-	72,89	1,97
19	0	1,032	-	0,00	0,00
20	0	1,027	-	0,00	0,00
21	0	1,020	-	72,01	2,65
22	0	1,016	-	0,00	0,00
23	0	1,040	-	68,00	15,64

Dados de Carga para o Patamar de Carga Média					
Barra	Tipo de Barra (*)	Tensão Inicial (pu)	Potência Ativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
24	0	0,995	-	0,00	0,00
25	0	1,010	-	166,60	-14,62
26	0	1,015	-	0,00	0,00
27	0	1,030	-	329,80	27,81
28	0	1,005	-	0,00	0,00
29	0	1,030	-	55,08	23,80
30	0	0,996	-	0,00	0,00
31	0	1,020	-	166,05	40,59
32	0	1,019	-	0,00	0,00
33	0	1,036	-	245,82	47,60
34	0	0,974	-	0,00	0,00
35	0	1,020	-	185,64	74,80
36	0	1,020	-	98,80	8,90
37	0	0,974	-	0,00	0,00
38	0	1,020	-	244,80	52,70
39	0	0,984	-	0,00	0,00
40	0	1,035	-	71,06	28,90
41	0	1,020	-	312,05	59,84
42	0	1,014	-	0,00	0,00
43	0	1,018	-	0,00	0,00
44	0	0,996	-	288,52	-81,26
45	0	1,050	-	238,00	32,64
46	0	0,980	-	0,00	0,00
47	0	1,022	-	935,00	140,42
48	0	1,029	-	82,28	20,80
49	0	1,027	-	0,00	0,00
50	0	1,003	-	35,36	-14,62
51	0	1,050	-	262,68	22,78
52	1	1,062	133,3	0,00	0,00
53	0	1,018	-	0,00	0,00
54	0	1,010	-	137,36	40,12
55	0	1,020	-	174,08	21,76

Tabela A 8 – Dados de Carga Leve

Dados de Carga para o Patamar de Carga Leve					
Barra	Tipo de Barra (*)	Tensão Inicial (pu)	Potência Ativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	2	1,030	1799,8	0,00	0,00
2	1	1,045	367,2	0,00	0,00
3	0	1,014	-	0,00	0,00
4	1	1,050	673,2	0,00	0,00
5	1	1,040	288,7	0,00	0,00
6	1	1,030	795,6	0,00	0,00
7	1	1,010	151,9	0,00	0,00
8	1	1,025	367,2	0,00	0,00
9	1	1,020	0,00	0,00	0,00
10	1	1,030	0,00	0,00	0,00
11	1	1,074	75,1	0,00	0,00
12	0	1,045	-	0,00	0,00
13	0	1,050	-	48,65	6,57
14	0	1,036	-	0,00	0,00
15	0	1,046	-	0,00	0,00
16	0	1,045	-	35,43	-11,50
17	0	1,039	-	0,00	0,00
18	0	1,048	-	65,60	1,77
19	0	1,032	-	0,00	0,00
20	0	1,027	-	0,00	0,00
21	0	1,020	-	64,81	2,38
22	0	1,016	-	0,00	0,00
23	0	1,040	-	61,20	14,07
24	0	0,995	-	0,00	0,00
25	0	1,010	-	149,94	-13,15
26	0	1,015	-	0,00	0,00
27	0	1,030	-	296,82	25,03
28	0	1,005	-	0,00	0,00
29	0	1,030	-	49,57	21,42
30	0	0,996	-	0,00	0,00
31	0	1,020	-	149,45	36,53
32	0	1,019	-	0,00	0,00
33	0	1,036	-	221,23	42,84
34	0	0,974	-	0,00	0,00
35	0	1,020	-	167,07	67,32
36	0	1,020	-	88,92	8,01
37	0	0,974	-	0,00	0,00
38	0	1,020	-	220,32	47,43
39	0	0,984	-	0,00	0,00
40	0	1,035	-	63,95	26,01
41	0	1,020	-	280,84	53,85
42	0	1,014	-	0,00	0,00
43	0	1,018	-	0,00	0,00

Dados de Carga para o Patamar de Carga Leve					
Barra	Tipo de Barra (*)	Tensão Inicial (pu)	Potência Ativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
44	0	0,996	-	259,67	-73,13
45	0	1,050	-	214,20	29,37
46	0	0,980	-	0,00	0,00
47	0	1,022	-	841,50	126,37
48	0	1,029	-	74,05	18,72
49	0	1,027	-	0,00	0,00
50	0	1,003	-	31,82	-13,15
51	0	1,050	-	236,41	20,50
52	1	1,062	120,0	0,00	0,00
53	0	1,018	-	0,00	0,00
54	0	1,010	-	123,62	36,10
55	0	1,020	-	156,67	19,58

(*) Tipos de Barra:

