

SONIA ANGELINA GARCIA MODESTO

**UM MODELO DE DESPACHO E
PRÉ-DESPACHO DE REATIVOS ATRAVÉS
DE ALGORITMOS GENÉTICOS, FLUXO DE
POTÊNCIA ÓTIMO E BUSCA TABU**

***“A MODEL OF REACTIVE DISPATCH AND A
MODEL OF SHORT-TERM REACTIVE
OPERATION PLANNING THROUGH
GENETIC ALGORITHMS, OPTIMAL POWER
FLOW AND SEARCH TABU”***

C a m p i n a s

2003

.

SONIA ANGELINA GARCIA MODESTO

**UM MODELO DE DESPACHO E PRÉ-DESPACHO DE
REATIVOS ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS,
FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO E BUSCA TABU**

***“A MODEL OF REACTIVE DISPATCH AND A MODEL
OF SHORT-TERM REACTIVE OPERATION
PLANNING THROUGH GENETIC ALGORITHMS,
OPTIMAL POWER FLOW AND SEARCH TABU”***

“Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp - Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica, na área de concentração Automação.”

“Doctorate Thesis presented to the Faculty of Electrical and Computational Engineering - State University of Campinas to obtain the Ph.D. grade in Electrical Engineering”

Orientador:

Prof. Dr. Takaaki Ohishi

Tutor:

Associate Professor Takaaki Ohishi

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida por Sonia Angelina Garcia Modesto, e orientada pelo Prof. Dr. Takaaki Ohishi

Prof. Dr. Takaaki Ohishi

C a m p i n a s

2003

III

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

M72m Modesto, Sonia Angelina Garcia
Um modelo de despacho e pré-
despacho de reativos através de
algoritmos genéticos, fluxo de
potência ótimo e busca tabu / Sonia
Angelina Garcia Modesto. --Campinas,
SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Takaahi Oshihi.
Tese de Doutorado - Universidade
Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Potência reativa (Engenharia
elétrica). 2. Algoritmos genéticos.
3. Busca tabu. 4. Sistemas de energia
elétrica - Estabilidade. I. Oshihi,
Takaahi. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia
Elétrica e de Computação. III.
Título.

Título em Inglês: A model of reactive dispatch and a model
of short-term reactive operation planning
through genetic algorithms, optimal power flow
and search tabu

Palavras-chave em Inglês: Reactive Power (Electrical
Engineering), Genetic algorithms, Tabu
search, Power systems - Stability

Área de concentração: Automação

Titulação: Doutora em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Secundino Soares Filho, Anésio dos
Santos Júnior, Vivaldo Fernando da Costa,
Vinícios Amaral Armentano, Flávio Guilherme
de Melo Lima, José Roberto Sanches Mantovani

Data da defesa: 16-12-2003

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Nome do Candidato : Sonia Angelina Garcia Modesto

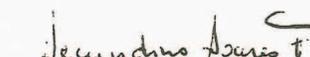
Data da Defesa : 16.12.2003

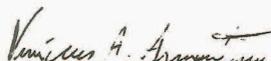
Título da Tese : "Um Modelo de Despacho e Pré-Despacho de Reativos Através de Algoritmos Genéticos, Fluxo de Potência Ótimo e Busca Tabu"


Ass.: Membro

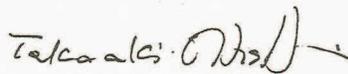

Ass.: Membro


Ass.: Membro


Ass.: Membro


Ass.: Membro


Ass.: Membro


Ass.: Orientador

Dedicatória

Ao “pequeno” Gabriel, anjo que fez renascer a minha vida...

Ao “grande” Vinícius, exemplo incomparável de filho...

A minha família:

Aguimair pela paz,

Altamiro Filho pelo equilíbrio,

Altamiro pela coragem e Maria pelo amor eterno...

A Deus, por me iluminar...

Agradecimentos Especiais

Aos Professores da Pós-Graduação da UNICAMP, pelos competentes ensinamentos.

Ao Prof. Takaaki Ohishi, pela dedicação e orientação.

A Kátia, Flávio Guilherme de Melo Lima, Marco Duarte e Leonardo Nepomuceno pelas idéias e colaborações.

Ao amigo e conterrâneo, Frederico S. Moreira pelo apoio, tolerância, companheirismo e amizade; com quem quero partilhar todo o mérito deste trabalho.

A amiga Adriana L. Tognete, por me ouvir e apoiar nas horas difíceis de nossos estudos e da vida.

Aos colegas do DENSIS, especialmente à Turma do COSE.

Aos amigos especiais conquistados nesta vida: Selma (UNESP), Luciana (UNICAMP), Valmir (UNICAMP), Eliedete (UFMS) e Renata (UFMS), JANDA (MS), VALDECI (MS), Cleuza (RS), os quais agradeço pelo incentivo e apoio.

Resumo

Esta tese trata do problema de planejamento da operação de curto prazo (operação diária) de reativos. A Cadeia de Planejamento do Setor Elétrico brasileiro inicia com um Planejamento de Longo Prazo, o qual considera a operação do sistema através de modelos equivalentes em um horizonte de cinco anos. Em seguida o Planejamento de Médio Prazo, utilizando um modelo individualizado para cada usina hidrelétrica e termelétrica, analisa a operação para um horizonte de um ano à frente. A próxima etapa é de Programação da Operação, a qual determina a operação do sistema para o horizonte de alguns dias à frente. Finalmente, a solução da Programação da Operação é utilizada pela operação em tempo real como uma referência operativa. Em todas estas etapas, as modelagens representam apenas a geração e transmissão de potência ativa (Modelo DC). Para a parte reativa não há planejamento.

Neste estudo sobre a parte reativa, enfocou-se o aspecto das variáveis discretas, mais precisamente os taps dos transformadores. Supõe-se conhecido um despacho de geração ativa, dado pela Programação da Operação, e um despacho de potência reativa, obtido por exemplo através de um caso base, ou através de um modelo de fluxo de potência ótimo reativo.

Inicialmente foi estudado o problema de despacho de reativos, o qual considera o operação em um dado instante de tempo (problema estático). Para este problema, foram desenvolvidos três abordagens. A primeira é uma metodologia híbrida combinando Algoritmos Genéticos (AG) e um modelo de Fluxo de Potência Ótimo (FPO). Nesta abordagem as variáveis discretas são tratadas através dos AG e cada indivíduo é avaliado através de um FPO. A vantagem desta metodologia é que esta determina conjuntamente as variáveis contínuas (geração de potência ativa e reativa) e as variáveis discretas; a desvantagem é o elevado tempo computacional. Buscando diminuir o tempo de processamento, foram desenvolvidos duas outras metodologias, uma utilizando um método de Busca Local e a outra baseada em Busca Tabu. Em ambas as metodologias, o FPO foi substituído por um modelo de fluxo de potência não linear.

O plano de operação reativa ao longo de um dia, aqui denominado pré-despacho de reativos, visa estimar uma solução em termos do posicionamento dos taps para cada intervalo do dia, buscando obter um perfil de tensão mais adequado do ponto de vista operativo. A abordagem para o pré-despacho de reativos utiliza o modelo de despacho de reativos baseado em Busca Tabu, mas considera a solução obtida no intervalo anterior. Todas as metodologias utilizaram o sistema IEEE30 como sistema teste.

Abstract

This thesis treats the short-term (daily operation) reactive operation planning. The Brazilian operation planning initially performs a long-term operation study. This planning uses a equivalent model representation and take into account a time horizon of five years. The next step is the mid operation planning, that uses a individual representation and considers one year operation. The last planning determines the short-term operation using a more detailed model, including transmission operation constraints through a linear model. Finally, this short-term planning is used as operational guidelines in the real time operation. The models used in these different planning represent only the active power generation and transmission. For reactive operation there are not planning.

This study about reactive operation focussed the discrete decision. More specifically, the taps are treated as discrete variables. The methodologies supposes that the active and reactive power generations are given.

Initially, the reactive dispatch problem is treated, and three methodologies are developed. The first is a hybrid model, that combines a Genetic Algorithm approach with an Optimal Power Flow model. This methodology has the advantage to determine the active and reactive generations and discrete variables values;

the inconvenient is the high computer time processing. Two others methodologies are developed in order to obtain more faster approach. One approach is based on Local Search and the other is based on Tabu Search. In both methodologies, the OPF model is substituted by a non-linear power flow.

The proposed daily reactive operation planning aims to determines the taps position for each time interval, looking for a more operationally suitable voltage profile. This planning is based on the Tabu Search Reactive Dispatch model. All methodologies used the IEEE30 as test system.

Sumário

Dedicatória	VII
Agradecimentos Especiais	IX
Resumo	XI
Abstract	XIII
1 Introdução	1
2 Despacho de Reativo em Sistemas de Energia Elétrica	5
2.1 Planejamento da Operação	5
2.2 Despacho e Pré-Despacho de Reativos	7
2.2.1 Fontes de Potência Reativa no Sistema de Energia Elé- trica	8
2.2.1.1 Geradores Síncronos	8
2.2.1.2 Linhas de transmissão de alta tensão	9

2.2.1.3	Transformadores com mudança de “tap” sob carga	9
2.2.1.4	Capacitores “shunt”	10
2.2.1.5	Indutores “shunt”	10
2.2.1.6	Compensadores Estáticos	11
2.2.1.7	Compensadores Síncronos	12
2.2.2	Modelos de Despacho de Reativos e Pré-Despacho de Reativos	12
2.3	Abordagem Proposta	13
3	Fluxo de Carga e Fluxo de Potência Ótimo	15
3.1	Introdução	15
3.2	Equações de Fluxo de Carga	16
3.3	Despacho Econômico	17
3.4	Fluxo de Potência Ótimo	19
3.5	Despacho Ótimo de Reativos	20
4	Algoritmos Genéticos	23
4.1	Algoritmos Genéticos	23
4.1.1	Componentes e estrutura de um AGS	25
	, Codificação	26
	Função Aptidão	27
	Seleção	27
	Manipulação	28
4.2	Ciclo Geracional	32
4.3	Critério de Parada	32
4.4	Problemas Críticos	33
5	Busca Tabu	35
5.1	Busca Tabu	35
5.2	Técnicas de Busca	36

5.2.1	Busca Local	37
5.3	Estratégia da Busca Tabu	38
5.3.1	Memória de Curto Prazo e seus Principais Elementos .	38
5.3.2	Critérios de Aspiração	39
5.3.3	Memória de Longo Prazo e suas Estratégias Associadas	42
5.7.3.1	Memória baseada em Frequência	42
5.7.3.2	Estratégia de Intensificação	43
5.7.3.3	Estratégia de Diversificação	45
6	Modelo para Despacho de Reativos	49
6.1	Despachos de Reativos através de Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo	50
7	Despacho de Reativos através de Busca Tabu e Fluxo de Carga	57
7.1	Busca Tabu	57
7.1.1	Busca Local	58
7.1.2	Atualizações da SA e da Solução Incumbente, e Diver- sificação	60
7.1.3	Definição dos movimentos tabu/aspiração	61
7.1.4	Resultados	61
8	Pré-Despacho de Reativos	69
8.1	Perfil de Tensão Diário Típico	69
8.2	Modelo de Despacho Reativo Dinâmico (MD)	70
8.3	Análise da Operação Diária Através do Modelo de Busca Local .	71
8.4	Análise da Operação Diária Através do Modelo de Busca Tabu .	74
8.5	Aplicação do Modelo Dinâmico na Operação Diária	77
8.5.1	Comparação da Busca Local, Busca Tabu e Modelo Di- nâmico	78
8.6	Perfil de Tensão Diário Melhorado	85

Conclusão	87
Referências Bibliográficas	89

CAPÍTULO 1

Introdução

Em um sistema de energia elétrica são produzidas, transportadas e consumidas potências ativas e reativas. A potência ativa é utilizada majoritariamente na produção de energia (calor) e de trabalho mecânico, e a potência reativa está mais relacionado com o controle de tensão e também atende a demanda de potência reativa, causada principalmente pelo aumento de motores elétricos e de outras cargas indutivas e capacitivas. Para uma operação eficiente, econômica e segura faz-se necessária uma adequada alocação de geração de potência ativa e reativa, o que inclui as atividades de planejamento de instalação de novas fontes de potências ativa e reativa, o planejamento da operação e a operação do sistema.

Antes da desregulamentação da indústria de energia elétrica, as decisões sobre as produções das potências ativas e reativas eram associadas, pois como as empresas de energia elétrica possuíam tanto a geração como a transmissão, era obrigação dessas empresas fornecerem energia elétrica com um perfil adequado de tensão; ou seja o controle reativo era um serviço associado ao fornecimento de energia elétrica. Com a desregulamentação, a maioria dos países adotou um

modelo que separa a atividade de produção da atividade de transmissão, impedindo que uma mesma empresa atue na produção e na transmissão de energia elétrica. Neste novo contexto, as decisões sobre a produção de potência ativa são tomadas majoritariamente pelas empresas de geração de energia elétrica e as decisões sobre o controle de reativos são tomadas principalmente pela empresa que controla a transmissão. Essas decisões, no entanto, precisam ser coordenadas, pois as decisões sobre a geração têm forte impacto sobre o sistema de transmissão, e, por outro lado, as restrições de transmissão afetam a alocação da geração. Para facilitar essa coordenação e o atendimento de requisitos de segurança e confiabilidade foram criados os serviços ancilares e também um mercado de serviços ancilares. Há serviços ancilares para diversos fins, tais como, controle de frequência, de controle de congestionamento no sistema de transmissão, de reserva girante (primária e secundária), e também de potência reativa. São variadas também as formas de como cada serviço é valorizado, mas a idéia geral é pagar por um serviço prestado. Por exemplo, suponha que devido a uma sobrecarga em uma dada linha de transmissão seja necessário reprogramar a geração de modo a operar em um ponto menos econômico, então este incremento no custo pode ser encarado como o valor do serviço de eliminar a sobrecarga.

Com o crescimento do mercado e a interligação entre os sistemas de energia elétrica, a questão da potência reativa passou a ser importante principalmente devido ao problema de segurança, pois grande parte dos blackouts verificados no mundo foi causada por problemas de controle de tensão. Nesta área, um fenômeno que tem chamada a atenção é o problema da instabilidade de tensão, que consiste na incapacidade do sistema de controlar adequadamente a tensão. Vê-se então que a questão da potência reativa é importante para um sistema de energia elétrica, tanto do ponto de vista de planejamento da expansão das fontes de reativos, como também do planejamento da operação e da operação do sistema. O problema da expansão consiste em determinar a melhor localização e as características de cada fonte e muitas metodologias já foram propostos para este problema. Já do ponto de vista do planejamento da operação, para a

potência reativa não faz sentido um planejamento de médio e longo prazo, uma vez que o despacho de reativo em um dado instante não depende do despacho de reativos do intervalo anterior, diferente do caso da potência ativa, quando a geração em um determinado instante é influenciada pela operação passada, principalmente em sistemas com geração hidrelétrica. Porém, numa perspectiva de operação diária é importante analisar os cenários operativos em termos de potência reativa para o próximo dia devido à grande variação da carga ao longo de um dia.

O objetivo deste trabalho é tratar o problema de despacho de reativos numa perspectiva de planejamento da operação diária, enfocando principalmente a questão do cálculo de variáveis discretas associados com o despacho de reativos para cada intervalo de tempo do próximo dia, visando fornecer à operação em tempo real uma referência operativa em termos destas variáveis discretas. O despacho de reativos foi formulado como um problema misto, e neste trabalho o problema foi tratado através de modelos mistos, onde a parte das variáveis inteiras foi resolvida por modelos baseados em Algoritmos Genéticos, Busca Local e Busca Tabu, e a resolução das variáveis reais foi através de um modelo de Fluxo de Potência Ótimo e de fluxo de carga não-linear. Mais especificamente, o objetivo deste trabalho é obter os ajustes dos “taps” dos transformadores para manter um perfil adequado nas tensões.

A presente dissertação está dividida em oito capítulos, onde o Capítulo I corresponde a este proêmio.

No Capítulo II, apresenta-se a Programação do Despacho de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica, descrevendo-se as principais fontes de geração e controle de reativos existentes no sistema, as características físicas e econômicas dos principais dispositivos de compensação de reativos utilizados na fase de planejamento. Apresentam-se também neste Capítulo, comentários referentes aos custos fixos e variáveis dos Investimentos em Fontes Reativas e também as condições que requerem o Planejamento de Reativos.

No Capítulo III são apresentadas as equações de Fluxo de Carga e a formu-

lação para problema de Fluxo de Potência Ótimo. Neste capítulo, através da resolução das equações de fluxo de carga é possível obter o estado de operação de uma dada rede de transmissão, o que as tornam uma ferramenta básica de avaliação da operação no sistema. Já os modelos de Fluxo de Potência Ótimo apresentam-se importantes para a determinação de uma solução otimizada do sistema de transmissão.

No Capítulo IV é apresentado os Algoritmos Genéticos, e no Capítulo V são apresentados as estratégias de Busca Local e Busca Tabu.

No Capítulo V faz-se a apresentação do modelo para o despacho de reativos. Ambos os modelos determinam o nível de geração de potência reativa e o valor dos “tap”s de transformadores. Primeiramente, o nível de geração de potência ativa é determinado através de um modelo de fluxo de potência ótimo. Posteriormente, considerando este dado valor para as variáveis discretas busca-se o melhor desempenho sob duas abordagens descritas a seguir. É apresentada uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo.

No Capítulo VI apresenta-se as metodologias para a resolução do problema de otimização despacho de reativos. Duas abordagens foram implementadas. A primeira utiliza uma Busca Local e a segunda é baseada em Busca Tabu. Em ambas as metodologias, o FPO foi substituído por um modelo de fluxo de potência não linear.

No Capítulo VII apresenta-se uma metodologia para a análise da operação reativa ao longo de um dia. Esta metodologia utiliza o modelo baseado em Busca Tabu apresentada no capítulo anterior.

No Capítulo VIII está as conclusões do trabalho.