Barra tipo 0 → Barra PQ

Barra tipo 1 → Barra PV

Barra tipo 2 → Barra de Referência

APÊNDICE B – Desempenho do AG

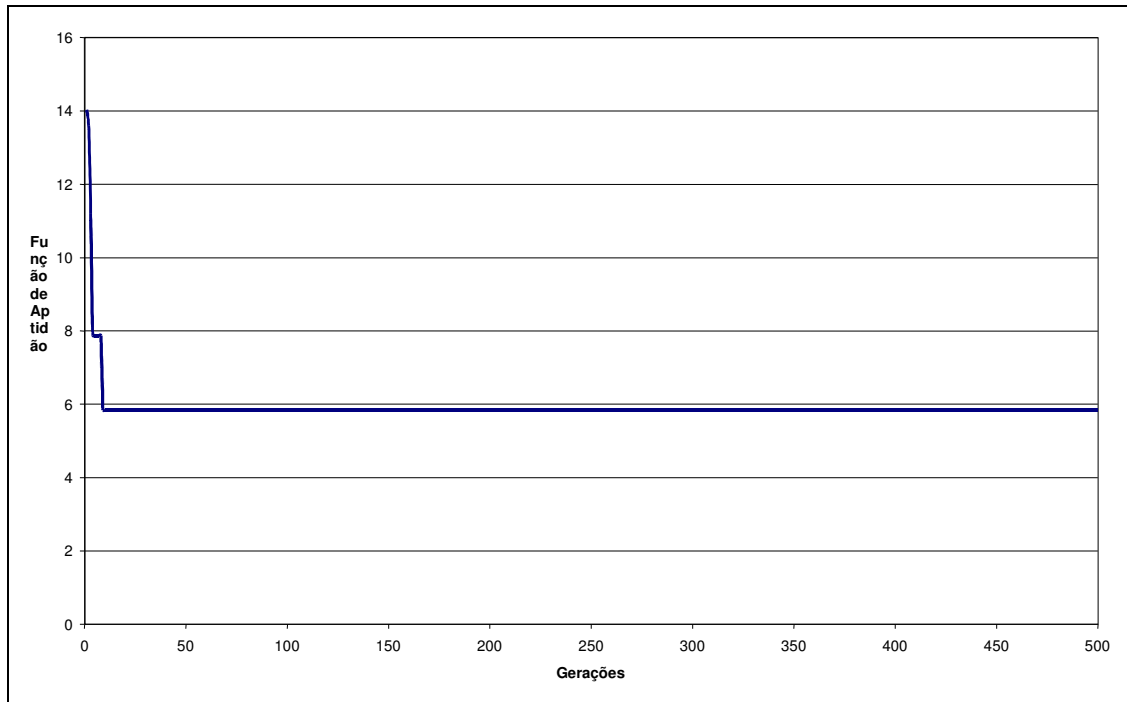


Figura B.1 - Convergência do AG para o Teste 1

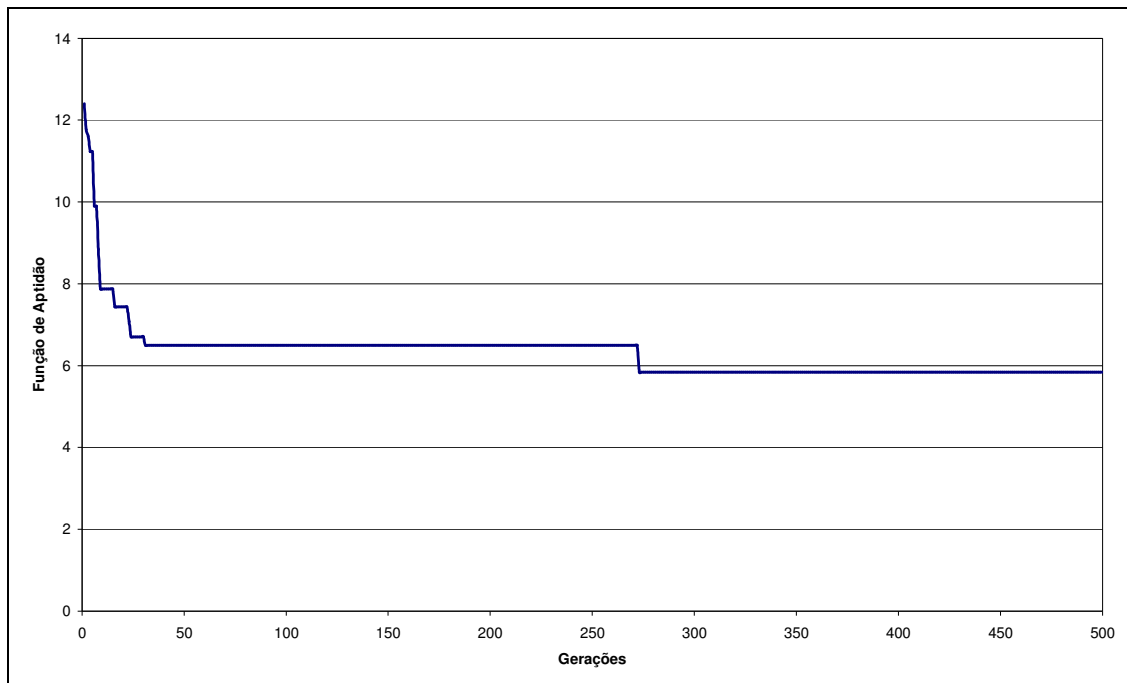


Figura B.2 - Convergência do AG para o Teste 2

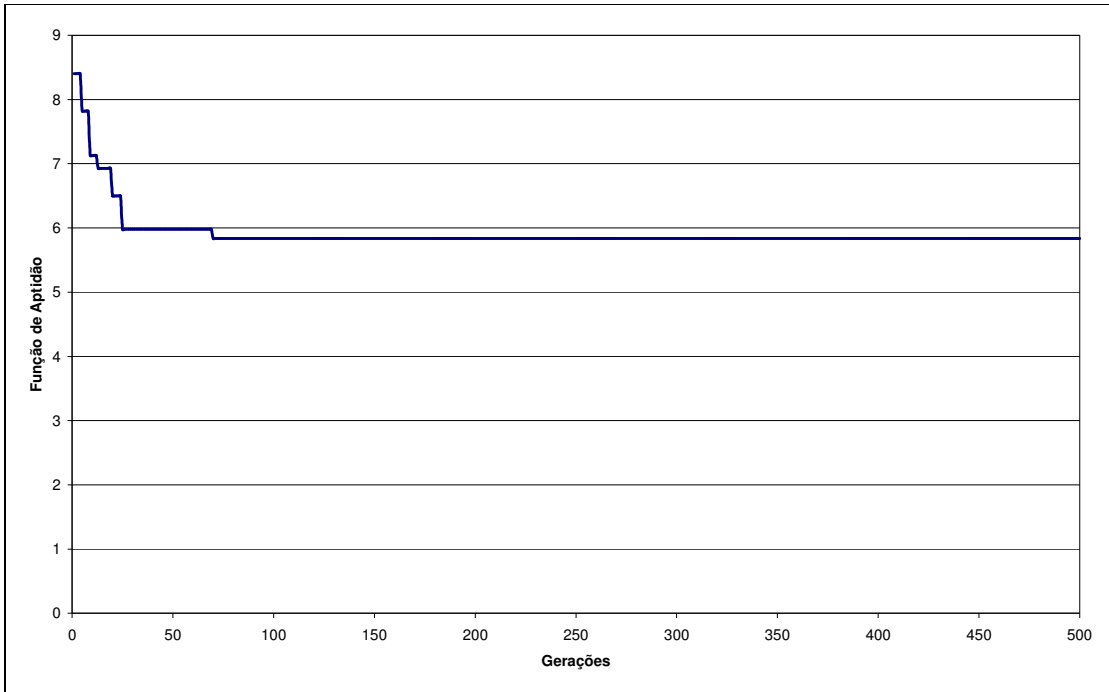


Figura B.3 - Convergência do AG para o Teste 3

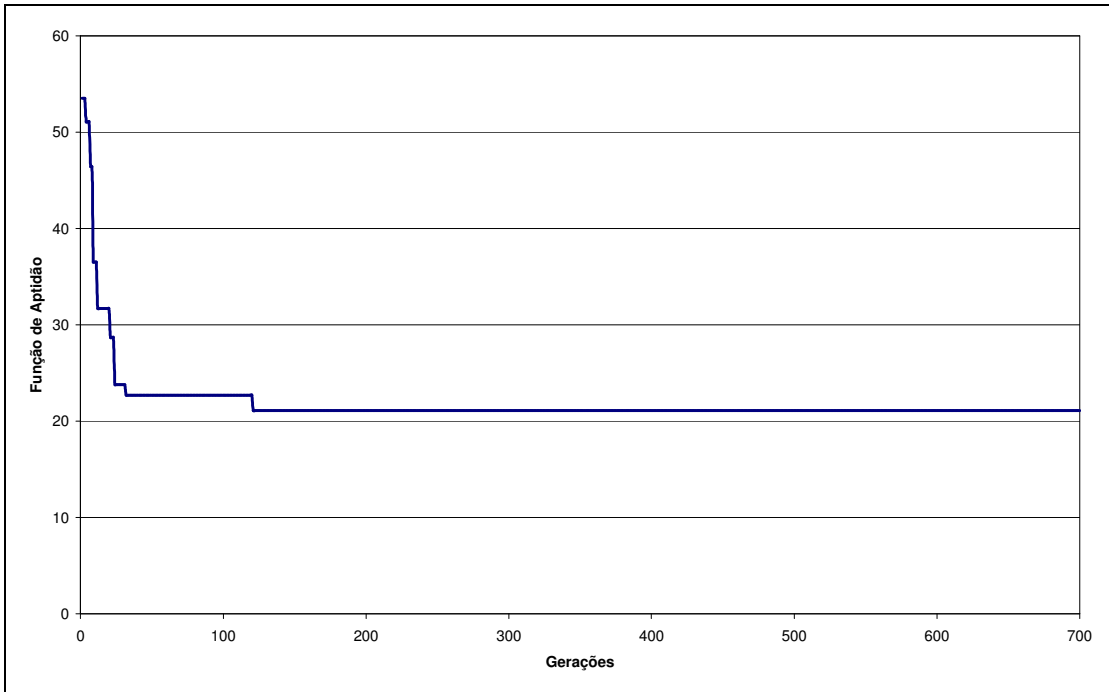


Figura B.4 - Convergência do AG para o Teste 4

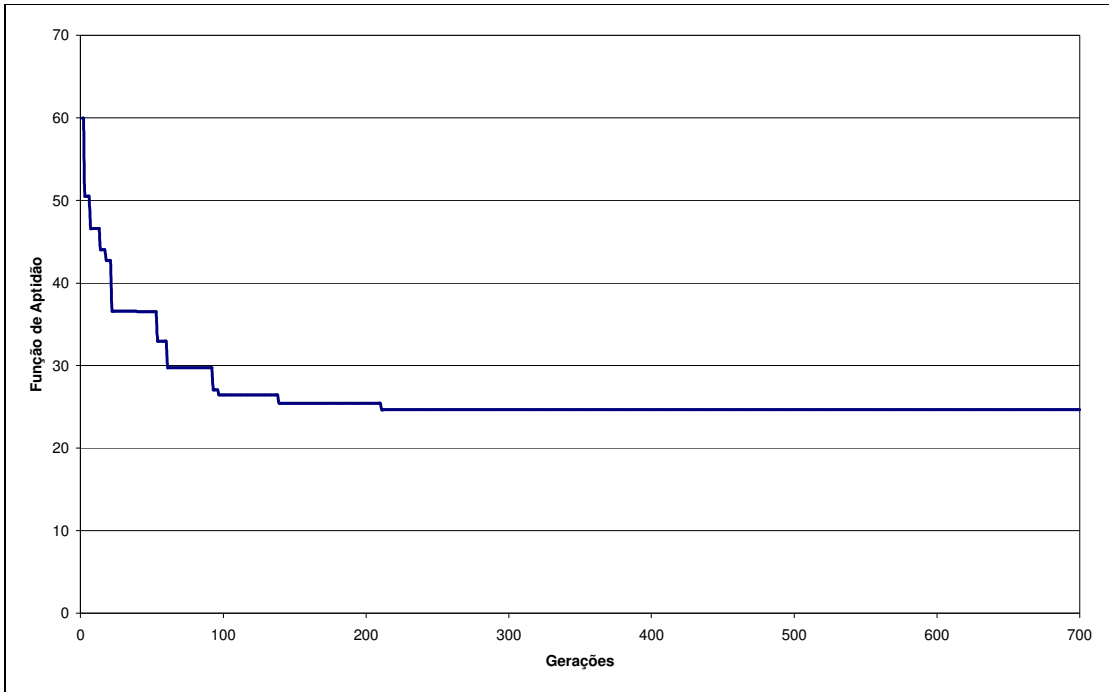


Figura B.5 - Convergência do AG para o Teste 5

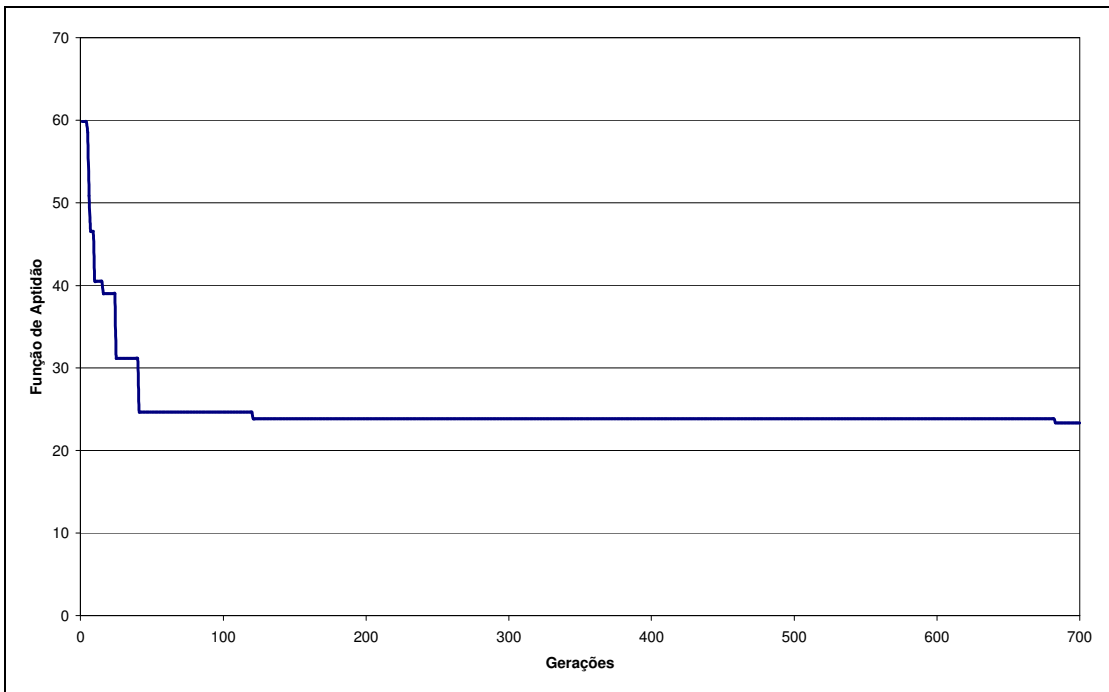


Figura B.6 - Convergência do AG para o Teste 6

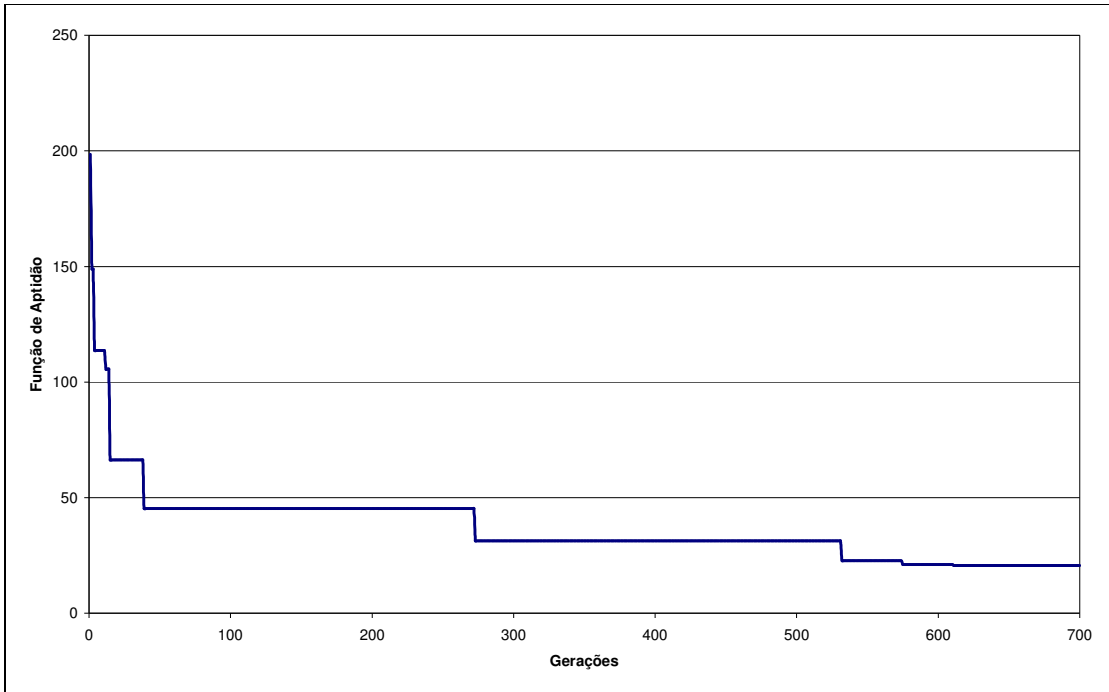


Figura B.7 - Convergência do AG para o Teste 7

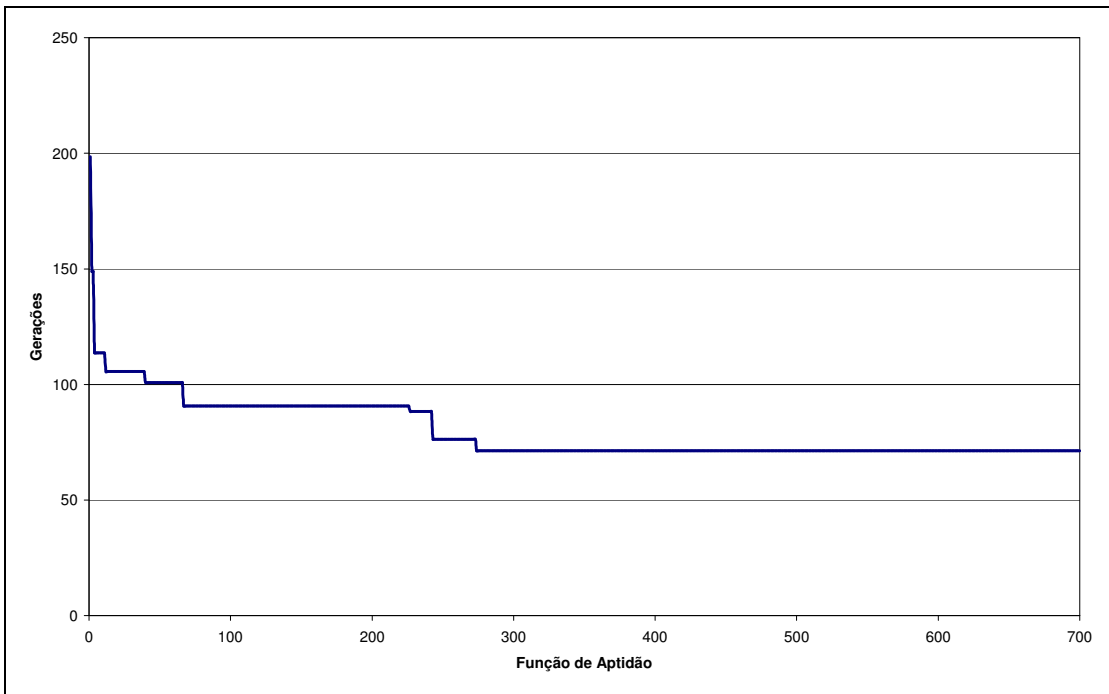


Figura B.8 - Convergência do AG para o Teste 8