Despacho de Reativo em Sistemas de Energia Elétrica

2.1 Planejamento da Operação

Uma área importante em sistemas de energia elétrica é o planejamento da operação. Tradicionalmente nesta área, o enfoque tem sido a geração de potência ativa, a qual é fortemente influenciada pela disponibilidade de recursos energéticos, principalmente em sistemas com predominância em geração hidrelétrica. Em virtude desses recursos serem variáveis ao longo do tempo e limitados, faz-se necessário o planejamento de sua utilização, o qual tem como objetivo definir uma estratégia de operação econômica e segura do sistema. Este planejamento deve ser dimensionado de forma a:

- (1) Considerar as variações sazonais destes recursos;
- (2) Atender à demanda de carga com critérios de garantia adequados;

- (3) Respeitar as restrições operacionais dos sistemas de geração hidrelétrico e termelétrico e de transmissão.

Devido à complexidade e à dimensão do problema é usual decompor o problema de planejamento em etapas, denominada de Cadeia de Planejamento.

Inicialmente é realizado o Planejamento de Longo Prazo, o qual considera a operação com um horizonte de vários anos à frente. Determina-se, nesta etapa, a proporção entre a geração hidráulica total e a geração térmica total ao longo do horizonte e o correspondente custo marginal. No caso brasileiro o horizonte de longo prazo considerado é em geral de cinco anos. Nesta etapa um aspecto de grande importância é a incerteza sobre as vazões afluentes futuras. A grande maioria das abordagens utiliza uma representação equivalente dos sistemas de geração, tanto dos sistemas hidrelétricos como do termelétrico.

A próxima etapa é o planejamento de médio prazo. Nesta etapa, os sistemas hidrelétricos e termelétricos têm a operação das suas unidades geradoras consideradas de maneira individualizada, relativo aos primeiros intervalos do planejamento de longo prazo. No Brasil, o horizonte de médio prazo é de alguns meses a um ano à frente. Usualmente, o primeiro mês é detalhado em semanas, enquanto que os meses subsequentes adotam discretização mensal. O objetivo desta etapa é determinar uma política de operação individualizada para cada unidade geradora.

O Planejamento de Curto Prazo é a etapa seguinte, a qual considera um horizonte de alguns dias à frente. Este planejamento, também conhecido como Programação da Operação ou também como Pré-Despacho, detalha ainda mais a operação das usinas, definindo para cada usina hidrelétrica uma programação das partidas e paradas das unidades geradoras, bem como os seus respectivos pontos de operação [4], [6], [7], [9], [20], [29], [34], [48], [49], [52], [53], [56]-[58], [61], [62], [68], [70]-[74]. Um outro aspecto importante nesta etapa são as restrições de operação do sistema de transmissão e as restrições de segurança. Estes aspectos são importantes, pois o planejamento de curto prazo deve garan-

tir o atendimento das restrições operativas, dado que a sua solução será uma referência para a operação em tempo real do sistema. Considerar todos estes aspectos em um só modelo torna o problema muito complexo, de modo que se adota uma representação do sistema de transmissão mais simplificada através de um modelo linear. Mesmo assim o problema é ainda bastante complexo devido às variáveis discretas. Em função desta simplificação na representação do sistema de transmissão, o aspecto da potência reativa fica indefinido.

Em termos de geração de potência e de outros recursos para o controle de tensão, uma área importante é de planejamento da expansão deste sistema [26], [33], [37], [40], [41], [43]-[47]. Uma outra área que surge em função da reestruturação da indústria de energia elétrica é a de serviços ancilares, mais especificamente na área de suporte de reativos [8], [54], [76]-[78].

2.2 Despacho e Pré-Despacho de Reativos

O Despacho de Reativos consiste em determinar os níveis de operação das fontes e controles reativos em sistemas de energia elétrica, considerando a operação em dado instante de tempo e em regime estacionário [1], [2], [3], [12], [13], [21], [27], [28], [30], [31], [35], [36], [42], [50], [51], [59], [64], [67], [69]. São diversas as fontes de reativos, bem como os seus controles, como serão brevemente descritos neste item.

A atividade de pré-despacho visa analisar as condições operativas do próximo dia, levando-se em conta as disponibilidades de equipamentos, os recursos energéticos e as necessidades do mercado. As necessidades de potência reativa variam com o tempo e devem ser adequadamente supridas, de forma a assegurar uma operação adequada em termos do controle do perfil de tensão. Esta análise do comportamento da potência reativa ao longo do dia será chamada de Pré-Despacho de Reativos (PDR) [15], [32] e será o tema desta tese de doutorado.

2.2.1 Fontes de Potência Reativa no Sistema de Energia Elétrica

O conjunto dos equipamentos que constitui um sistema de energia elétrica, geralmente é capaz de suprir toda a demanda ativa e reativa necessária para manter o sistema operando com economia e segurança.

O suprimento da demanda reativa necessária é feito pelas capacidades de geração de reativos das unidades geradoras, das linhas de transmissão de alta tensão e de outros equipamentos, bem como os bancos de capacitores e motores síncronos. Os transformadores com “taps” variáveis sob carga, apesar de não serem fontes geradoras de reativos, têm um importante papel no despacho reativo, na solução de problemas de violações de tensões.

2.2.1.1 Geradores Síncronos

Os geradores síncronos constituem a principal fonte de potência ativa nos sistemas de energia elétrica, e são também grandes fornecedores e consumidores de potência reativa. Suas capacidades de consumo/fornecimento estão vinculadas a limites físicos de projeto, tais como limites de capacidade térmica da máquina e a problemas dinâmicos de operação do sistema de energia elétrica, associados aos limites de estabilidade transitória. Uma importante característica dos geradores síncronos é sua capacidade de responder rapidamente a perturbações no sistema. Os geradores síncronos representam na maioria das vezes a principal reserva reativa disponível na operação do sistema que pode ser usada na ocorrência de um distúrbio que necessita de resposta rápida. Dado esse aspecto, no planejamento da operação o fornecimento de reativos dos geradores deve estar ajustado em níveis que proporcionem uma capacidade reativa de reserva, de modo que possam suprir o suporte reativo necessário na ocorrência de uma perturbação.

2.2.1.2 Linhas de transmissão de alta tensão

As linhas de transmissão de alta tensão são altamente capacitivas, o que as tomam elementos reativos normais, fornecendo capacidades reativas proporcionais ao quadrado das magnitudes das tensões das barras às quais estão ligadas. O efeito capacitivo dessas linhas é bastante benéfico para o sistema operando em condições de carga nominal ou pesada, uma vez que a linha se comporta como uma fonte distribuída para compensação de perdas reativas. Em condições de carga leve este efeito capacitivo pode causar problemas de sobretensões nos terminais das linhas.

Há casos de carregamento no sistema em que mesmo o efeito capacitivo das linhas não é suficiente para evitar problemas de baixas tensões. Esse problema poderia ser resolvido através da adição de uma nova linha que adicionaria capacitância ao sistema e reduziria as perdas reativas. Porém, do ponto de vista econômico é difícil de justificar a construção de uma nova linha, pois existem outras alternativas de compensação de reativos que podem resolver estes problemas a custos menores.

2.2.1.3 Transformadores com mudança de “tap” sob carga

Grande parte dos transformadores do sistema de energia elétrica tem incorporado dispositivos de controle de tensão. Posições de “tap” são pontos discretos sobre os enrolamentos de um transformador, o qual altera sua relação de transformação, permitindo que as tensões variem dentro de um certo intervalo. A alteração do valor eficaz da tensão permite o controle e a redistribuição do fluxo de potência reativa no sistema, melhorando o seu perfil de tensão.

A mudança de “tap” sob carga não representa fonte de reativos, mas seu uso apropriado, associado com outro dispositivo de regulação e controle de reativos, permite considerável flexibilidade em manter níveis de tensão adequados no sistema. A calibração dos “taps” existentes pode adiar a necessidade da instalação de novas fontes reativas, tornando a modelagem e o ajuste deste tipo de con-

trole essencial durante o procedimento tanto do planejamento como também do despacho de reativos.

Operacionalmente a mudança de “tap” pode ser manual ou automática respondendo a sinais de controle de tensão de uma conexão ou barra vizinha. A diferença entre o envio do sinal e a mudança efetiva do “tap” é de alguns minutos. Esse tempo de atuação enquadra o “tap” como um dispositivo de controle adequado para as regulações normais de tensão ou a alteração de tensão devido a distúrbios pequenos ou moderados, não permitindo seu uso para assegurar e manter a estabilidade do sistema durante um distúrbio.

2.2.1.4 Capacitores “shunt”

Os capacitores “shunt” são amplamente utilizados, podendo ser do tipo *fixo* ou do tipo *bancos*, que possibilitam combinações série/paralela para determinar a magnitude necessária da fonte em diferentes cenários, proporcionando maior flexibilidade na operação dos capacitores “shunt” existentes no sistema. Outras características desses equipamentos são a modularidade e a confiabilidade, já que não têm pontes móveis. O tempo necessário para instalar novas unidades é relativamente curto.

As principais limitações desse tipo de equipamento são relativas a:

- Tempo de resposta alto, impossibilitando-os de participarem da solução de problemas de estabilidade transitória.
- A compensação reativa proporcionada (MVA_r) é função das tensões de linhas nas barras onde os equipamentos estão instalados.

2.2.1.5 Indutores “shunt”

Os reatores “shunt” são utilizados em sistemas de energia elétrica com dois objetivos:

- Assegurar quedas de tensões de barras em estado estacionário;

- Compensar os efeitos dos reativos capacitivos das linhas longas de alta tensão durante período de carga leve, eliminando problemas de sobretensão. Podem ser do tipo fixo (uma única capacidade MVar) ou bancos que permitem um melhor ajuste da capacidade dependendo das condições de cargas do sistema. São, normalmente, conectados no sistema de dois modos:
- Conectados às linhas de transmissão. Não são chaveados e são partes do sistema de transmissão e seus valores considerados nos cálculos dos parâmetros das linhas onde estão inseridos. O chaveamento desses equipamentos causa problemas de surto de tensão de chaveamento;
- Conectados ao terciário de transformadores. Nesse modo de ligação os equipamentos são controlados por ação de chaveamentos automáticos.
- Os custos destes equipamentos são superiores aos dos capacitores “shunt”, variando de acordo com as magnitudes e dispositivos de comando e proteção. Para grandes capacidades (MVar os custos são elevados.

2.2.1.6 Compensadores Estáticos

Os compensadores estáticos são sistemas de compensação de reativos “shunt”, compostos de dispositivos de chaveamento convencionais e de estado sólido (eletrônico de potência), associado aos sistemas de controle que propiciam o ajuste rápido e refinado das compensações reativas necessárias para atender o sistema.

Algumas características dos compensadores devem ser consideradas no planejamento de reativos:

- Custos relativamente altos, da ordem de duas a três vezes o custo da operação “shunt” convencional;
- Geração de harmônicos, havendo necessidade de filtros e manutenção rigorosa;

- Necessidades de transformadores de acoplamento ou enrolamento terciário de outros transformadores por problemas de limitação de tensão;
- Tempo de resposta instantâneo;
- Fornecem potência reativa contínua e propiciam quando necessário o controle independente de fase.

Desta forma a aplicação de compensadores estáticos está limitada a situações onde se necessitam respostas dos equipamentos de compensação ou intervalo de compensação contínua ou ainda controle independente de fase.

2.2.1.7 Compensadores Síncronos

São máquinas síncronas ajustadas para gerar ou absorver grandes magnitudes de potência reativa (MVA_r), propiciando um intervalo contínuo de compensação. Fornecem respostas rápidas (um ou dois segundos) a desvios de tensão no sistema e são considerados elementos altamente estabilizantes. Durante um pequeno intervalo de tempo possui capacidade de sobrecargas, que podem ser utilizadas em situações críticas de operação.

Os compensadores síncronos têm custos de instalação, manutenção, dispositivos de controle e equipamentos de compensação substancialmente maiores que dos reatores e capacitores “shunt” com capacidade de compensação semelhante. As taxas de falhas destes equipamentos também, são maiores.

2.2.2 Modelos de Despacho de Reativos e Pré-Despacho de Reativos

Na literatura há vários modelos de despacho de reativos, mas a maioria não considera a questão das variáveis discreta. Liu [15] apresentou uma interessante proposta em que trata as variáveis discretas de maneira contínua, porém introduz funções que apresentam máximos locais nos valores discretos; o problema de

despacho de reativos é tratado via métodos de pontos interiores. Adibi [2] considera inicialmente as variáveis discretas de modo contínuo, e ao final aproxima ao valor discreto mais próximo.

Em relação aos modelos de pré-despacho de reativos, Deng propõe um modelo que considera a operação diária, no qual as variáveis discretas nos diferentes horários são determinadas de acordo a uma lista de prioridades, que dinamicamente são atualizados em função do estado do sistema. Hong também trata do problema de pré-despacho, mas formula-o como um problema de otimização mista e resolve-o através do método de decomposição de Benders.

2.3 Abordagem Proposta

Esta tese apresenta uma metodologia para o despacho de reativos e uma para o pré-despacho de reativos. O modelo de despacho trata o problema de despacho de reativo de uma forma estática (um único intervalo de tempo) e o modelo de pré-despacho reativos trata do despacho de reativo ao longo de um dia de operação. Estas abordagens supõem a existência de uma programação da operação de potência ativa, a qual determina para cada intervalo de tempo e para cada fonte geradora seu nível de geração de potência ativa. Em geral esta programação determina também uma escala de partida e parada de unidades geradoras. Assim, o foco da tese será sobre o despacho de reativos a cada intervalo de tempo, considerando como dada a geração de potência ativa (a menos da barra de referência). No modelo de pré-despacho serão considerados aspectos dinâmicos relativos aos despachos reativos.

Tanto o modelo de despacho quanto o modelo de pré-despacho adotaram uma abordagem híbrida combinando um modelo de fluxo de carga e uma metodologia heurística. As metodologias heurísticas implementadas foram baseada em Algoritmos Genéticos, Busca Local e Busca Tabu. Todas as metodologias foram testadas com o sistema IEEE30 barras.

CAPÍTULO 3

Fluxo de Carga e Fluxo de Potência Ótimo

3.1 Introdução

Um sistema de potência é constituído essencialmente de três partes: os centros geradores, os centros consumidores e, fazendo um elo entre estes dois centros, um sistema de transporte. Este último, por sua vez, se subdivide em outras três partes, que compreendem os sistemas de transmissão, sub-transmissão e distribuição. Em cada uma destas partes existem requisitos de operação dos equipamentos elétricos de tal forma a assegurar uma determinada qualidade no fornecimento de energia elétrica aos centros consumidores.

Os benefícios da interligação elétrica entre as regiões brasileiras são vários, entre os quais podem-se citar o desenvolvimento de regiões que por natureza não possuem mananciais para a construção de novas hidrelétricas e o aumento da confiabilidade do sistema. Associa-se a confiabilidade dos sistemas interligados a uma maior segurança de operação, onde os riscos no fornecimento de

energia elétrica são significativamente reduzidos, o que beneficia de modo direto a economia brasileira.

Neste capítulo são apresentadas as equações de fluxo de carga e a formulação para o problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO). Através da resolução das equações de fluxo de carga é possível obter o estado de operação de uma dada rede de transmissão para um dado despacho de geração e de demanda de carga. Nesse sentido é a ferramenta básica de avaliação da operação de um sistema de transmissão. Já os modelos de FPO são importantes para a determinação de uma solução otimizada do sistema de transmissão.

3.2 Equações de Fluxo de Carga

Para avaliar o impacto que um determinado despacho de geração tem sobre o sistema de transmissão é necessário calcular o correspondente estado da rede de transmissão. Para calcular o estado da rede é preciso resolver as equações de fluxo de carga, equações estas que modelam a operação da rede elétrica. A rede elétrica é composta de um conjunto de equipamentos, tais como geradores, linhas de transmissão, transformadores e bancos de capacitores. Estes elementos são interligados entre si formando a rede que conecta os geradores aos consumidores. Os pontos de conexão são conhecidos como nós, barras ou barramentos, e a cada nó i está associado uma tensão (V_i), um ângulo de fase (θ_i), uma injeção de potência ativa (P_i) e uma injeção de potência reativa (Q_i). O modelo mais usual para as linhas de transmissão e transformadores é o modelo π e também será adotada nesta tese. O modelo representa cada linha ou transformador que interliga os nós i e j por uma resistência série r_{ij} , uma reatância série x_{ij} , e uma susceptância shunt b_{ij}^{sh} . Em função destes parâmetros é possível calcular a condutância série g_{ij} e a susceptância série b_{ij} , respectivamente por

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}, \quad (3.1)$$

$$b_{ij} = \frac{-x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}. \quad (3.2)$$

Usualmente, dos quatro parâmetros associados ao nó i (V_i , θ_i , P_i , Q_i), dois são conhecidos e os outros dois devem ser calculados de forma a atender as equações (3.1) e (3.2). Por exemplo, nos geradores são fixadas a geração de potência ativa P_i e a magnitude de tensão V_i . Por isso estes são denominados barras PV . Já nos barramentos de carga são fixadas as demandas de potências ativas e reativas e por isso são denominadas barras PQ . Para cada nó i há duas equações, uma para cada tipo de injeção de potência e apresentadas a seguir. Estas são conhecidas como as equações de fluxo de carga.

$$P_k = V_k \sum V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}), \quad (3.3)$$

$$Q_k = V_k \sum V_m (g_{km} \sin \theta_{km} + b_{km} \cos \theta_{km}). \quad (3.4)$$

Genericamente, o conjunto de todas as equações de fluxo de carga para todos os nós da rede será representado como

$$g(x) = 0. \quad (3.5)$$

3.3 Despacho Econômico

O interesse de operar os sistemas elétricos obedecendo a critérios econômicos vem desde a década de 1920, quando se iniciou a expansão dos sistemas elétricos. O problema do despacho econômico visa alocar economicamente a carga entre as unidades geradoras com custos e características diferentes, de modo a atender a demanda global do sistema ao menor custo total. No início dos anos 30, foi demonstrado que a solução mais econômica era operar todas as unidades geradoras ao mesmo custo marginal. Esta solução é obtida resolvendo-se o seguinte problema:

$$\min \sum_{i=1}^n c_i (p_{g_i}) \quad (3.6)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^n p_{g_i} = p_d \quad (\lambda) \quad (3.7)$$

onde:

- $c_i(\cdot)$ - função de custo do gerador i ;
- p_{g_i} - geração de potência ativa no gerador i ;
- p_d - demanda total do sistema;
- n - número de unidades geradoras;
- λ - multiplicador de Lagrange.