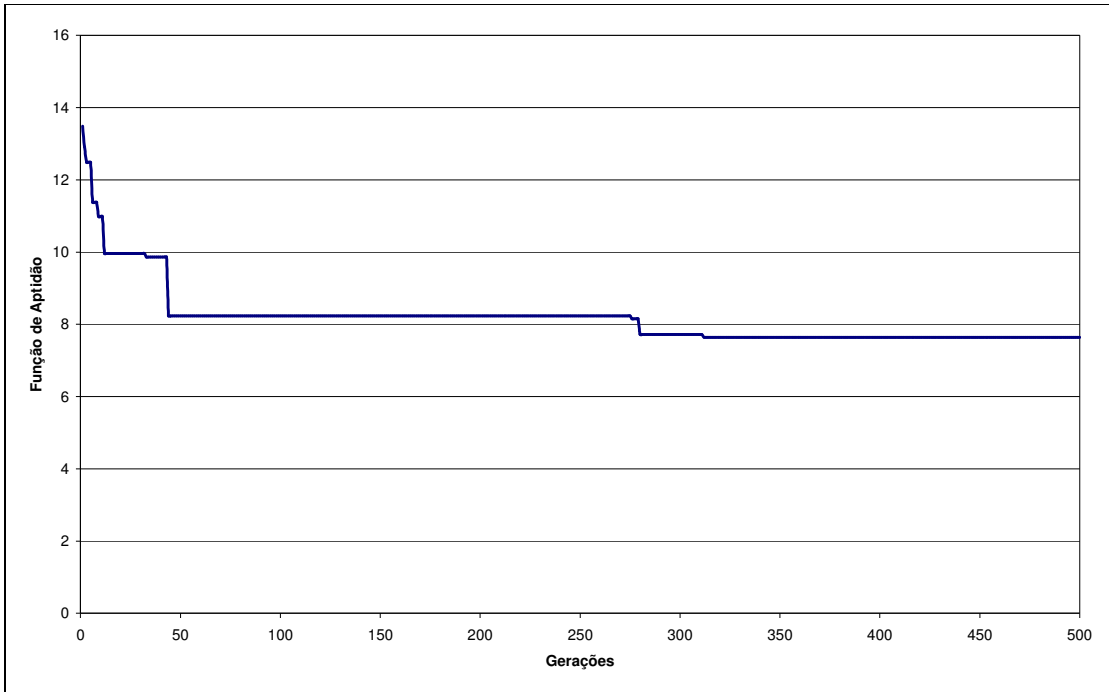


Figura B.9 - Convergência do AG para o Teste 9

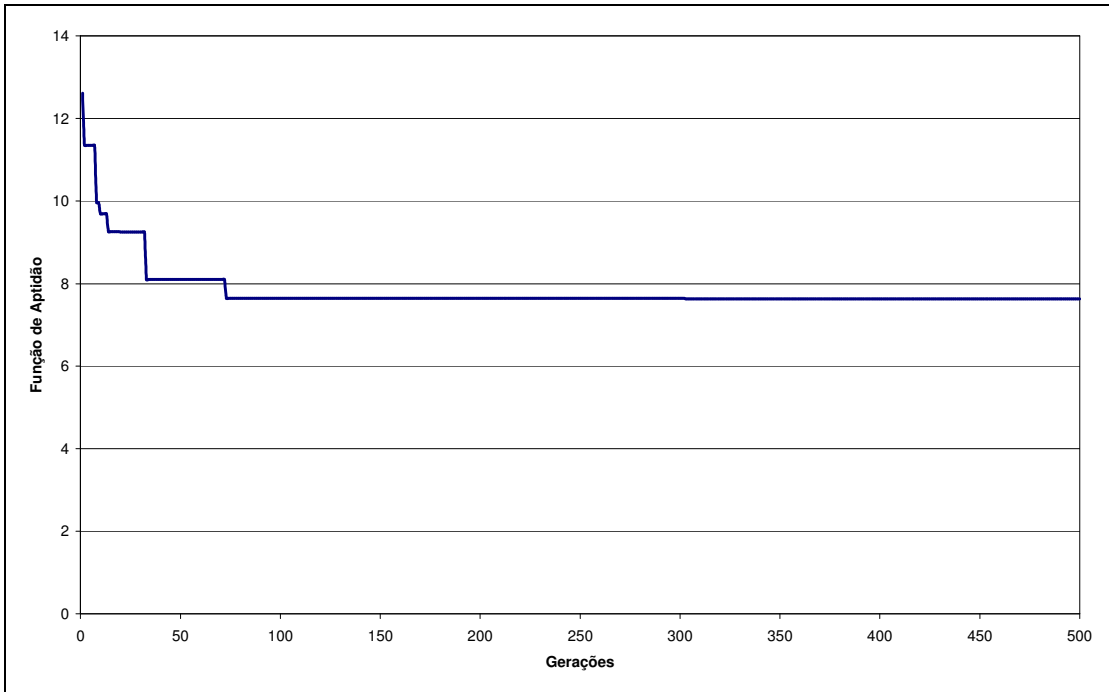


Figura B.10 - Convergência do AG para o Teste 10

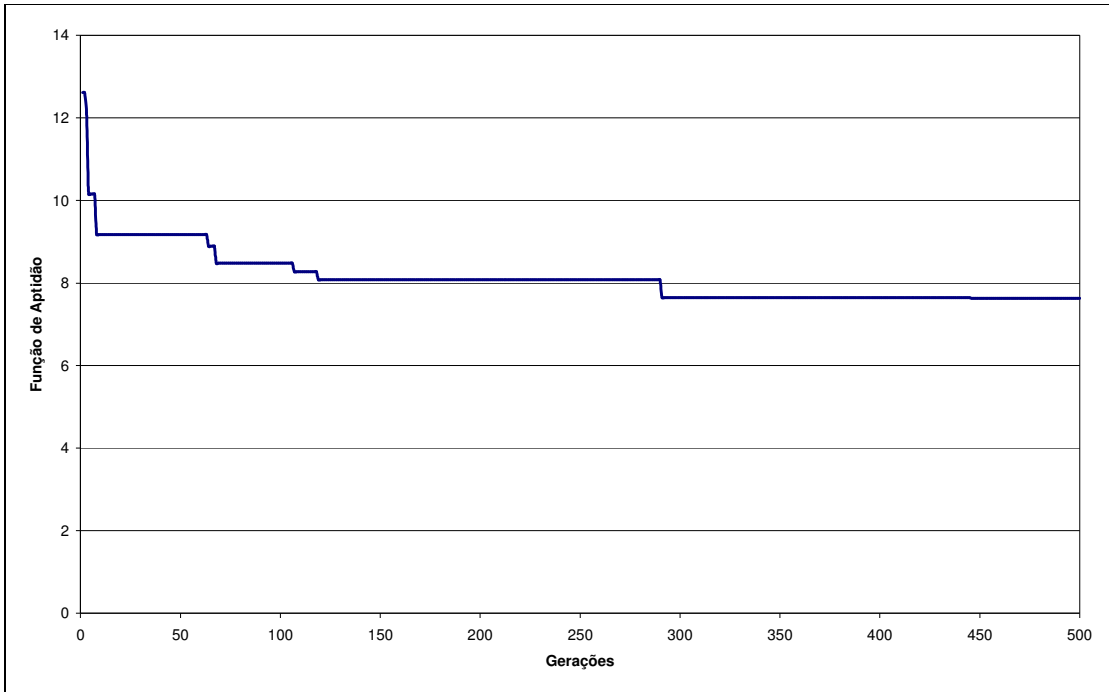


Figura B.11 - Convergência do AG para o Teste 11

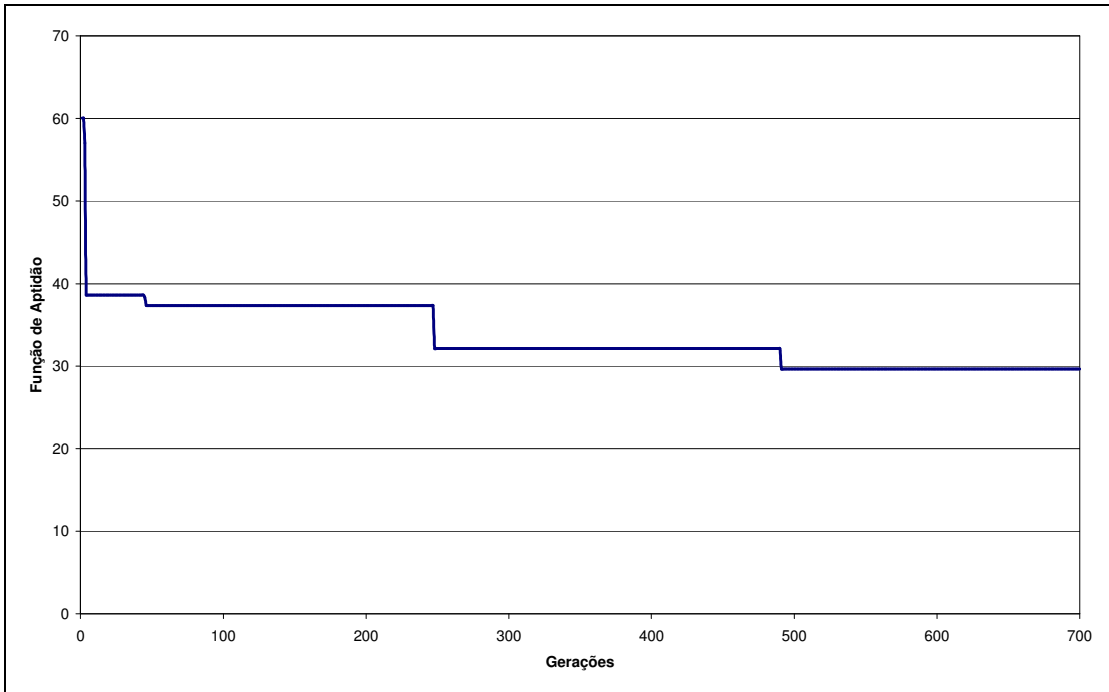


Figura B.12 - Convergência do AG para o Teste 12

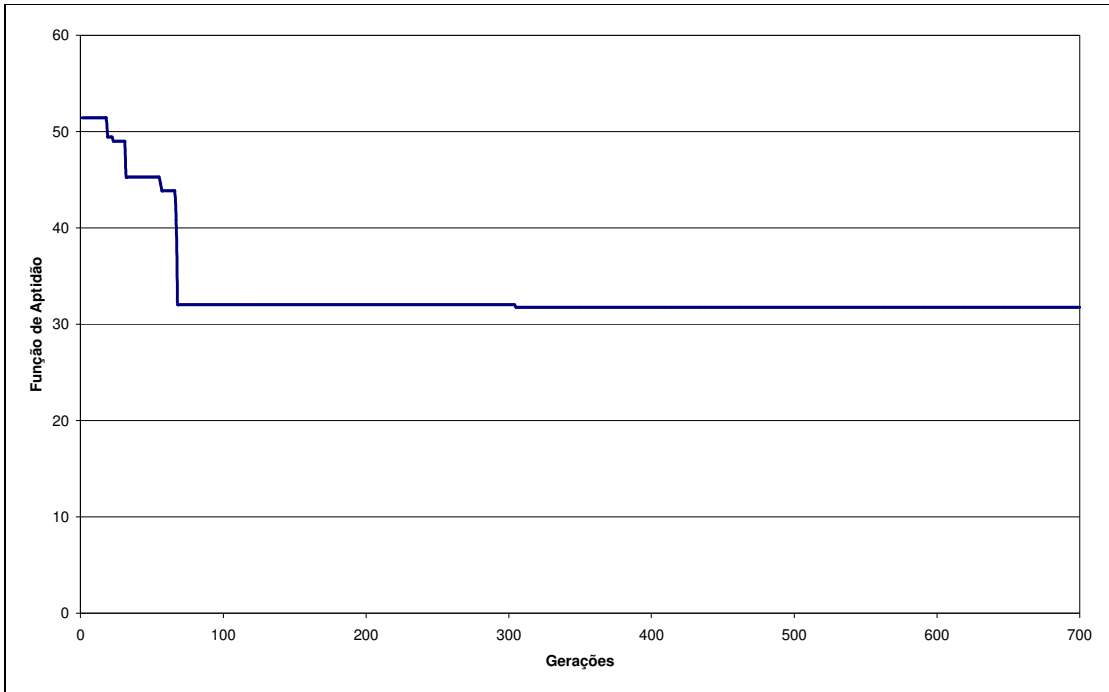


Figura B.13 - Convergência do AG para o Teste 13

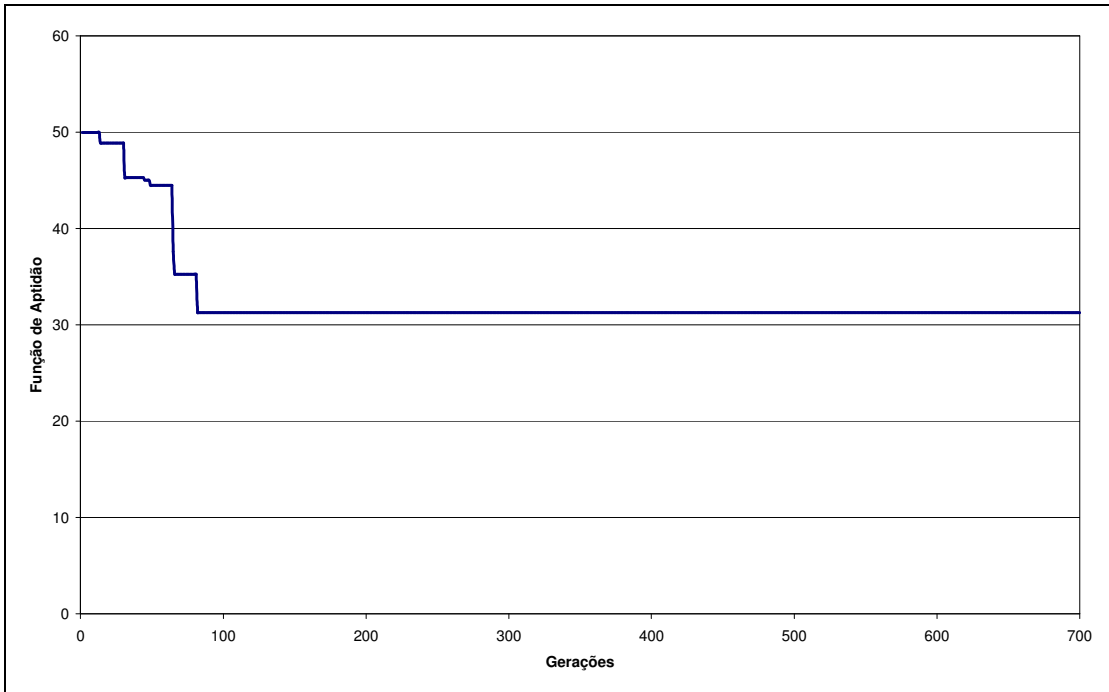


Figura B.14 - Convergência do AG para o Teste 14

REFERÊNCIAS

[Chatto95] D. Chattopadhyay, K. Bhattacharya and J. Parikh, "A Systems Approach to Least-Cost Maintenance Scheduling for an Interconnected Power System". *IEEE Trans. On Power Syst.*, vol. 10, 4, pp.2002-2007, Nov. 1995.