A função Lagrangeana de (3.6)-(3.7) é dada por:

$$L = \sum_{i=1}^n [c_i(p_{g_i}) - \lambda p_i] + \lambda p_d. \quad (3.8)$$

Supondo que os custos de geração são dados por funções convexas, a solução ótima do problema será dada pelas condições de estacionaridade da função lagrangeana

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial c_i(p_i)}{\partial p_i} - \lambda = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^n p_i - d. \quad (3.10)$$

A condição (3.9) impõe que no despacho ótimo todas as unidades geradoras devem operar com o mesmo custo marginal (derivada da função custo). A segunda condição (3.10) assegura o atendimento da demanda global do sistema. O multiplicador de Lagrange λ , é denominado o custo marginal de operação do sistema.

Esta é a formulação mais simplificada, o qual considera apenas o atendimento da demanda global, não sendo representadas as restrições dos sistemas de geração e transmissão e nem as perdas elétricas. Posteriormente, o modelo foi aprimorado com a introdução dos limites de geração das unidades e das perdas

elétricas (aproximadas). Isto altera a solução do problema, pois com a introdução das perdas, as unidades eletricamente mais distantes dos centros de carga são penalizadas devido às suas perdas de transmissão. Mas, mesmo com estes aprimoramentos, estes modelos não asseguram uma solução eletricamente viável. Somente na década de 60, o problema de despacho econômico foi outra vez aperfeiçoado com a introdução da representação da rede elétrica através das equações de fluxo de carga, resultando no modelo de conhecido como Fluxo de Potência Ótimo (FPO), o qual é formulado matematicamente na seção seguinte.

3.4 Fluxo de Potência Ótimo

O FPO é um termo genérico que envolve uma grande classe de problemas nos quais se busca otimizar uma função específica, satisfazendo restrições que são regidas por particularidades operacionais e físicas da rede elétrica [5], [10], [11], [14], [16], [17], [38], [39], [55], [65], [66]. Ele pode ser modelado como o seguinte problema de otimização não linear:

$$\min_x f(x) \tag{3.11}$$

sujeito a

$$g(x) = 0 \quad (\lambda) \tag{3.12}$$

$$h(x) \leq 0 \quad (\gamma) \tag{3.13}$$

onde:

$$\left\{ \begin{array}{l} x \in \mathbb{R}^n; \\ f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}; \\ g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, \quad m \leq n; \\ h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p; \\ f, g, h \in C^2. \end{array} \right.$$

O vetor de variáveis x pode ser dividido em variáveis de controle u e variáveis dependentes y . As variáveis de controle incluem geração de potência ativa e

reativa, magnitude de tensão nas barras de geração, compensação síncrona, tap de transformador, e admitância shunt que pode ser um capacitor ou indutor. As variáveis dependentes incluem ângulo de tensão, magnitude de tensão em barras de carga e fluxo nas linhas de transmissão.

A função objetivo (3.11) representa o critério de desempenho da operação do sistema, e diversas funções podem ser adotadas tais como custo de geração, perdas ativas no sistema de transmissão, desvios de tensão ou de geração a partir de um valor pré-estabelecido, ou uma combinação desses critérios.

As restrições de igualdade (3.12) representam as equações de balanço de potência em cada barra (equações de fluxo de carga) enquanto que as restrições de desigualdade (3.13) representam restrições funcionais tais como, limite de fluxo de potência nas linhas, limites de potência ativa e reativa em barras de geração e os limites operacionais sobre o vetor \mathbf{x} .

A formulação (3.11)-(3.13) é a mais precisa para uma rede estática, porém necessita de metodologias mais sofisticadas do que o despacho econômico e requer um maior esforço computacional para a sua resolução. Uma abordagem mais simplificada pode ser obtida, através da linearização das restrições de igualdade (3.12), resultando no modelo de fluxo de carga DC. Este modelo representa com boa aproximação para redes de extra-alta tensão a operação da parte relativa à potência ativa do sistema de transmissão.

As variáveis e restrições do FPO podem ainda ser divididas em ativas e reativas. A consideração de apenas uma parcela dessas variáveis e restrições dá origem aos problemas de FPO ativo e FPO reativo, de forma semelhante aos modelos desacoplados aplicados nas equações do fluxo de carga.

3.5 Despacho Ótimo de Reativos

O Despacho Ótimo de Reativos em sistema de energia elétrica é um subproblema do Fluxo de Potência Ótimo, e este representa com mais detalhes aspectos com

maior influência sobre a parte de potência reativa da rede, tais como os ajustes dos dispositivos de controle das magnitudes das tensões existentes no sistema (banco de capacitores e reatores, tap's de transformadores, capacidades próprias de geração de reativos dos geradores, compensadores síncronos e estáticos. O objetivo deste despacho é obter um perfil adequado das magnitudes das tensões em todas as barras do sistema e a atender as restrições operacionais do sistema de potência.

Na Otimização de Despacho de Reativos, os modelos matemáticos utilizados envolvem dificuldades como não-linearidades e não-convexidades, milhares de restrições, variáveis discretas, etc. . . ; o que ocasiona dificuldades na obtenção de suas soluções, tornando-se um tema que tem sido abordado por vários pesquisadores. São encontrados na literatura diferentes métodos para solução do problema, que utilizam técnicas de programação não-linear - Método do Gradiente Reduzido, Método das Penalidades e das Barreiras Logarítmicas, Programação Quadrática Seqüencial, Programação Linear - Programação Linear Sucessiva, Sistemas Especialistas e Métodos de Busca Estatística. No entanto, todos esses métodos apresentam vantagens e desvantagens em termos de eficiência computacional e de flexibilidade no tratamento dos aspectos operacionais do problema.

Algoritmos Genéticos

Neste Capítulo apresenta-se o método baseado em Algoritmos Genéticos na solução de problemas de otimização. A resolução de problemas de otimização via métodos exatos requer algumas condições, tais como convexidade e continuidade das funções. Os problemas envolvendo variáveis discretas não satisfaz estas condições, daí a sua dificuldade de tratamento via métodos de otimização contínua. Para estes tipos de problemas, as alternativas mais promissoras são os métodos heurísticos, que não asseguram a solução ótima, mas determinam soluções de boa qualidade. Nesta tese foram implementadas e testadas duas metodologias heurísticas, uma utilizando Algoritmos Genéticos e a segunda baseada em Busca Tabu.

4.1 Algoritmos Genéticos

Os *Algoritmos Genéticos* são métodos de busca baseados em princípios de seleção natural [24], [60][63]. Esta metodologia trabalha com gerações de indivíduos, cada indivíduo simulando uma possível solução do problema. A idéia é que os

indivíduos mais adaptados ao meio tendem a gerar descendentes que herdam estas características, evoluindo desta forma as espécies. Os Algoritmos Genéticos identificam a cada geração os indivíduos mais adaptados, e através deste procedimento busca melhorar o desempenho das soluções potenciais.

Originalmente o *Algoritmo Genético* foi proposto por Holland, e a partir deste algoritmo básico muitas variações têm sido apresentadas. Os *Algoritmos Genéticos* têm se apresentado como técnicas de otimização robusta. Os mecanismos que estes algoritmos utilizam para buscar as melhores soluções para os problemas, são baseados na genética e na evolução natural. Na natureza os indivíduos melhores dotados, ou seja, indivíduos que possuem um conteúdo genético de melhor qualidade, têm maior capacidade de sobrevivência, mesmo quando os recursos se tomam escassos ou mudam o meio ambiente. Holland visava desenvolver sistemas computacionais adaptando os importantes mecanismos realizados em sistemas naturais. Muitos outros pesquisadores, tais como Goldberg, DeJong, Grefenstette, Davis, Muhlenbern e outros, estimularam o crescimento dos *Algoritmos Genéticos*.

Algoritmos Genéticos são técnicas de busca estatística baseadas nos mecanismos de evolução das espécies biológicas, consistindo em seleção natural, cruzamento e mutação. Este processo é controlado manipulando-se as taxas de cruzamento e mutação, e o número de gerações. A seleção escolhe de cada geração os indivíduos mais adaptados; a operação de cruzamento consiste em gerar um novo indivíduo que combina as informações genéticas de dois pais selecionados; e a mutação consiste na alteração genética de um dado indivíduo. Similarmente ao processo de evolução natural, no qual há uma transmissão da herança genética para as novas gerações, os Algoritmos Genéticos buscam também evoluir os melhores indivíduos (as melhores soluções).

Os *Algoritmos Genéticos* trabalham com representações codificadas das soluções, equivalente ao material genético dos indivíduos na natureza. Para que o Algoritmo Genético represente adequadamente uma configuração do problema, deve-se optar por uma codificação adequada às características do problema. Originalmente foi muito utilizada a codificação binária, pois nesta codificação é fácil

de implementar os operadores de recombinação e mutação, e também porque nesta codificação existem provas de convergência que justificam matematicamente o *Algoritmo Genético*. Neste trabalho, para a codificação das variáveis discretas optou-se pelo sistema de base decimal no problema de pré-despacho de reativos.

Em problemas de otimização deve-se encontrar uma forma adequada para avaliar a função objetivo ou o seu equivalente. Assim, identificam-se as soluções (indivíduos) de melhor qualidade como sendo aquelas que apresentam os melhores valores para uma dada função objetivo. Esta função objetivo em *Algoritmos Genéticos* é conhecido como função de aptidão e reflete quão boa é uma dada solução, comparada com outras soluções na população. Quanto melhor o valor da aptidão de um indivíduo, maiores são as chances de sua sobrevivência e reprodução na geração subsequente. A existência de uma estratégia de seleção das configurações que tem direito a participar na formação das configurações da nova geração, é de suma importância. Em todos esses mecanismos, há a necessidade de serem definidos alguns parâmetros, tais como: o tamanho da população, uma estratégia para gerar a população inicial e um critério de parada.

Os *Algoritmos Genéticos* são aplicados em diversas áreas: Composição musical, tecnologia VLSI (“Very Large Scale Integrated”), estratégia para definir programas de planejamento. Eles são particularmente apropriados para resolver problemas de otimização complexos e de difícil tratamento através de métodos de otimização exata.

4.1.1 Componentes e estrutura de um AGS

A estrutura geral de um *Algoritmo Genético Simples* deverá ter definida a população inicial bem como o seu mecanismo de codificação, os parâmetros de controle a serem utilizados, a avaliação da função de aptidão, o mecanismo de seleção, os operadores genéticos (recombinação e mutação) e o critério de parada. Os Algoritmos Genéticos são muito sensíveis a estes parâmetros. Um Algoritmo

Genético opera através dos seguintes estágios:

- (a) Gerar uma população inicial após escolher a forma de codificação;
- (b) Calcular a função objetivo de cada indivíduo e armazenar a incumbente (melhor indivíduo);
- (c) Implementar a seleção dos “pais”;
- (d) Implementar as recombinações e mutações e gerar a nova população;
- (e) Se o critério de parada for satisfeito, páre; caso contrário voltar para (b).

Os passos de (b) até (e) formam o que chamamos de Ciclo Geracional do *Algoritmo Genético*. A seguir uma descrição específica dos componentes de um algoritmo genético é apresentada.

Codificação

A Codificação é a representação do problema. Os modelos de otimização visam apoiar um processo de tomada de decisão, quando em geral é selecionada uma dada alternativa dentre um conjunto de possíveis ações. Matematicamente, as possíveis alternativas são representadas através de variáveis, também denominadas variáveis de decisão, uma para cada alternativa, e o processo de otimização determina os seus valores, de modo a atender os requisitos do problema e apresentar o melhor valor em termos de um critério de otimização. A aplicação de Algoritmos Genéticos para tratar de problemas de otimização segue esta mesma linha, na qual cada indivíduo representa uma possível solução para o problema de otimização. O mais usual é representar um indivíduo através de um vetor ou string, no qual cada posição deste vetor representa cada uma das variáveis de decisão do problema. Assim, todos os indivíduos tem a mesma estrutura, mas com valores específicos em cada posição de seu vetor.

Função Aptidão

Uma vez definida a codificação que será utilizada, deve-se ter disponível uma estratégia para calcular a função objetivo para cada indivíduo da população. A função objetivo, a função a ser otimizada, fornece o mecanismo para a avaliação de cada indivíduo. O parâmetro que identifica a qualidade de uma configuração, que pode ser a própria função objetivo ou uma equivalente, mais adequada para o *Algoritmo Genético*, é chamada de função Aptidão, “*fitness function*”. A partir dos valores do vetor representativo de cada indivíduo, é possível verificar se este satisfaz os requisitos do problema e é possível também calcular o seu desempenho em termos do critério de otimização, sendo o indivíduo mais bem adaptado ao meio aquele que apresentar o melhor desempenho em termos deste critério de otimização.

Seleção

Na natureza, o mecanismo de seleção privilegia a sobrevivência do ser mais adaptado. Da mesma forma, em problemas que utilizam *Algoritmos Genéticos*, as soluções mais adaptadas sobrevivem, enquanto que as mais fracas perecem.

No Algoritmo Genético desenvolvido para problemas de maximização, um “*string*” com um valor de aptidão maior é considerado bem adaptado e, portanto, tem maiores chances de sobreviver e de gerar um maior número de descendentes; no caso de problemas de minimização, o indivíduo mais bem adaptado é aquele que apresentar o menor valor na função de aptidão. O processo de seleção dos “pais” da próxima geração mais utilizado em algoritmo genético é denominado “*Roulette Wheel*”. Neste processo, cada indivíduo que compõe a população recebe uma probabilidade diretamente proporcional ao valor de seu fitness, de modo que o *Roulette Wheel* permite que o indivíduo com maior valor de *fitness* tenha maior probabilidade de escolhido para sobreviver ou gerar descendentes.

Algumas falhas podem ser observadas na seleção por *Roulette Wheel*, dentre elas podemos destacar a perda do melhor indivíduo durante o processo evolu-

tivo, pois a probabilidade do melhor indivíduo ser selecionado não é igual a 1. Uma maneira alternativa seria considerar como solução final o melhor indivíduo encontrado durante todo o processo de evolução do algoritmo, porém esta alternativa não permite que o melhor indivíduo contribua com seu código genético para a produção de descendentes para as gerações posteriores. Assim, uma outra opção consiste em manter sempre o melhor indivíduo na próxima geração. Tal estratégia é conhecida como seleção salvacionista ou elitista.

Outra característica do *Roulette Wheel* é que este mecanismo de seleção quando usado para solucionar problemas de otimização, onde a função de *fitness* é a própria função objetivo, a priori somente pode ser usado para problemas de maximização. Se o problema de otimização é de minimização, devemos transformar em problema de maximização, da seguinte maneira:

$$\min f(x) = \max \{-f(x)\}.$$

Entretanto, os valores assumidos pela função objetivo f devem ser positivos, caso contrário devemos adicionar uma constante positiva K ou então utilizar *scaling mechanism* (Michalewicz, 1996).

Um outro mecanismo de seleção muito utilizado é a seleção baseada em rank. Este critério inicialmente faz uma ordenação dos indivíduos de acordo com o *fitness* e utiliza as posições dos indivíduos após tal ordenação para definir os valores de probabilidade de seleção, usando mapeamentos lineares e não lineares para estabelecer tal probabilidade.

Manipulação

O processo de manipulação utiliza os operadores genéticos para produzir uma nova população de indivíduos (descendentes) através da manipulação da “informação genética” denominada como genes, atribuídos aos pais da população atual. Ela compreende a duas operações: *recombinação* e *mutação*.

Cruzamento: Uma vez selecionados os indivíduos “pais”, deve-se tomar os pares de acasalamento e realizar a recombinação, uma operação crucial nos Algoritmos Genéticos. Pares de *strings* são “trocados” aleatoriamente dentre os elementos da população que estão sujeitos à recombinação. Na recombinação, um par de indivíduos mistura os seus conteúdos genéticos e forma dois descendentes. Existem três técnicas básicas de recombinações: recombinações de um simples ponto, recombinações de dois pontos e recombinação uniforme. Na recombinação de dois pontos, são selecionados dois pontos aleatoriamente, P_1 e P_2 . Assim, dois “*strings*” selecionados trocarão o conteúdo das posições que vão desde P_1 até P_2 . No outro tipo de recombinação, o uniforme, cada bit dos “*strings*” selecionados para recombinação é confrontado, isto é, tem probabilidades iguais de recombinação. Os Algoritmos Genéticos utilizam a técnica de recombinação de um único ponto (*single point crossover*). Primeiro decide-se pela recombinação sorteando um número no intervalo 0 e 1. Se o número sorteado for maior ou igual a taxa de recombinação (txcr), então ocorrerá recombinação. Caso contrário o “*string*” permanecerá inalterado. Portanto, nem sempre a recombinação é efetuada. Na literatura que trata do tema *Algoritmos Genéticos*, o termo taxa de recombinação é também utilizado para denotar a probabilidade de recombinação. Assim, a taxa de recombinação é que controla a probabilidade da recombinação. Exemplificando, considere dois indivíduos como candidatos, que possuam k elementos. Sorteia-se um número aleatório no intervalo 1 e $(k - 1)$. Todos os números neste intervalo têm a mesma probabilidade de serem sorteados. Este número sorteado é denominado **ponto de cruzamento**. Uma vez escolhido o ponto de recombinação, assinalam-se nas duas configurações candidatas, fazendo-se então a recombinação, que é a permutação da parcela à direita ou à esquerda deste ponto de uma configuração, pela parcela à direita ou à esquerda da outra gerando as duas novas configurações. Assim, a operação da recombinação é semelhante ao realizado na natureza, onde os indivíduos possuem cromossomos e trocam parte das informações genéticas de dois deles, para produzirem um novo indivíduo. Finalizando, o *Algoritmo Genético* permuta

parte de suas configurações produzindo seus descendentes. Portanto, para implementar a recombinação, deve-se fazer o seguinte:

- (a) Escolher as duas configurações candidatas a recombinação;
- (b) Gerar um número aleatório p no intervalo $[0 - 1]$;
- (c) Se $p \geq$ taxa de recombinação, efetua-se a recombinação. Caso contrário, passar as duas configurações para a fase da mutação.

A Figura 4.1 mostra que após o ponto de recombinação ter sido aleatoriamente escolhido, partes dos “strings” P1 e P2 são permutadas para produzir novos “strings” (descendentes) 01 e 02. Nesta Figura a operação de recombinação é aplicada para o 50 e 60 elementos do “string”.

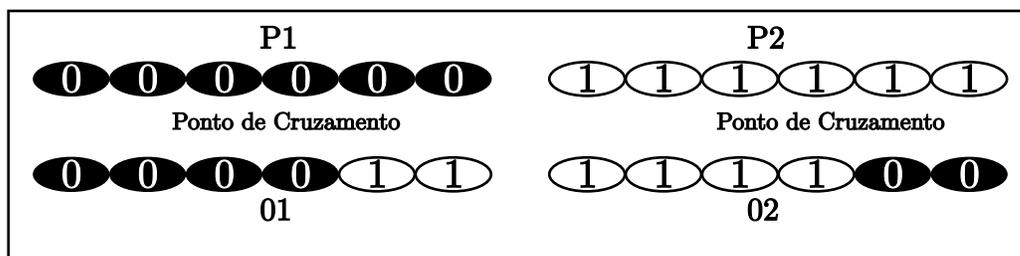


FIGURA 4.1: Cruzamento.

Mutação: Depois da recombinação, os “strings” estão sujeitos à mutação. Ao contrário da recombinação, a mutação depende do tipo de codificação escolhida. Para a codificação binária a mutação de um bit consiste em transformar o valor de uma posição de 0 para 1 ou vice-versa. Entretanto, para uma codificação do tipo inteira, operadores de mutação especiais devem ser elaborados de modo a não produzir cromossomos inválidos.

A mutação exerce uma influência especial no Algoritmo Genético, pois dificulta a prematura convergência para um mínimo local. A necessidade da mutação decresce na fase final do procedimento quando as populações tornam-se mais homogêneas e dominadas pelos genes mais eficientes. A mutação introduz

mudança nas variáveis explorando novas zonas no campo da Otimização. Na maioria das pesquisas sobre Algoritmo Genético, a mutação é considerada um operador secundário. A taxa de mutação fornece a probabilidade que um bit ser mutado. Os Algoritmos Genéticos Simples tratam a mutação somente como um operador secundário, uma regra para a recuperação de material genético perdido. A Figura 4.2 mostra o operador mutação aplicando para o 4º elemento da *string*.

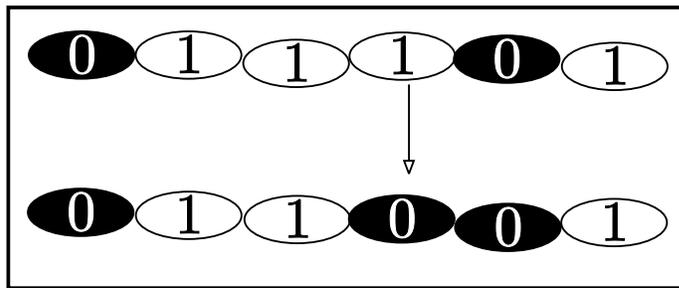


FIGURA 4.2: Mutação.

Os descendentes produzidos pelo processo de manipulação genética constituem a próxima população a ser avaliada. Os AGS podem substituir uma população inteira (abordagem geracional) ou apenas seus membros menos adaptados (abordagem estado-fixa).

O ciclo *criação - avaliação - seleção - manipulação* se repete até que uma solução satisfatória para o problema seja encontrada ou algum outro critério de parada para o algoritmo seja atendido.

As implementações levam em conta um número de parâmetros dependentes do problema, tais como tamanho da população, taxas de recombinação e de mutação, e critérios de convergência. Os Algoritmos Genéticos são muito sensíveis a estes parâmetros. Um grupo diferente de operadores genéticos tem sido introduzido, desde que Holland propôs este modelo básico. Estes operadores genéticos são, em geral, versões de recombinação e processos de alteração genética adaptados aos requisitos de problemas particulares ou a tentativas de simular processos genéticos menos frequentes presentes na seleção natural. Exemplos

de outros operadores genéticos são inversão, dominância e recombinação da margem genética.

4.2 Ciclo Geracional

É o processo de seleção, recombinação, mutação que permitem encontrar os indivíduos da nova geração a partir da população corrente. O ciclo geracional é realizado com base no Programa de Controle do Algoritmo Genético, que é um conjunto de parâmetros que definem o tamanho da população, a taxa de recombinação e a taxa de mutação; variando de caso a caso, e em grande medida define a qualidade do algoritmo. Valores típicos considerados são:

Número de gerações:	Ngera [30 200]
Taxa de recombinação:	txcr [0,5 1,0]
Taxa de mutação:	txcm [0,5 1,0]

TABELA 4.1: Valores típicos considerados no Programa de Controle do Algoritmo Genético

4.3 Critério de Parada

Existem vários critérios de parada do algoritmo genético. Pode-se adotar como critério de parada a pesquisa de um número determinado de gerações; ou quando a solução incumbente encontrou um valor especificado, ou ainda quando os indivíduos da população ficarem muito homogêneas, ou a combinação de dois ou mais destes critérios. Além disso, pode-se considerar outros critérios não estabelecidos aqui, porém de acordo com a característica do problema a ser resolvido.

4.4 Problemas Críticos

Um problema comum é quando alguns indivíduos da nova geração são inactíveis. Existem duas formas de contornar isso:

- Usar uma heurística (preferencialmente) construtiva para transformar essas configurações candidatas inactíveis em factíveis. Assim, nessa estratégia são aceitas somente configurações factíveis e se aparece uma configuração candidata inactível deve-se transformá-la em factível. Essa estratégia tem o trabalho adicional de gerar um procedimento para gerar soluções factíveis.
- Penalizar as inactibilidades na função de aptidão. Nessa estratégia todas as configurações são consideradas “factíveis”, mas aquelas que realmente são inactíveis são penalizadas na função objetivo para transformar essas configurações pouco atrativas. A própria dinâmica do processo, elimina sistematicamente aquelas configurações com uma inactibilidade significativa.

CAPÍTULO 5

Busca Tabu

Neste Capítulo apresenta-se os métodos baseados em Busca Tabu. Este também é um método heurístico, mas com uma estratégia de busca diferente dos Algoritmos Genéticos.

5.1 Busca Tabu

Busca Tabu (BT) foi desenvolvido originalmente como parte do campo da Inteligência Artificial [6], [19], [22], [23]. BT é basicamente uma metodologia de busca, baseado na premissa de que a resolução de um problema pode ser mais eficiente se o processo incorpora uma **memória adaptativa** e uma **exploração sensível**. O uso de **memória adaptativa** contrasta com as técnicas sem memória como *Simulated Annealing* (SA) e o *Algoritmo Genético* (AG), e com as técnicas de memória rígida, como as técnicas de inteligência artificial e de *branch and bound*. De igual maneira, a idéia de **exploração sensível** em BT é inspirada na suposição de que uma escolha ruim realizada por uma estratégia pode produzir mais

informação que uma boa escolha aleatória, como é o caso do SA que faz escolhas aleatórias. Assim, se a estratégia que guia um algoritmo que usa memória faz uma escolha ruim (passa por uma configuração de baixa qualidade), então pode-se aproveitar essa informação para evitar voltar a visitar essa configuração (ruim) e, ainda melhor, pode-se modificar (melhorar) a própria estratégia que guia o processo de busca.

A heurística Busca Tabu (BT) é relativamente recente, teve origem em meados da década de 1970, principalmente nos trabalhos desenvolvidos por Glover, e de lá para cá esta tem sido uma área muito fértil em pesquisa e desenvolvimento. A seguir é apresentada resumidamente os principais aspectos da metodologia de BT.

5.2 Técnicas de Busca

A palavra “tabu” sugere algo proibido, ou pelo menos inibido. A heurística Busca Tabu emprega restrições tabu para inibirem certos movimentos e alguns procedimentos denominados critérios de aspiração são utilizados para decidir quando movimentos classificados como tabu podem ser executados. Desta forma, a Busca Tabu conduz a busca para áreas ainda não analisadas do espaço de soluções, tendendo a evitar a convergência para um ótimo local. As restrições tabu são geralmente controladas por uma lista que memoriza os últimos movimentos executados. O tempo que um movimento deve permanecer nesta lista, em geral, está relacionado com o número de iterações do algoritmo e com o número de movimentos possíveis a partir da solução candidata atual (solução que está sendo analisada). A implementação de um algoritmo de BT envolve decisão de como os movimentos (geração de novas soluções) são realizados, a definição dos critérios de aspiração e como é feito o gerenciamento da memória dos movimentos, além de outros detalhes e técnicas que são brevemente discutidas a seguir.

5.2.1 Busca Local

Na busca local a partir de uma configuração x (solução) define-se uma vizinhança de x como sendo o conjunto de todas as configurações $x' \in N(x)$ que podem ser obtidas pela aplicação de um mecanismo de transição a partir de x . A estrutura de vizinhança define as condições para que x' seja vizinho de x . A Busca Tabu pode ser convenientemente caracterizada como sendo uma busca através de soluções vizinhas.

Isto quer dizer que no **algoritmo de busca local**, a partir da configuração corrente, passa-se para a configuração vizinha que apresenta uma maior diminuição da função objetivo. Um procedimento repetitivo desta estratégia leva o algoritmo de busca local a parar no momento em que não existe nenhuma configuração vizinha que produza uma diminuição da função objetivo, o que significa que foi encontrado um ótimo local.

BT é diferente de um algoritmo de busca local em dois aspectos fundamentais:

- (1) A partir da configuração corrente, passa-se à melhor configuração vizinha ou à menos pior que implica que é permitida uma degradação da qualidade da função objetivo.
- (2) O conjunto de vizinhos de x não se caracteriza de maneira estática. Assim, BT define uma nova estrutura de vizinhança, $N^*(x)$ que varia dinamicamente em estrutura e tamanho durante todo o processo de otimização. Esta estratégia permite a BT realizar uma busca eficiente e inteligente. A Figura 5.3 mostra uma relação entre $N(x)$ e $N^*(x)$.

Os elementos de $N^*(x)$ são determinados de várias formas. Como ilustração, pode-se indicar as seguintes formas:

- (i) Usando uma lista tabu que armazena atributos de configurações consideradas tabu (proibidas). Neste caso $N^*(x) \subset N(x)$, pois alguns vizinhos definidos pela estrutura de vizinhança e cujos atributos fazem parte da

lista tabu estão proibidos. Esta estratégia evita retomar as configurações já visitadas e evita a chamada ciclagem.

- (ii) Usando estratégias para diminuir a vizinhança ou a lista de configurações candidatas. Considerando que o número de configurações $x' \in N(x)$ pode ser muito grande, avaliar a função objetivo de todas essas configurações para encontrar aquela que apresenta o melhor desempenho requererá elevado esforço computacional. BT contempla métodos diferentes para encontrar uma vizinhança de tamanho reduzido tal que $N^*(x) \subset N(x)$. Esta estratégia visa diminuir o esforço computacional necessário em cada transição.

5.3 Estratégia da Busca Tabu

Apresenta-se a seguir, as principais estratégias de BT: **Memória de Curto Prazo** e **Memória de Longo Prazo**.

5.3.1 Memória de Curto Prazo e seus Principais Elementos

Um algoritmo BT pode ser implementado simplesmente usando a estratégia de curto prazo e muitas das pesquisas iniciais foram implementadas desta forma. A memória de curto prazo usa basicamente a informação de atributos de configurações que foram modificados no passado recente.

Esta informação é conhecida como memória baseada em fatos recentes. A idéia desta estratégia é considerar todos os atributos selecionados no passado recente como sendo proibidos, portanto, todas as configurações candidatas que possuem algum dos atributos proibidos (tabu-ativos) são excluídas na conformação do conjunto $N^*(x) \subset N(x)$ de configurações vizinhas para avaliação.

A idéia básica da memória baseada em recência é evitar revisitar configurações já testadas e aquelas configurações que possuem os atributos tabu-ativos.

Esta última parte pode representar um problema, pois podem ser eliminadas de $N^*(x)$ configurações muito atrativas. O critério de aspiração contorna em parte esta limitação.

A Figura 5.3 mostra uma iteração do algoritmo BT que usa memória de curto prazo sendo que uma iteração significa que, a partir da configuração corrente, devem-se avaliar todas as configurações candidatas $x' \in N^*(x)$ e escolher a melhor como sendo a nova configuração corrente.

Na parte **A** da Figura 5.3 são geradas todas as configurações candidatas $x' \in N(x)$. Na parte **B** é acionada a lista tabu. Podem ser criadas uma ou várias listas tabu dependendo do tipo do problema e do nível de sofisticação do algoritmo. A lista tabu pode ser operada de duas formas: 1) uma implementação contínua que não elimina automaticamente uma configuração candidata que possui atributos proibidos; assim configurações deste tipo são penalizadas na função objetivo (ou seu equivalente) em **C** para que se tornem pouco atrativas, e 2) uma implementação discreta em que toda configuração com atributos proibidos é eliminada automaticamente. Neste último caso, deve-se eliminar o bloco **D** e da saída de voltar diretamente ao bloco **A**. O número k de iterações que um atributo permanece proibido chamado de status tabu e o tamanho de k podem variar em cada lista e durante o processo, produzindo algoritmos BT com diferentes tipos de desempenho.

5.3.2 Critérios de Aspiração

Os critérios de aspiração são introduzidos em Busca Tabu para determinar quando uma restrição tabu pode ser quebrada. Ou seja, a restrição é ignorada e o movimento, mesmo classificado como proibido, é executado. Um critério de aspiração bastante utilizado é o de ignorar a restrição tabu sempre que a solução formada por um determinado movimento proibido for melhor que a melhor solução encontrada até o momento. A aplicação adequada desses procedimentos é fundamental para se atingir altos níveis de performance em Busca Tabu.

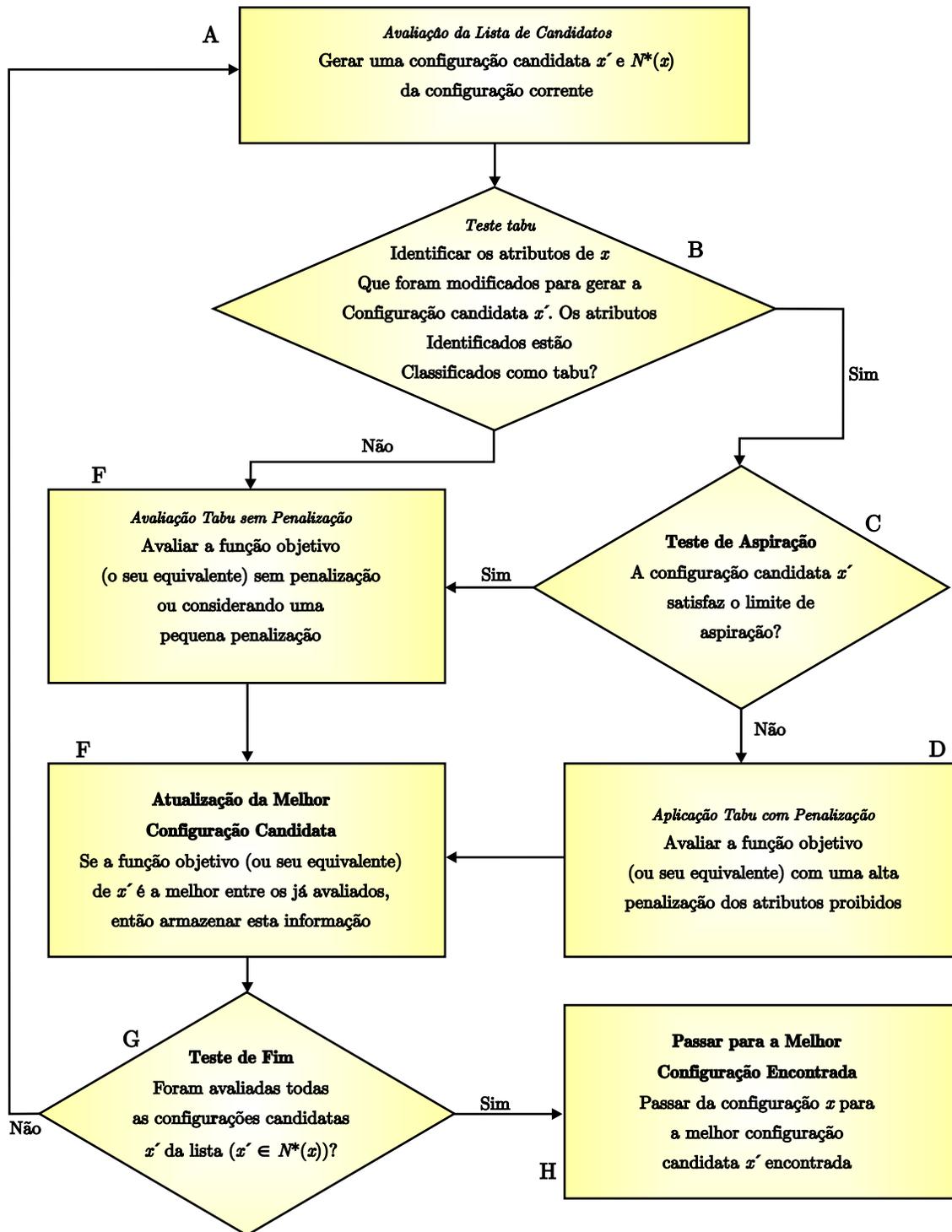


FIGURA 5.1: Execução de um movimento BT com memória de curto prazo.

O critério de aspiração é implementado no bloco **C** cuja finalidade é fornecer maior flexibilidade ao processo. Neste caso, uma configuração que possui atributo(s) proibido(s) pode ter a proibição descartada se essa configuração satisfaz um critério de aspiração. Na verdade aqui se tenta contornar a “rigidez” da lista tabu que armazena atributos proibidos. Uma configuração candidata de excelente qualidade pode ter um atributo proibido porque comparte esse atributo com uma configuração já visitada no passado recente, assim a lista tabu pode também proibir visitar configurações novas de excelente qualidade. Este fato é contornado pelo critério de aspiração que elimina a proibição de uma configuração candidata se ela produz uma função objetivo de boa qualidade.