[Chen91] L. Chen and J. Toyoda, "Optimal Generating Unit Maintenance Scheduling for Multi-Area System with Network Constraints". *IEEE Trans. On Power Syst.*, vol. 6, pp.1168-1174, Aug. 1991.

[Conta89] G. C. Contaxis, S. D. Kavatza and C. D. Vournas, "An Interactive Package for Risk Evaluation and Maintenance Scheduling". *IEEE Trans. On Power Syst.*, vol. 4, 2, pp.389-395, May. 1989.

[Dopa75] J. F. Dopazo and H. M. Merrill, "Optimal Generator Maintenance Scheduling using Integer Programming". *IEEE Trans. On PA Syst.*, vol. 4, 2, pp.389-395, May. 1989.

[Egan76] G.T. Egan, T.S. Dillon and K. Morsztyn, "An Experimental Method of Determination of Optimal Maintenance Schedules in Power Systems Using the Branch and Bound Technique", *IEEE Trans. Man & Cybs*, Vol. SMC-6, No. 8, 1269-1278, Aug. 1976.

[Garver72] L. L. Garver, "Adjusting Maintenance Schedules to Levelize Risk", *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-91, pp. 2057-2063, Sept./Oct. 1972.

[Gold89] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley, 1989.

[Hol75] J. H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

[Juan97] J. Juan and I. Ortega, "Reliability Analysis for Hydrothermal Generating Systems Including the Effect of Maintenance Scheduling", *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 12, 4, pp.1561-1568, Nov. 1997.

[Kham92] T.M. Al-Khamis, S. Vemuri, L. Lemonidis and J. Yellen, "Unit Maintenance Scheduling with Fuel Constraints". *IEEE Trans. on PWRs*, Vol. 7, No. 2, pp. 933-939, May 1992

[Kim97] H. Kim, Y. Hayashi and K. Nara, "An Algorithm for Thermal Unit Maintenance Scheduling Through Combined Use of GA SA and TS", *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 12, 1, pp. 329-335, Feb. 1997.