Existem várias formas de definir o critério de aspiração. Obviamente, o critério mais rígido é defini-lo da seguinte forma: se uma configuração candidata produz uma função objetivo melhor que a incumbente (melhor configuração já encontrada), então deve-se eliminar a proibição e armazenar essa configuração candidata no bloco **F**.

No bloco **E** é realizada a avaliação da função objetivo (ou seu equivalente) para cada configuração candidata; no bloco **F** é armazenada a melhor configuração candidata encontrada; no bloco **G** é verificada se todas as configurações candidatas já foram analisadas e em **H** é realizada a transição em que a configuração corrente é substituída pela melhor configuração candidata, isto é, a configuração corrente é substituída pela melhor configuração candidata encontrada.

Existe um último aspecto importante no algoritmo BT com memória de curto prazo: **a diminuição do tamanho de configurações candidatas que devem ser analisadas**. Para ilustrar este fato, sejam: $N(x)$ as configurações candidatas definidas pelo critério ou a estrutura de vizinhança, $N^{**}(x)$ um subconjunto reduzido de $N(x)$ obtido usando algum critério de redução de configurações candidatas e $N^*(x)$ os elementos de $N^{**}(x)$ que não estão proibidos pela lista tabu.

BT contorna o problema anterior de uma forma mais eficiente encontrando

um subconjunto reduzido $N^{**}(x)$ de $N(x)$. BT possui quatro estratégias para realizar este processo de redução de configurações candidatas: aspiração plus; formação de uma lista reduzida de configurações candidatas de elite; filtros sucessivos e estratégia de mudança acotada.

5.3.3 Memória de Longo Prazo e suas Estratégias Associadas

A incorporação de uma estratégia de longo prazo fornece ao algoritmo BT uma sofisticação adicional e um desempenho melhor na maioria das aplicações. Isto significa que, além da memória de curto prazo (estratégia de todo algoritmo BT básico), é incorporada uma estratégia adicional chamada de estratégia de longo prazo no algoritmo BT.

Existem três aspectos fundamentais relacionados com a memória de longo prazo: **1) a Memória baseada em Freqüência, 2) a Estratégia de Intensificação, e 3) a Estratégia de Diversificação.**

5.7.3.1 Memória baseada em Freqüência

A memória baseada em freqüência consiste basicamente em armazenar a informação do número de vezes em que um atributo foi escolhido para gerar ou participar na conformação das configurações durante o processo BT. Assim existem dois tipos de memória baseadas em freqüência: a **freqüência de transição** que armazena o número de vezes em que um atributo é retirado ou adicionado para formar novas configurações, e a **freqüência de residência ou permanência** que armazena a informação do número de vezes em que um atributo permanece nas novas configurações ou em todas as configurações geradas durante o processo BT. Esta informação baseada em freqüência pode ser utilizada para penalizar ou incentivar configurações conformadas com determinados atributos.

5.7.3.2 Estratégia de Intensificação

A estratégia de intensificação consiste em mudar os critérios de seleção das novas configurações candidatas, isto é, mudar $N^{**}(x)$ (ou $N^*(x)$) para incentivar a formação de novas configurações aproveitando a informação acumulada no processo BT. Intensificação pode ser implementada de várias formas diferentes tais como:

- Eliminando vizinhos ou incorporando novos vizinhos x' para a configuração corrente x , tipicamente considerando configurações de elite ou configurações com esses atributos como sendo “vizinhos” de x .
- Modificando a caracterização de configuração vizinha, isto é, redefinindo o conjunto $N(x)$.
- Retornando a regiões atrativas para realizar uma busca mais intensa na vizinhança dessas regiões atrativas. A Figura 5.4 mostra uma estratégia para esta alternativa.
- Realizando intensificação por decomposição.

As duas primeiras alternativas dispensam comentários adicionais. Na intensificação retornando a regiões atrativas, mostrada na Figura 5.4, a parte mais importante é o bloco **B** identificado como **estratégia de seleção de configurações de elite**. Este bloco identifica a estratégia que deve ser implementada para encontrar um conjunto de configurações de elite em que cada uma delas identifica uma região promissora. Assim, a partir de cada uma das configurações de elite armazenadas na lista, deve-se implementar um novo processo de busca de excelentes configurações guiado por uma estratégia BT de memória de curto prazo como mostra o bloco **D**.

Existem três estratégias para encontrar as k configurações de elite que devem ser armazenadas na lista do bloco **E**:

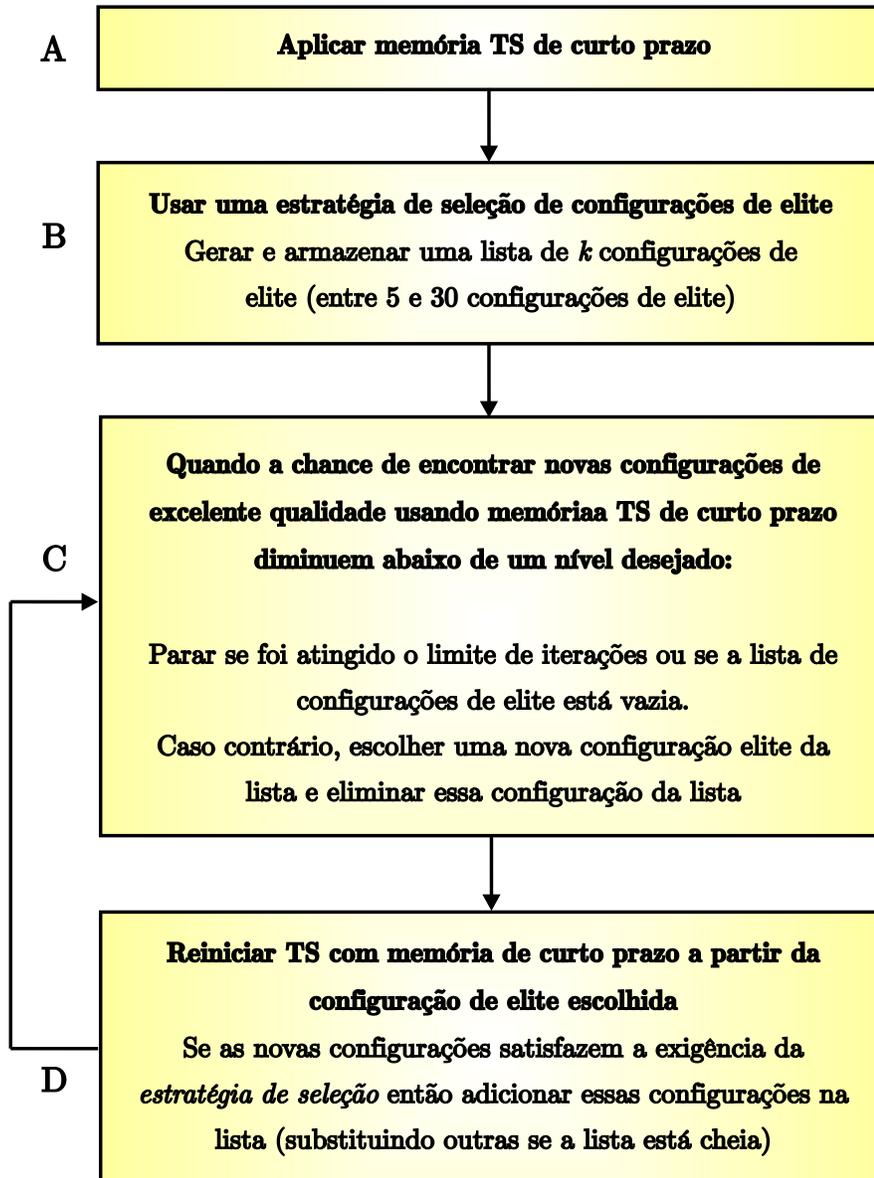


FIGURA 5.2: Implementação simples de diversificação em BT.

- Introduzir alguma forma de diversificação para encontrar e armazenar configurações significativamente diferentes; apagar toda a memória de curto prazo e reiniciar o processo a partir da última configuração armazenada.
- Formar e manter uma lista de tamanho especificado, e adicionando uma nova configuração como último elemento da lista somente se ela é melhor que alguma configuração já armazenada. O último elemento da lista sempre é o primeiro escolhido para reiniciar a busca. Neste caso, é necessário armazenar a memória de curto prazo da última configuração armazenada para evitar retorno a essa configuração.
- Uma terceira variante consiste em construir e manter em forma ordenada, uma lista com as k melhores configurações encontradas durante um número determinado de iterações. Depois o processo é reiniciado, durante um número de iterações especificado, com a pior configuração e usando busca tabu probabilística para evitar retornar à mesma configuração. Durante este processo, qualquer configuração que seja melhor que a pior da lista deve ser incorporada na lista substituindo a pior configuração e colocada em forma ordenada na lista de acordo com o valor de sua função objetivo.

Outro tipo de intensificação é a técnica de **intensificação por decomposição** que consiste em impor novas restrições sobre atributos, estruturas ou partes do problema visando diminuir o espaço de configurações do problema.

5.7.3.3 Estratégia de Diversificação

A **estratégia de diversificação** foi projetada para levar o processo de busca para regiões novas e atrativas. Esta estratégia é implementada mudando a definição de vizinhança ou de configurações candidatas $N(x)$, incorporando “vizinhos” constituídos por atributos que foram pouco usados. Nesta parte podem ser usadas as estruturas de memória usadas em intensificação ou em memória de curto prazo, mas com critérios de duração modificados. A Figura 5.3 mostra

uma estratégia simples de **diversificação** que mantém uma **memória baseada em frequência** sobre todo o passado do processo.

São obtidas melhorias significativas com a aplicação de BT com memória de curto prazo da Figura 5.3. Os ótimos locais obtidos com esta técnica podem ser usados depois para uma seqüência de diversificação.

As estratégias de diversificação podem também usar uma forma de **memória de longo prazo baseada em recência** visando incrementar o estado tabu dos atributos das configurações visitadas. Uma versão simples desta metodologia é apresentada na Figura 5.4.

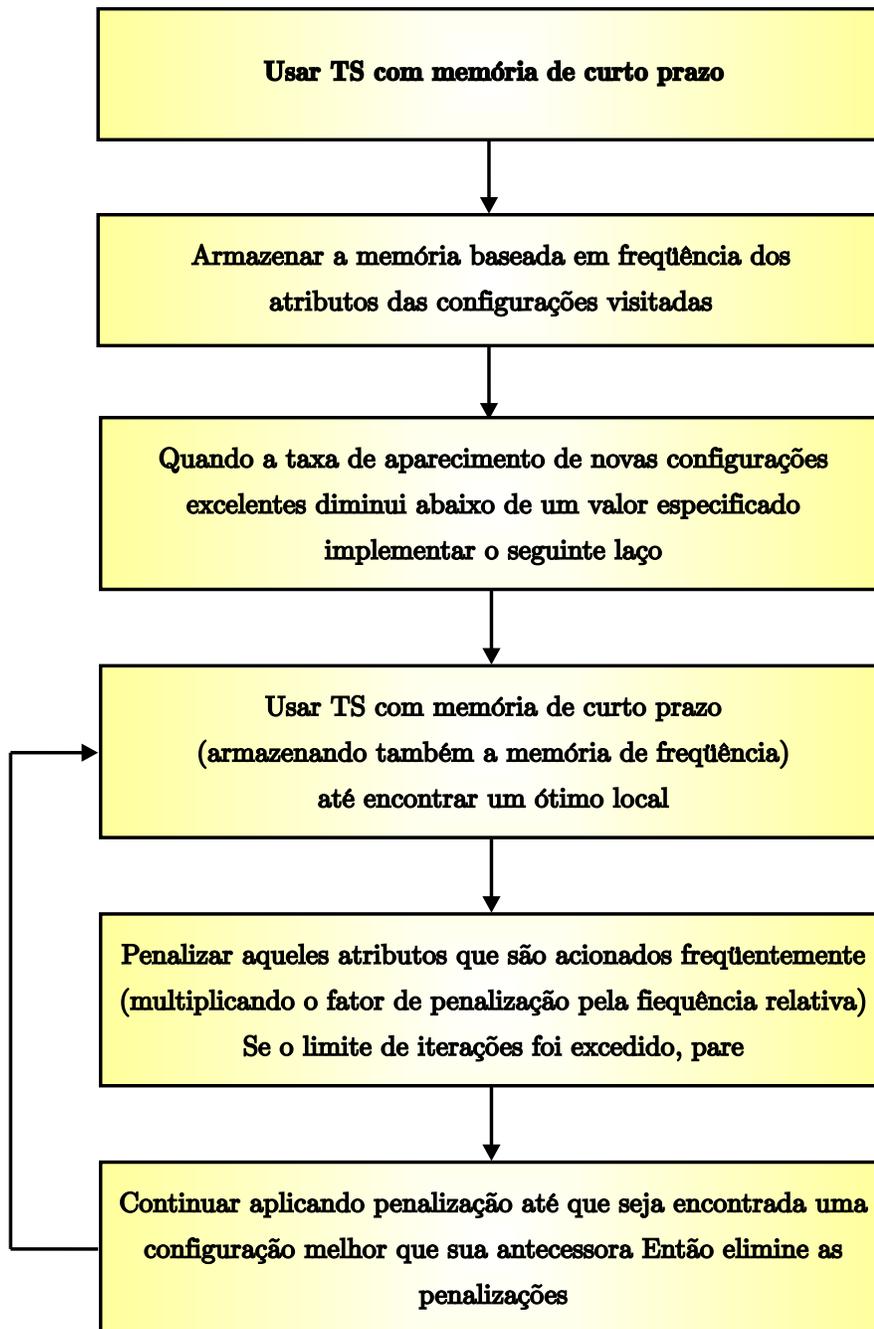


FIGURA 5.3: Implementação simples de diversificação em BT.

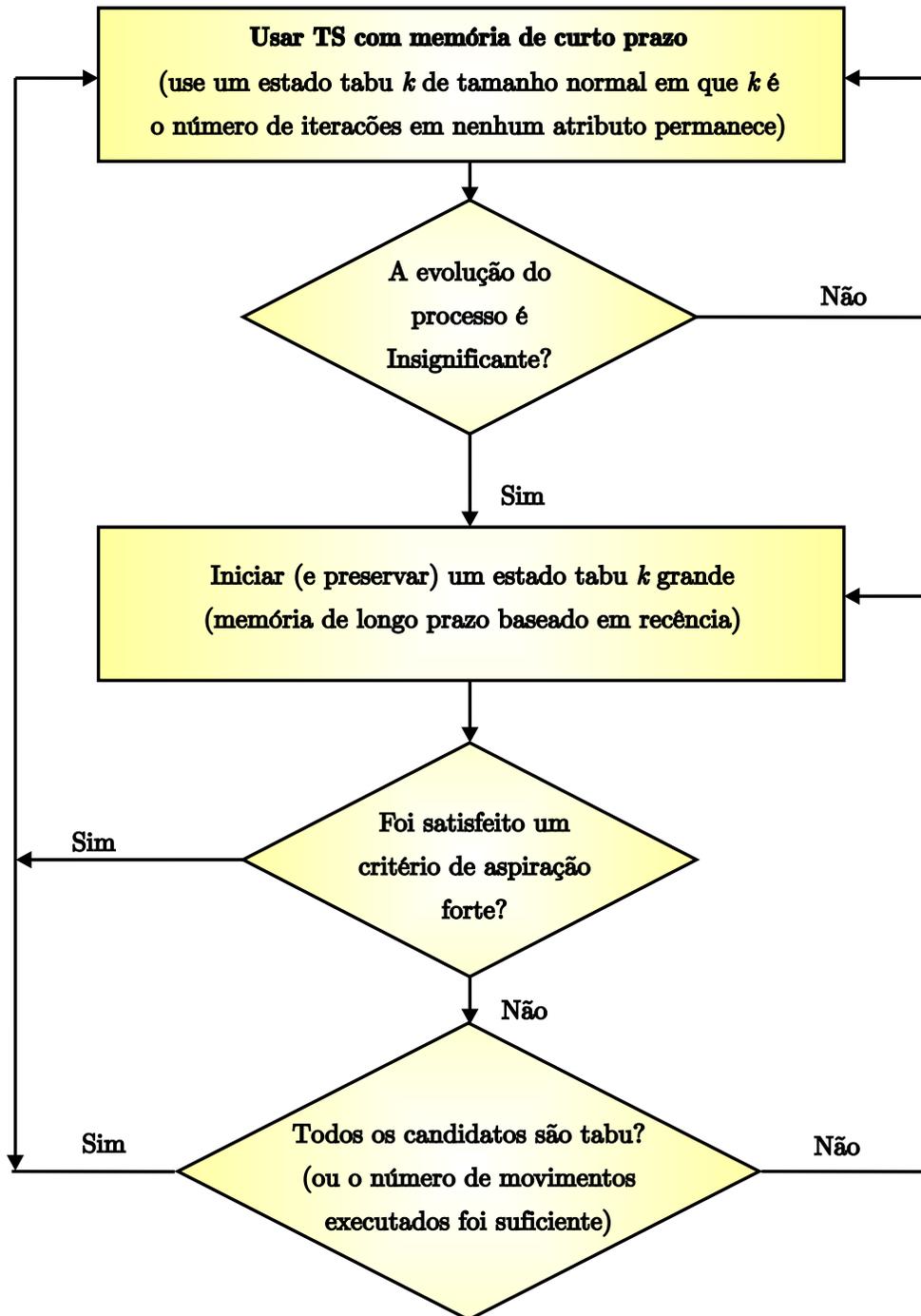


FIGURA 5.4: Diversificação usando memória de longo prazo baseado em recência.

CAPÍTULO 6

Modelo para Despacho de Reativos

Neste capítulo é apresentado o problema de despacho de reativos. Entende-se por despacho de reativos o cálculo do valor de um conjunto de variáveis relacionadas com o controle das tensões em um sistema de energia elétrica. As variáveis mais utilizadas para esse fim são a geração de potência, principalmente de potência reativa, o posicionamento de tap de transformadores, acionamento de banco de capacitores, reatores, e máquinas síncronas. O despacho refere-se a um caso estático, no qual a rede elétrica é representada através das equações de fluxo de carga. Estas variáveis algumas são contínuas e outras discretas, o que torna o problema de natureza combinatorial e não linear. Na abordagem desenvolvida, estas variáveis são determinadas por etapas. Primeiramente, o nível de geração de potência ativa é determinado sem a representação da rede elétrica, garantindo apenas o atendimento da demanda da carga global. Esta solução será denominada Despacho Ativo. O próximo passo é determinar o nível de geração de potencia reativa. A solução obtida será denominada Despacho Reativo. Após determinado o nível de geração reativa, a próxima etapa é trabalhar sobre as variáveis discretas, buscando uma nova solução com melhor desempenho.

Nesta tese supôs-se conhecido o despacho ativo. Em relação ao despacho reativo, testou-se uma abordagem baseada em Algoritmos Genéticos (AG) e um modelo de Fluxo de Potência Ótimo (FPO), na qual as variáveis discretas foram tratadas através do AG e para cada conjunto de valores discretos resolveu-se um problema de FPO. Duas outras metodologias foram implementadas, uma baseada em Busca Local e outra utilizando Busca Tabu, ambas utilizando um modelo de fluxo de carga para calcular o estado da rede.

6.1 Despachos de Reativos através de Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo

A aplicação de AG em problemas de planejamento é uma área bastante explorada [18], [25], [34]-[36], [40], [47], [49], [61], [75]. O problema de despacho de reativos consiste em determinar os ajustes dos dispositivos de controle das magnitudes das tensões no sistema de transmissão, com a finalidade de obter um perfil de tensão adequado, satisfazendo as restrições operacionais do sistema.

$$\min_{x,y} f(x,y), \tag{6.1}$$

sujeito a:

$$g(x,y) = 0, \tag{6.2}$$

$$h(x,y) \leq 0, \tag{6.3}$$

onde:

$$\left\{ \begin{array}{l} x \in \mathbb{R}^n; \\ y \in S; \\ S \text{ é um conjunto de números discretos;} \\ f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}; \\ g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, \quad m \leq n; \\ h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p; \\ f, g, h \in C^2. \end{array} \right.$$

O problema formulado acima é basicamente um problema de fluxo de potência ótimo, com a presença de variáveis discretas. A função objetivo (6.1) mais comuns são a minimização de custos de geração ou a minimização das perdas no sistema de transmissão. A Equação (6.2) representa as equações de fluxo de carga não linear; e as restrições (6.3) representam os outros requisitos operativos, como os limites de transmissão e limites de tensão. Como nesta tese considera-se conhecida a geração de potência ativa, então a potência ativa entra como um parâmetro no problema (6.1)-(6.3), e restando como as variáveis de decisão o nível de potência reativa e os tap's dos transformadores. Baseado nessas hipóteses, o problema (6.1)-(6.3) pode então ser reescrito como a seguir:

$$\min \sum_{k,i \in L} f_{ki}(\hat{P}, Q, V, \theta, x_{ki}), \quad (6.4)$$

sujeito a:

$$g(\hat{P}, Q, V, \theta, x) = 0, \quad (6.5)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}, \quad (6.6)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad (6.7)$$

- L - conjunto das linhas de transmissão/transformadores;
- f_{ki} - função que dá a perda na linha $k-i$;
- P - Vetor de injeção de potência ativa nas barras;

- Q - Vetor de injeção de potência reativa nas barras;
- V - Vetor de magnitudes de tensão de barra;
- θ - Vetor de ângulos de fase de tensão de barra;
- x_{ij} - tap do transformador da linha $k-i$.

A função objetivo (6.4) minimiza as perdas totais de transmissão. A restrição (6.5) representa as equações de fluxo de carga; e as restrições (6.6) e (6.7) são respectivamente os limites de geração de potência reativa e limites de magnitude de tensão.

O problema (6.4)-(6.7) é não linear e combinatório. Dada a dificuldade de encontrar a solução ótima do problema em curto espaço de tempo, nesta tese o mesmo foi tratado via a decomposição em dois subproblemas. O primeiro determina o despacho ótimo de geração reativa considerando os tap's em seus valores nominais (1.0 p.u.). Após determinado o despacho reativo, tem-se a fase de cálculos dos tap's. O primeiro subproblema é o clássico problema de fluxo de potência ótimo reativo, no qual as variáveis discretas são fixadas nos seus valores nominais, e a geração de potência ativa dada. O segundo subproblema, por sua vez, é puramente discreto, pois pesquisam-se outros valores para os tap's de forma a otimizar o desempenho do sistema de transmissão.

Subproblema 1:

$$\min \sum_{ki \in L} f_{ki} \left(\hat{P}, Q, V, \theta, \hat{x}_{ki} \right), \quad (6.8)$$

$$g \left(\hat{P}, Q, V, \theta, \hat{x} \right) = 0, \quad (6.9)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}, \quad (6.10)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}. \quad (6.11)$$

Subproblema 2:

$$\min \sum_{ki \in L} f_{ki} \left(\hat{P}, \hat{Q}, V, \theta, x_{ki} \right), \quad (6.12)$$

sujeito a:

$$g \left(\hat{P}, \hat{Q}, V, \theta, x \right) = 0, \quad (6.13)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}. \quad (6.14)$$

No Subproblema 1 tanto a injeção de potência ativa (\hat{P}_i), como também o valor dos tap's (\hat{x}_{ij}) são parâmetros, de forma que o problema resultante é um problema de otimização não linear com variáveis reais. O mesmo foi resolvido através de um método baseado em pontos interiores. Já o segundo Subproblema foi tratado através de técnica baseada em Algoritmo Genético, descrito a seguir.

Algoritmo Genético

O tipo de algoritmo usado neste trabalho se enquadra na categoria denominada AGS e consiste de seleção natural, cruzamento, mutação e um programa de controle formado pelas taxas de cruzamento (txcr), mutação (txpm), número de gerações (ngera), como descrito no Capítulo 4.

Codificação das variáveis discretas

Para a codificação das variáveis discretas optou-se pelo sistema de base decimal. Dessa forma cada individuo possui a seguinte estrutura básica: [T1, T2, ..., Tnt] em que:

nt - refere-se ao número de taps existentes no sistema

A geração e a codificação de cada elemento da população obedeceu as seguintes regras: Para a população inicial utilizou-se um gerador de número aleatório que forneceu valores discretos de taps entre 0,95 e 1,05. O conjunto de valores dos tap's, gerado conforme a especificação acima constitui a população inicial para o algoritmo genético especializado para solução do problema do fluxo de

potência ótimo. A próxima etapa consiste em avaliar a função aptidão para cada indivíduo da população.

Avaliação da função aptidão e seleção proporcional

Para cada indivíduo da população deve-se avaliar a função aptidão. Neste caso específico procedeu-se da seguinte forma: Resolve-se o FPO e tem-se o valor das perdas na sua solução ótima, a qual será considerado como a função aptidão. O tipo de seleção usado foi o chamado esquema de seleção proporcional, no qual se define o número de descendentes que cada configuração tem direito. Existem vários esquemas de seleção sendo o mais tradicional o baseado no jogo de roleta. Neste trabalho utilizou-se da seguinte forma: - Calcula-se a inversa da função objetivo, e depois faz-se o somatório, multiplicando por 100, encontrando-se então o percentual a que aquele indivíduo corresponde, chamando a esse valor de $fp(i)$, ou seja valor da função aptidão. - O maior valor de $fp(i)$ define o indivíduo mais adaptado, e portanto será o representante para a próxima geração.

Cruzamento

Uma vez selecionadas as configurações, deve-se formar os pares de acasalamento e realizar o cruzamento. No cruzamento, cada par de configuração, mistura seus conteúdos genéticos dando origem a dois descendentes. O tipo de cruzamento adotado foi cruzamento de um único ponto. Primeiro sorteia-se os elementos a serem cruzados, e depois decide-se pelo cruzamento sorteando um número aleatório. Se o número sorteado for menor que 0,5 (A taxa de cruzamento pode ser coordenada variando-se este valor), não haverá cruzamento, e se for igual ou maior a 0,5 haverá o cruzamento. Em seguida sorteia-se um número aleatório entre 1 e $(k - 1)$, para uma configuração de k -elementos, o qual é chamado de $txcr$, que é o ponto de cruzamento. Uma vez escolhido o ponto de cruzamento, geram-se as duas configurações trocando-se as parcelas a esquerda do ponto de cruzamento das duas configurações candidatas.

Mutação

A mutação, conforme abordada neste trabalho consiste em alterar aleatoriamente de acordo com a taxa de mutação pré-estabelecida, os valores de taps de transformadores, adicionando-se ou subtraindo-se aos mesmos um determinado valor.

Resultados

Para analisar o desempenho da metodologia proposta, os testes foram realizados utilizando-se o Sistema IEEE30 barras. Este sistema consiste de 30 barras e 37 linhas de transmissão, com a inclusão de 7 transformadores, sendo um em cada linha entre as barras de geração.

População Inicial

A população inicial de taps foi gerada aleatoriamente, entre os valores 0,95 e 1.05, liberando-se os limites de tensões das barras.

Estudo de Caso

A Tabela VI.1 mostra a influência que o número de gerações tem sobre a redução na função objetivo. De uma forma geral, quanto maior é o número de gerações, maior é a redução. Mas, por outro, maior é o tempo de processamento.

Tabela 6.1 - Resultados do AG/FPO.

Função de aptidão	N. de gerações	Melhor solução inicial	Melhor solução final	% de melhoria
Custo de geração	2	2,3146	2,3126	0,086
	10	2,3159	2,3132	0,116
	30	2,3123	2,3074	0,212
Perda de transmissão	2	2,8441	2,8441	0
	5	2,8431	2,8423	0,028
	30	2,8441	2,8414	0,095

Despacho de Reativos através de Busca Tabu e Fluxo de Carga

A grande desvantagem da metodologia baseada em AG/FPO apresentada no capítulo anterior é o elevado tempo computacional requerido, uma vez que para cada conjunto de variáveis discretas determinados pelo AG é necessário resolver um problema de FPO. Para diminuir o tempo computacional foi desenvolvida uma metodologia baseada em Busca Tabu e um modelo de fluxo de carga, BT-FC, descritos a seguir.

7.1 Busca Tabu

A metodologia BT-FC [51] adota uma estratégia similar à abordagem baseada em AG e FPO apresentada no capítulo anterior. Aqui as variáveis discretas serão tratadas através de técnica baseada em Busca Tabu, e para cada conjunto de valores discretos determina-se o correspondente estado da rede elétrica através da resolução de um fluxo de carga não linear. A etapa da BT sempre parte de

uma solução, que será denominada Solução Atual (SA), e compreende os seguintes passos, que são resolvidos iterativamente até a satisfação de algum critério de parada.

- Busca Local.
- Atualização da SA e da solução incumbente.
- Definição dos movimentos tabu/aspiração.

A Busca Local determina o melhor movimento em torno da solução atual. Em função da melhor solução identificada é atualizada a SA, em torno do qual será realizada a nova busca local. Se a melhor solução da busca local for também melhor que a solução incumbente atual, então a solução incumbente também deverá ser atualizada. O último passo define os novos movimentos tabu e a atualização dos movimentos tabu atuais em função dos critérios de aspiração. A seguir detalha-se cada um dos passos acima listados.

7.1.1 Busca Local

A Busca Local (BL) sempre parte de uma dada solução e é composta dos seguintes passos:

- Definição dos Possíveis Movimentos.
- Avaliação dos Movimentos.

Nesta tese, a BT irá tratar especificamente do posicionamento dos tap's dos transformadores. No entanto, outras variáveis discretas, tais como o acionamento de banco de capacitores e unidades síncronas, também podem ser considerados por esta busca. No caso de tap de transformadores, o BL investiga a alteração da posição dos tap's na vizinhança da SA. Dessa forma, para um dado tap, em princípio os possíveis movimentos a partir de uma dada posição é

deslocar para as possíveis posições vizinhas. Nesta tese, os movimentos foram limitados para os seus vizinhos imediatos, de modo que para um dado tap há dois possíveis movimentos. Detalha-se a seguir cada um dos passos.

Definição dos Possíveis Movimentos

Como a BL trata das variáveis discretas, que no caso desta tese ficou restrita aos tap's dos transformadores, então deve-se definir os possíveis movimentos para cada um dos tap's. Como os movimentos são restritos aos vizinhos imediatos, onde o valor +1 indica o deslocamento para a posição imediatamente superior, o valor -1 indica o deslocamento para a posição imediatamente inferior, e o valor 0 (zero) indica que o movimento é nulo (mantém-se a posição). A Tabela 7.1 mostra um exemplo onde cada linha da matriz representa um tap. O Tap 1 pode mover nos dois sentidos; o Tap 2 só pode aumentar; e o Tap 3 só pode decrescer.

Tap	Movimento1	Movimento1
1	1	-1
2	1	0
3	-1	0

TABELA 7.1: Exemplo de possíveis movimentos

Avaliação dos Movimentos

O passo de avaliação consiste em determinar primeiramente o estado da rede elétrica para cada possível movimento. Ou seja, um tap é alterado a cada vez e para cada possível posicionamento dos tap's resolve-se as correspondentes equações de fluxo de carga não linear. Com o estado obtido avalia-se a solução em relação a um determinado critério de otimização. O critério adotado nesta metodologia foi a minimização dos desvios das tensões em relação ao valor de 1,0 p.u.. A motivação para este critério é de natureza mais operativa, pois na operação em tempo real do sistema evita-se tanto operar com sobretensões,

usuais nos períodos de carga leve, como também a operação com baixas tensões, comuns nos períodos de demandas elevadas. A seguir o critério adotado para avaliar cada possível movimento.

$$\min \sum_{ki \in L} f_{ki} \left(\hat{P}, Q, V, \theta, \hat{x}_{ki} \right), \quad (7.1)$$

Como os movimentos estão restritos aos vizinhos imediatos, observa-se dois possíveis resultados. Em geral, quando para um dado movimento há redução no critério de otimização, o movimento oposto resulta em aumento. Em outros casos, ambos os movimentos resultam em piora no critério de otimização; é uma posição de mínimo local em relação a este tap nesta solução atual. Baseado nestes dois possíveis comportamentos, a avaliação para um determinado tap pode resultar em um dos três valores, +1, -1, ou 0 (zero). O primeiro valor indica que há um movimento de melhora; o segundo indica que todos os movimentos resultam em piora da solução; e o último valor indica que não houve movimento neste tap. Quando a resposta é positiva, deve-se identificar o movimento que resultou em melhoria.

7.1.2 Atualizações da SA e da Solução Incumbente, e Diversificação

Após a avaliação de todos os movimentos de todos os tap's, pode-se identificar o melhor movimento para esta SA. Se este melhor movimento for também melhor que a Solução Incumbente atual, então a nova SA é obtida pela atualização da SA anterior, executando-se este melhor movimento. A nova busca local será realizada em torno desta nova SA. Por outro lado, se este melhor movimento não resultar em solução melhor que a Solução Incumbente, então isto indica que na (primeira) vizinhança desta SA não há solução melhor. Isto indica um ótimo local, e no caso da Busca Local o processo seria encerrado. Porém, no caso da Busca Tabu, a execução deste melhor movimento, mesmo que não resulte na

melhora da Solução Incumbente, é executado algumas vezes como um processo de diversificação.

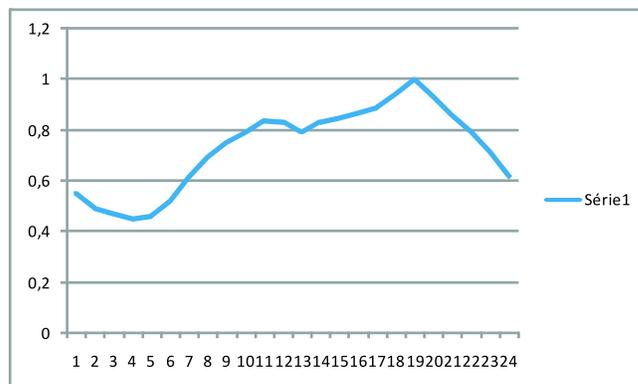
7.1.3 Definição dos movimentos tabu/aspiração

Quando um dado movimento é repetido um certo número de vezes (número-tabu), este torna-se um movimento tabu. O critério de aspiração adotado nesta tese foi a duração-tabu. Isto é, o movimento deve permanecer tabu por um período estabelecido (duração-tabu), voltando a ser um movimento possível.

7.1.4 Resultados

Esta metodologia foi aplicado ao sistema IEEE30. Além da metodologia baseada em BT implementou-se também uma Busca Local (BL), que sempre irá efetuar o movimento de maior melhoria. A metodologia baseada em BL também foi aplicada ao mesmo sistema. Todas as duas estratégias de busca partiram da mesma solução inicial.

Para o sistema IEEE30 foi considerado uma distribuição de carga/geração por barramento, denominada Carga Base. Como o objetivo desta tese é tratar o caso da operação diária, considerou-se que esta carga irá variar paralelamente ao longo do dia. Assim, as gerações e cargas por barramento em cada intervalo de tempo serão obtidas multiplicando-se a Carga Base por um fator. A Figura 7.1 mostra os fatores utilizados para cada intervalo de tempo. Os resultados apresentados a seguir considerou as condições de carga relativo ao primeiro intervalo de tempo. Este despacho foi tratado tanto pela metodologia de Busca Local, como também pela Busca Tabu, como apresentados a seguir.



(Figura 7.1.)

Tabela 7.1 - Relação dos transformadores no sistema IEEE30

Trasformador	Barra origem	Movimento 2
1	6	9
2	6	10
3	9	11
4	9	10
5	4	12
6	12	13
7	28	27

Busca Local

O sistema IEEE30 possui sete transformadores com tap, no qual os transformadores conectam os barramentos conforme a Tabela 7.1. Considerou-se também que os taps podem variar de 0,95 até o valor 1,05 p.u., sendo que a faixa de 0,95 até 1,0 foi dividido em 5 pontos, e a faixa de 1,0 até 1,05 também foi dividido em 5 pontos discretos. Em todos os intervalos de tempo, a BL partiu de uma solução inicial com os taps em sua posição nominal 1,0 p.u.. Ou seja, a primeira Solução Atual (SA) está apresentada na Tabela 7.2, em torno da qual será realizada a primeira busca local. Para esta SA o desvio quadrático das tensões em relação a 1,0 p.u. é de 0,00358. Este será denominado o Erro Quadrático Base desta SA.