[Kopi01] A. A. Kopiler, V. M. Rossi, E. B. Evangelista, C. A. R. Alves, "Sistemas Inteligentes para Apoio ao Desligamento Programado em Sistemas Elétricos de Potência", *XIV SNPTEE*, grupo IX – Operação de Sist. Elétricos. Outubro. 2001.

[Lin92] C.E. Lin, C.J. Huang, C.L. Huang, C.C. Liang and S.Y. Lee, "An Expert System for Generator Maintenance Scheduling Using Operation Index". *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 7, 3, pp. 1141-1148, August 1992.

[Mans02] L. A. F. Manso e A. M. Leite da Silva "Avaliação de Programas de Manutenção Utilizando critérios de Confiabilidade". Natal: XIV Congresso Brasileiro de Automática, Setembro 2002.

[Mic96] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs". New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.

[Mitch96] M. Mitchell, "An Introduction to Genetic Algorithms". Massachusetts: MIT Press, 1996.

[Mont83] A Monticelli, "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica". São Paulo, *Edgard Blucher*, p.164p, 1983.

[Muke91] R. Mukerji, H.M. Merrill, R. Erickson, J.H. Parker and R.E. Freidman, "Power Plant Maintenance Scheduling: Optimizing Economics and Reliability", *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 6, 2, pp. 476-483, May 1991.

[Proc01] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Procedimentos de Rede, Submódulo 6.5, "Programação de Intervenções em Instalações da Rede de Operação", ONS, Rio de Janeiro - Junho de 2001.

[Sheik84] F.A. El-Sheikhi and R. Billinton, "Generating Unit Maintenance Scheduling for Single and Two Interconnected Systems", *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-103, 5, pp. 1038-1044, May 1984.

[Silva95] E.L. Silva, M. Morozowski, L.G.S. Fonseca, G.C. Oliveira, A.C.G. Melo and J.C.O. Mello, "Transmission Constrained Maintenance Scheduling of Generating Units: A Stochastic Programming Approach", *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 10, 2, pp. 695-701, May 1995.

[Strem81] J.P. Stremmel, "Maintenance Scheduling for Generation System Planning", *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-100, 3, pp. 1410-1419, March 1981.

[Yellen92] J. Yellen, T.M. Al-Khamis, S. Vemuri and L. Lemonidis, "A Decomposition Approach to Unit Maintenance Scheduling", *IEEE Trans. on PWRS*, vol. 7, 2, pp. 726-733, May 1992.

[Zurn77] H.H. Zurn and V.H. Quintana, "Several Objectives Criteria for Optimal generator Preventive Maintenance Scheduling", *IEEE Trans. on PWRS*, vol. 96, 3, pp. 984-992, May 1977.