Tabela 7.2 - Primeira Solução Atual

Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5	Tap 6	Tap 7
1	1	1	1	1	1	1

Intervalo $t = 1$

Descreve-se a seguir em detalhe a aplicação da BL no problema de despacho de reativos do primeiro intervalo de tempo. A partir da solução inicial foi realizada uma busca local avaliando todos os possíveis movimentos. A Tabela 7.3 mostra para cada tap o movimento de maior melhoria; a melhoria é relativo ao Erro Quadrático Base. Por exemplo, no tap1 (Transformador 1) o movimento de "redução" do Tap (Tap 1 passou do valor 1,0 p.u. para 0,99 p.u.) apresentou redução no critério de otimização, enquanto o movimento oposto aumentou o critério. De modo similar para o Tap 2, o movimento de "acrécimo" do Tap 2 reduziu o critério, enquanto o movimento de "redução" aumenta o critério; e assim por diante para os demais taps. Neste processo de avaliação dos movimentos, avalia-se cada tap individualmente e para este tap todos os possíveis movimentos são testados. Quando todos os taps são testados, completa-se uma iteração na BL. Desta primeira iteração da BL, o tap de maior redução é o tap 6, que será o movimento executado. Assim, após a primeira iteração da BL, a nova Solução Atual está apresentada na Tabela 7.4, em torno da qual será realizada a nova iteração da BL, cujo resultado está apresentada na Tabela 7.5. Novamente, o tap de maior melhoria é também o Tap 6; nesta segunda iteração o erro quadrático base será o erro quadrático associado à segunda SA, 0,003039. Note que para o Tap 5, todos os possíveis movimentos resultam em aumento no critério de otimização, por isso não há movimento de melhoria para esse tap nesta iteração. Esse processo se repete até não haver mais possíveis movimentos a serem pesquisados. A Tabela 7.6 mostra os movimentos executados em cada iteração da BL. Note que inicialmente somente o Tap 6 é alterado. A Tabela 7.7 mostra a solução após encerrar a BL; esta será denominada a Melhor Solução (MS). Nesta MS, o valor do erro quadrático foi de 0,001355.

Tabela 7.3 - movimentos de melhoria por tap para a primeira SA

Tap	Movimento	Erro Quadrático
Tap 1	-1	0,003515
Tap 2	1	0,003568
Tap 3	-1	0,003486
Tap 4	1	0,003387
Tap 5	-1	0,003547
Tap 6	1	0,003039
Tap 7	1	0,003367

Tabela 7.4 - Nova SA

Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5	Tap 6	Tap 7
1	1	1	1	1	1,01	1

Tabela 7.5 - movimentos de melhoria por tap para a segunda SA

Tap	Movimento	Erro Quadrático
Tap 1	-1	0,002988
Tap 2	1	0,003023
Tap 3	-1	0,002957
Tap 4	1	0,002854
Tap 5	0	0
Tap 6	1	0,002628
Tap 7	1	0,00284

Tabela 7.6 - movimentos de melhoria por tap para a segunda SA

Iteração	Tap	Movimento
1	6	1
2	6	1
3	6	1
4	6	1
5	4	1
6	7	1
7	7	1
8	7	1
9	7	1
10	7	1
11	5	1
12	6	1
13	5	1
14	2	-1
15	2	-1
16	2	-1
17	5	1
18	2	-1
19	2	-1

Tabela 7.7 - Nova SA

Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5	Tap 6	Tap 7
1	0,96	1	1,01	1,04	1,05	1,05

A cada iteração da BL calculou-se a tensão média, máxima e mínima entre todas as barras, mostradas nas Figuras 7.2, 7.3 e 7.4 respectivamente. Na Figura 7.2 observa-se que a tensão média aproxima-se do valor 1,0 p.u., como era de se esperar, uma vez que o critério de otimização adotado foi de minimizar o desvio das tensões em relação a 1,0 p.u.. Em relação à tensão mínima, observa-se que este valor aumenta à medida que se evolui a BL, mas ainda distante da tensão máxima. A tensão mínima cresce inicialmente e depois estabilizando. A Figura 7.5 mostra o desvio quadrático por iteração. Nota-se que este desvio diminui à medida que evolui a BL, indicando que as tensões se aproximam de 1,0 p.u..

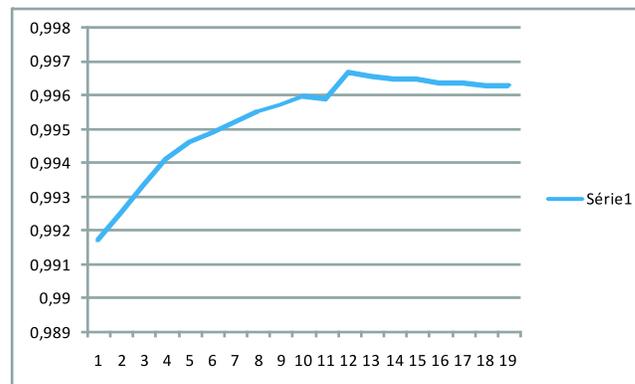


Figura 7.2 - Tensão média nas barras por iteração da BL

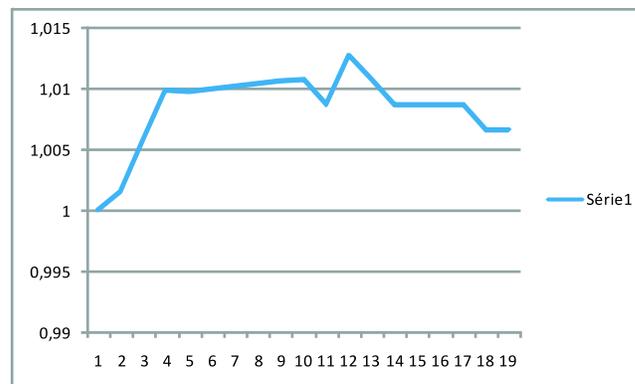


Figura 7.3 - Tensão máxima nas barras por iteração da BL

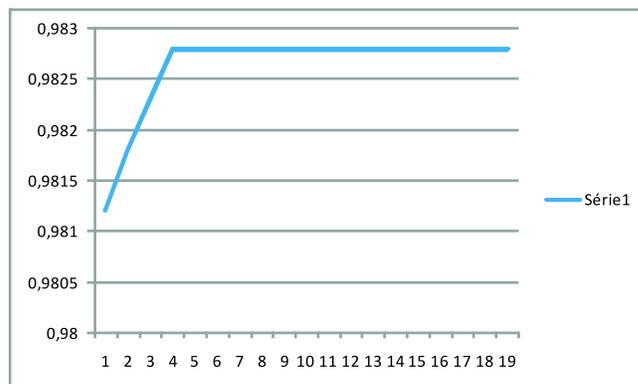


Figura 7.4 - Tensão mínima nas barras por iteração da BL

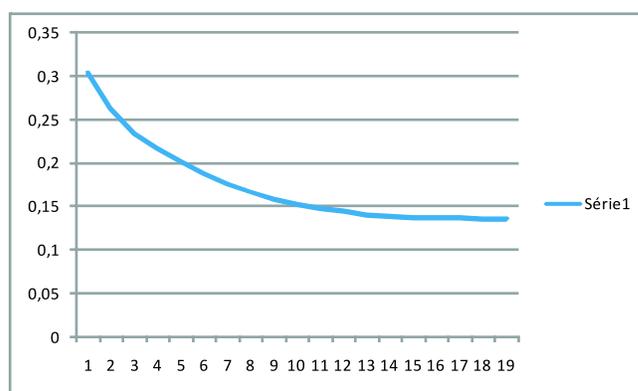


Figura 7.5 - Desvio quadrático por iteração da BL

Busca Tabu

A BT tem a mesma estrutura da BL, na qual a cada iteração são avaliados todos os possíveis movimentos de todos os taps, mas com a introdução dos mecanismos de movimentos tabus e de aspiração. Os movimentos tabus foram definidos em função do número de vezes que um dado tap (número-tabu) é escolhido como o tap de maior melhoria, e uma vez definido como um movimento tabu este deve permanecer como tabu por um certo número iterações (duração-tabu). Após este período, o movimento torna-se novamente possível. Foram testados vários valores tanto para o número-tabu, como também para a duração-tabu, e os melhores resultados para este sistema teste foram obtidos para o caso de número-tabu igual a uma escolha como melhor tap e a duração-tabu igual a uma iteração como movimento tabu. Os resultados para este caso serão apresentados a seguir.

A BT foi aplicado no problema de despacho reativo de cada um dos intervalos de tempo, como foi a BL. Em cada intervalo de tempo, a BT também parte com a solução inicial (SA) com os taps em seus valores nominais (1,0 p.u.). Os resultados a seguir correspondem ao despacho do primeiro intervalo de tempo. Neste caso, a primeira iteração da BT é exatamente igual à primeira iteração da BL. Como nesta primeira iteração o Tap 6 é o que realizou o movimento, então na próxima iteração este movimento será definido como um movimento tabu. Ou seja, na próxima iteração, o movimento de crescimento do Tap 6 não será possível. Os movimentos da segunda iteração da BT são iguais à segunda iteração da BL, com exceção do Tap 6, que nesta segunda iteração só é permitido decrescer e isto causa um aumento no critério de otimização. Por isso, nesta iteração o Tap 6 não apresenta nenhum movimento de melhoria; ao contrário de BL, que na segunda iteração também escolheu como o melhor movimento. Nesta segunda iteração o melhor movimento foi no Tap 7 (movimento de "acrécimo"). A Tabela 7.8 mostra os melhores movimentos a cada iteração da BT. Aqui observa-se no início uma alternância de movimentos entre os taps 6 e 7. A Tabela 7.9 apresenta a Melhor Solução da BT. Nesta solução, o erro quadrático foi de 0,00133, enquanto que a BL obteve um erro quadrático de 0,001355. Assim, neste caso a BT obteve uma solução com erro quadrático 1,8 por cento menor que a solução da BL.

Tabela 7.8 - movimentos de melhoria por iteração da BT

Iteração	Tap	Movimento
1	6	1
2	7	1
3	6	1
4	7	1
5	6	1
6	7	1
7	6	1
8	7	1
9	4	1
10	7	1
11	5	1
12	6	1
13	5	1
14	2	-1
15	5	1
16	2	-1
17	2	-1

Tabela 7.9 - Valores dos taps ao final da BT

Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5	Tap 6	Tap 7
1	0,98	1	1,01	1,03	1,05	1,05

A tensão média, máxima e mínima e os erros quadráticos na melhor solução da BT também tiveram desempenhos similares à BL. A aplicação das metodologias BT e BL a este sistema teste obtiveram solução bastante próximas, tanto em termos de número de iterações como dos valores obtidos. Faz-se necessário tratar sistemas de maior porte para verificar o desempenho das duas metodologias.

CAPÍTULO 8

Pré-Despacho de Reativos

Neste capítulo é apresentada a análise da operação reativa ao longo de um dia de operação, aqui chamada de pré-despacho de reativos. O metodologia determina o valor dos tap's dos transformadores em todos os intervalos de tempo, com o objetivo de obter um perfil de tensão diário mais favorável do ponto de vista operativo. Nesta metodologia supõem-se conhecidos os despachos de geração ativa e reativa. A abordagem é baseada na metodologia apresentada no capítulo anterior, a qual irá buscar uma configuração de tap's com melhor perfil de tensão para cada intervalo de tempo.

8.1 Perfil de Tensão Diário Típico

A Figura 8.1 mostra o perfil de tensão típico em um dado barramento ao longo de um dia, discretizado em intervalos horários (ou menor). Observa-se tensões mais elevadas na carga leve, e tensões reduzidas nos períodos de ponta. De um modo geral, deve-se evitar as sobretensões, pois isto requer ações como o acionamento de unidades síncronas e até o desligamento de linhas de transmissão. Já nos

períodos de ponta, o problema é o oposto, quando deseja-se evitar tensões muito baixas.

8.2 Modelo de Despacho Reativo Dinâmico

(MD)

Em princípio o problema da operação diária pode ser encarado como uma sequência de problemas de despacho reativo, um para cada intervalo de tempo. Estes despachos podem ser resolvidos independentes, ou de forma acoplada. Nesta tese foram adotadas as duas estratégias. Para o caso de modelos que incluem decisões sobre geração de potência ativa e decisões sobre outras variáveis discretas, como a inclusão de banco de capacitores, torna-se importante levar em conta o aspecto dinâmico. O modelo de despacho de reativo a seguir trata o problema de forma dinâmica, no qual a decisão em um dado intervalo de tempo é também dependente do estado do intervalo anterior.

$$\min \left[c_p \cdot f_t \left(\hat{P}^t, Q^t, V^t, \theta^t, x_{ki}^t \right) + c_m \nu \left(x^t, x^{t-1} \right) \right], \quad (8.1)$$

sujeito a:

$$g \left(\hat{P}^t, Q^t, V^t, \theta^t, x^t \right) = 0, \quad t = 1, \dots, T; \quad (8.2)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i^t \leq Q_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T; \quad (8.3)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i^t \leq V_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T. \quad (8.4)$$

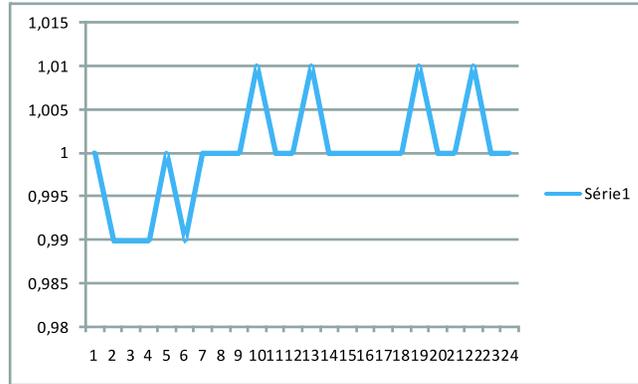
Na função objetivo (8.1) acrescenta-se uma penalização da variação nas decisões discretas de um intervalo para outro. A função ν calcula a variação nas variáveis discretas de um intervalo para outro, como por exemplo, o número de posições que um dado tap variou entre dois intervalos de tempo consecutivos. A função desta segunda parcela é inibir estas variações. Para a implementação deste modelo dinâmico é necessário ter uma estimativa dos custos (parâmetros

de custos c_p e c_m) visando contabilizar as duas parcelas da função objetivo em termos de seus custos monetários. Em termos de restrições, tem-se no problema (8.2)-(8.4) as mesmas restrições do problema de despacho reativo, porém agora indexada no tempo, de forma a assegurar que as soluções obtidas para todos os intervalos de tempo sejam eletricamente viáveis. No caso desta tese, não se penalizou as variações nas posições do taps de um intervalo para outro, ou seja penalização nula. Mas, o simples fato de iniciar o cálculo da solução de um dado intervalo de tempo considerando a solução obtida no intervalo anterior, já resultou em ganhos significativos em termos de esforço computacional, e em vários intervalos de tempo a solução obtida pelo MD foi melhor do que a obtida por BT ou a BL independentes.

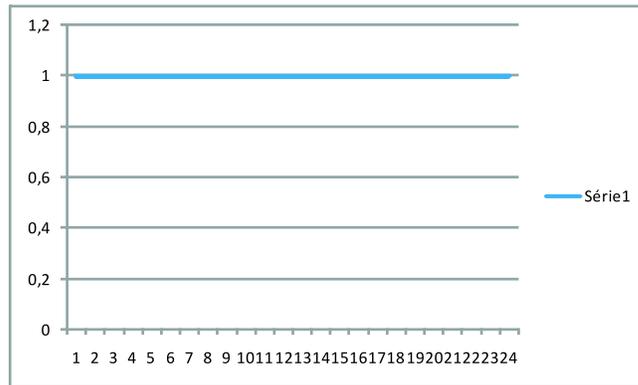
No problema de pré-despacho de potência ativa é comum considerar restrições dinâmicas, relativas às restrições de rampa e de operação dos reservatórios. No caso do problema de pré-despacho de potência reativa estas restrições dinâmicas não são importantes, e por isso na formulação apresentada não são consideradas restrições dinâmicas relativas à geração de potência reativa.

8.3 Análise da Operação Diária Através do Modelo de Busca Local

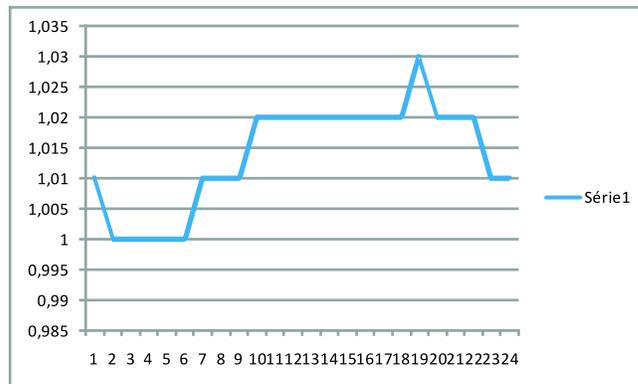
O modelo de despacho reativo baseado em BL foi aplicado ao problema de despacho para cada intervalo de tempo. As Figuras 8.2 a 8.8 mostram a evolução de cada um dos taps em função do intervalo de tempo. Os taps 2, 6 e 7 ficam constantes durante o dia. O Tap 5 só altera no intervalo de menor demanda. O Tap 3 varia aproximadamente acompanhando a curva de carga, enquanto que o Tap 4 tem um comportamento inverso. O Tap 1 é o que apresenta um comportamento mais errático.



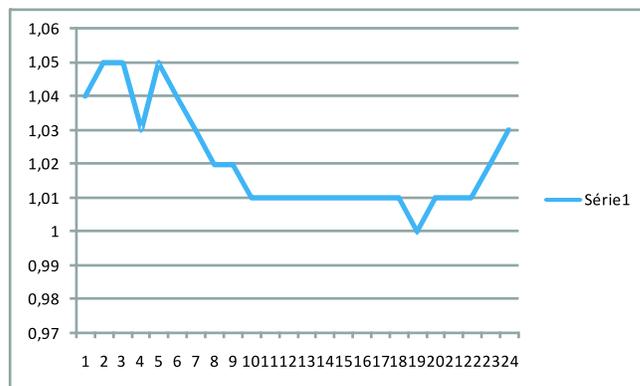
(Figura 8.2 - Evolução do Tap 1 durante o dia)



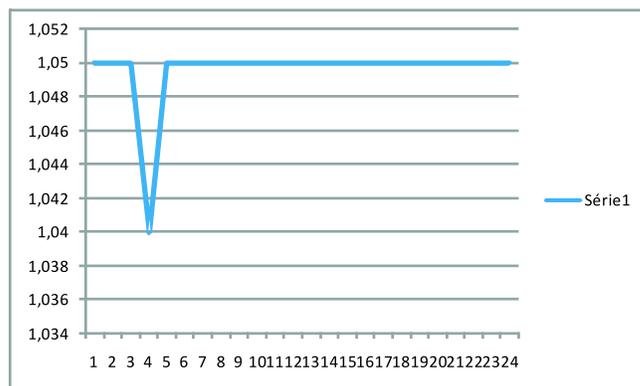
(Figura 8.3 - Evolução do Tap 2 durante o dia)



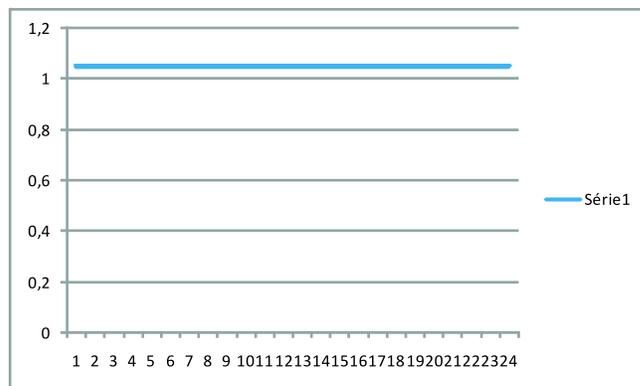
(Figura 8.4 - Evolução do Tap 3 durante o dia)



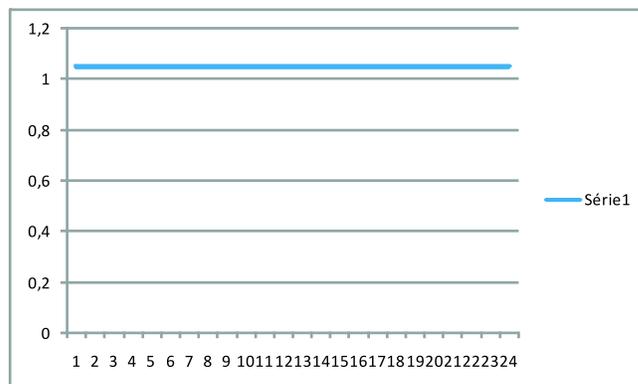
(Figura 8.5 - Evolução do Tap 4 durante o dia)



(Figura 8.6 - Evolução do Tap 5 durante o dia)



(Figura 8.7 - Evolução do Tap 6 durante o dia)

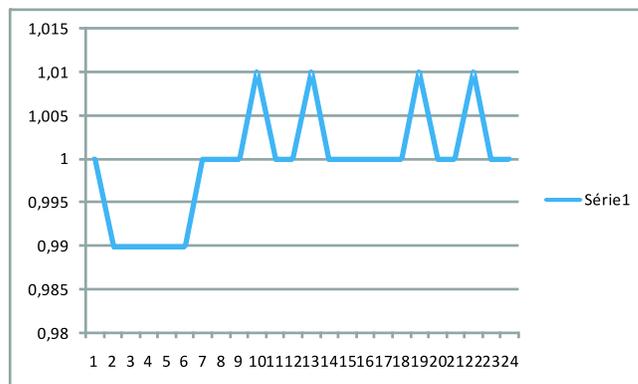


(Figura 8.8 - Evolução do Tap 7 durante o dia)

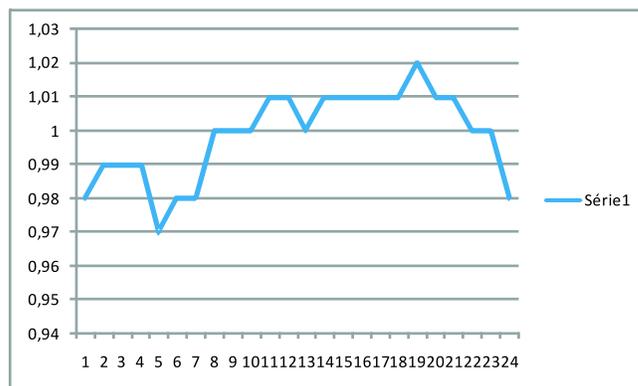
A aplicação da BL em todos os intervalos de tempo apresentaram um comportamento típico similar ao caso do primeiro intervalo de tempo, detalhado no capítulo anterior, mostrando que esta metodologia é adequada ao problema de despacho de reativos, como o tratado nesta tese.

8.4 Análise da Operação Diária Através do Modelo de Busca Tabu

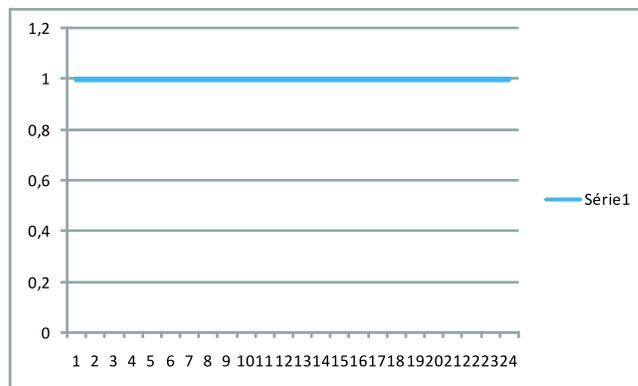
De modo similar, o modelo de despacho reativo baseado em BT também foi aplicado para cada intervalo de tempo. As Figuras 8.9 a 8.15 mostram a evolução de cada um dos taps em função do intervalo de tempo. Os taps 2, 6 e 7 ficam constantes durante o dia. O Tap 5 só altera no intervalo de menor demanda. O Tap 3 varia aproximadamente acompanhando a curva de carga, enquanto que o Tap 4 tem um comportamento inverso. O Tap 1 é o que apresenta um comportamento mais errático.



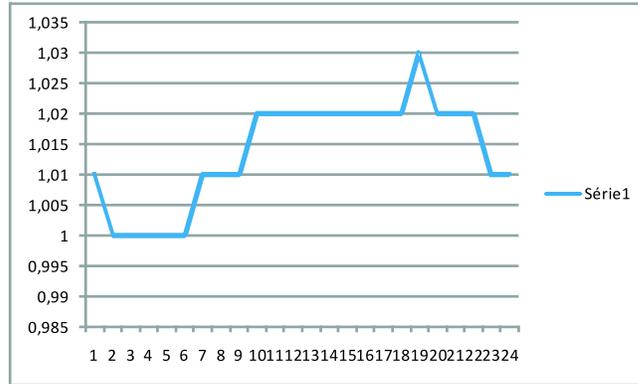
(Figura 8.9 - Evolução do Tap 1 durante o dia)



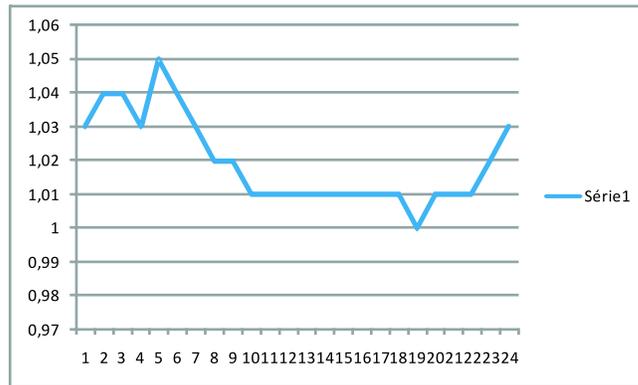
(Figura 8.10 - Evolução do Tap 2 durante o dia)



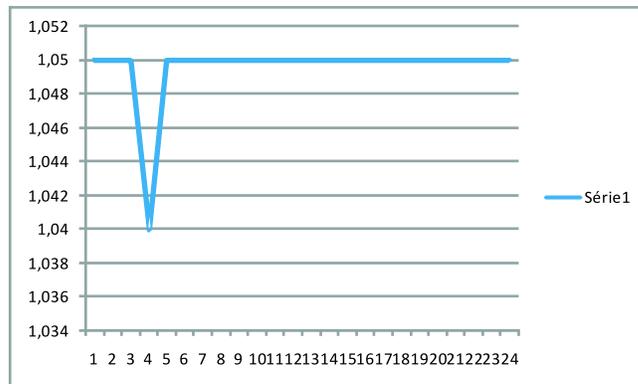
(Figura 8.11 - Evolução do Tap 3 durante o dia)



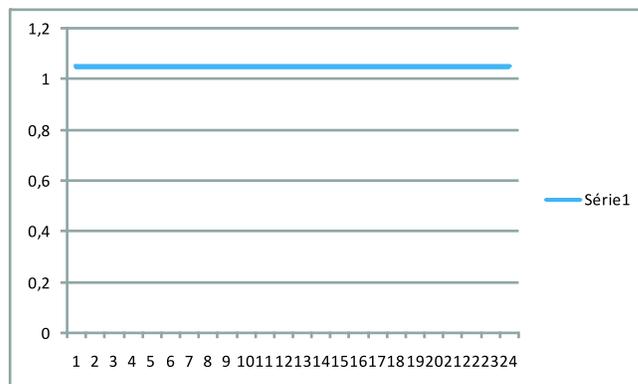
(Figura 8.12 - Evolução do Tap 4 durante o dia)



(Figura 8.13 - Evolução do Tap 5 durante o dia)



(Figura 8.14 - Evolução do Tap 6 durante o dia)



(Figura 8.15 - Evolução do Tap 7 durante o dia)

A aplicação da BT em todos os intervalos de tempo também apresentou um comportamento típico similar ao caso do primeiro intervalo de tempo, mostrando que esta metodologia também é adequada ao problema de despacho de reativos, como o tratado nesta tese.

8.5 Aplicação do Modelo Dinâmico na Operação Diária

O Modelo Dinâmico foi aplicado também aplicado ao problema de Pré-Despacho de Reativo. O MD resolveu o problema de cada intervalo de tempo considerando a solução obtida para o intervalo de tempo anterior. Esta metodologia mostrou-se muito adequado ao problema, pois as condições operativas de um intervalo para outro em geral não alteram tão significativamente, de modo que a solução do intervalo de tempo anterior é bastante próxima da solução do intervalo de tempo sub-sequente. A outra vantagem é o menor esforço computacional. Nestes testes, o MD reduziu o tempo computacional em aproximadamente 80 por cento em relação à BT. Além do mais, em vários intervalos de tempo a solução obtida pelo MD foi melhor do que a BL e a BT, como analisado a seguir.

8.5.1 Comparação da Busca Local, Busca Tabu e Modelo Dinâmico

A Tabela 8.1 apresenta para todos os intervalos de tempo as melhores soluções obtidas pelas três metodologias. Para cada intervalo de tempo, a primeira linha é a solução obtida via BL, a segunda linha é obtida através da BT, e a terceira linha é a solução obtida via o MD. Dos 24 intervalos de tempo, a BT obteve soluções iguais ou melhores do que a BL, e para 10 intervalos de tempo o MD obteve a melhor solução, como pode ser vista na Tabela 8.20. A Tabela 8.2 e a Figura 8.16, Tabela 8.3 e a Figura 8.17, Tabela 8.4 e a Figura 8.18, Tabela 8.5 e a Figura 8.19, mostram as tensões mínimas, máximas e médias, e os desvios quadráticos obtidas pelas metodologias de BL e BT para todos os intervalos de tempo de um dia, respectivamente. Finalmente, a Tabela 8.6 mostra o número de iterações das duas metodologias para cada um dos intervalos de tempo. Neste estudo de caso, a BT realizou aproximadamente 1,5 % a mais de iterações do que a BL. Porém, em cada iteração da BT devido aos movimentos tabus, o número de resoluções de fluxo de carga tendem a serem menores.

Tabela 8.1 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de valores de taps.

	Hora 1								Hora 2						
t=1	1	0,96	1	1,01	1,04	1,05	1,05	t=2	0,99	0,97	1	1	1,05	1,05	1,05
	1	0,98	1	1,01	1,03	1,05	1,05		0,99	0,99	1	1	1,04	1,05	1,05
	1	0,98	1	1,01	1,03	1,05	1,05		0,99	0,97	1	1	1,04	1,05	1,05
	Hora 3								Hora 4						
t=3	0,99	0,97	1	1	1,05	1,05	1,05	t=4	0,99	0,98	1	1	1,03	1,04	1,05
	0,99	0,99	1	1	1,04	1,05	1,05		0,99	0,99	1	1	1,03	1,04	1,05
	0,99	0,99	1	1	1,04	1,05	1,05		1	0,94	1	1	1,05	1,05	1,05
	Hora 5								Hora 6						
t=5	1	0,95	1	1	1,05	1,05	1,05	t=6	0,99	0,98	1	1	1,04	1,05	1,05
	0,99	0,97	1	1	1,05	1,05	1,05		0,99	0,98	1	1	1,04	1,05	1,05
	0,99	0,97	1	1	1,05	1,05	1,05		0,99	0,98	1	1	1,05	1,05	1,05
	Hora 7								Hora 8						
t=7	1	0,98	1	1,01	1,03	1,05	1,05	t=8	1	1	1	1,01	1,02	1,05	1,05
	1	0,98	1	1,01	1,03	1,05	1,05		1	1	1	1,01	1,02	1,05	1,05
	0,99	1,01	1	1	1,04	1,05	1,05		1	1	1	1,01	1,03	1,05	1,05
	Hora 9								Hora 10						
t=9	1	1	1	1,01	1,02	1,05	1,05	t=10	1,01	1	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1	1	1,01	1,02	1,05	1,05		1,01	1	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	0,99	1,03	1	1,01	1,02	1,05	1,05		0,99	1,03	1	1,01	1,02	1,05	1,05
	Hora 11								Hora 12						
t=11	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05	t=12	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,01	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1	1,01	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	Hora 13								Hora 14						
t=13	1,01	1	1	1,02	1,01	1,05	1,05	t=14	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1,01	1	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1	1,01	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	Hora 15								Hora 16						
t=15	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05	t=16	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,01	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1	1,01	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	Hora 17								Hora 18						
t=17	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05	t=18	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,01	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1	1,01	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	Hora 19								Hora 20						
t=19	1,01	1,02	1	1,03	1	1,05	1,05	t=20	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,04	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1,01	1,02	1	1,03	1	1,05	1,05
	1	1,03	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1,01	1,01	1	1,03	1	1,05	1,05
	Hora 21								Hora 22						
t=21	1	1,02	1	1,02	1,01	1,05	1,05	t=22	1,01	1	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,01	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1,01	1	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	1	1,01	1	1,02	1,01	1,05	1,05		1	1	1	1,02	1,01	1,05	1,05
	Hora 23								Hora 24						
t=23	1	1	1	1,01	1,02	1,05	1,05	t=24	1	0,98	1	1,01	1,03	1,05	1,05
	1	1	1	1,01	1,02	1,05	1,05		1	0,98	1	1,01	1,03	1,05	1,05
	1,01	0,97	1	1,02	1,02	1,05	1,05		1	0,97	1	1,01	1,03	1,05	1,05

Tabela 8.2 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de tensões

mínimas.	
BL	BT
0,9828	0,9828
0,9847	0,9847
0,9853	0,9853
0,986	0,986
0,9857	0,9857
0,9837	0,9837
0,9808	0,9809
0,9782	0,9782
0,9762	0,9761
0,9749	0,9749
0,9733	0,9734
0,9736	0,9736
0,9749	0,9749
0,9736	0,9736
0,9729	0,9729
0,9723	0,9723
0,9716	0,9716
0,9699	0,9699
0,9679	0,9679
0,9702	0,9702
0,9726	0,9726
0,9749	0,9749
0,9776	0,9776
0,9805	0,9805

Tabela 8.3 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de tensões máximas.

BL	BT
0,9828	0,9828
1,0057	1,0077
1,006	1,008
1,0063	1,0063
1,0061	1,0062
1,0072	1,0072
1,0078	1,0078
1,0085	1,0085
1,0075	1,0075
1,0089	1,0089
1,0081	1,0081
1,0082	1,0083
1,0089	1,0089
1,0082	1,0083
1,0079	1,0079
1,0076	1,0076
1,0072	1,0072
1,0064	1,0064
1,0074	1,0074
1,0066	1,0066
1,0077	1,0077
1,0089	1,0089
1,0082	1,0082
1,0076	1,0076

Tabela 8.4 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de tensões médias.

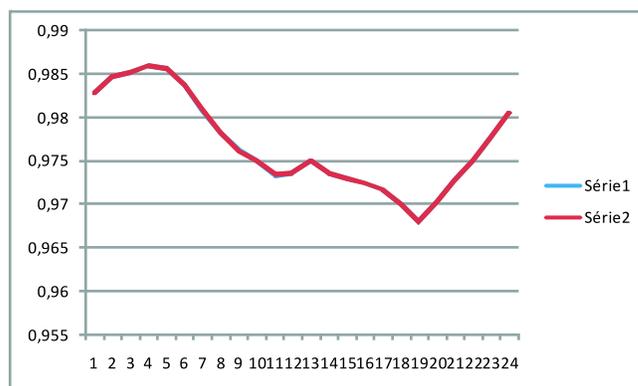
BL	BT
0,9963	0,9964
0,9971	0,9972
0,9975	0,9976
0,9973	0,9973
0,9974	0,9977
0,9966	0,9966
0,9953	0,9953
0,9939	0,9939
0,9927	0,9927
0,9922	0,9922
0,9915	0,9915
0,9917	0,9917
0,9922	0,9922
0,9917	0,9917
0,9913	0,9913
0,9909	0,9909
0,9905	0,9905
0,9895	0,9895
0,9886	0,9886
0,9897	0,9897
0,9911	0,9911
0,9922	0,9922
0,9935	0,9935
0,9951	0,9951

Tabela 8.5 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de desvio quadrático.

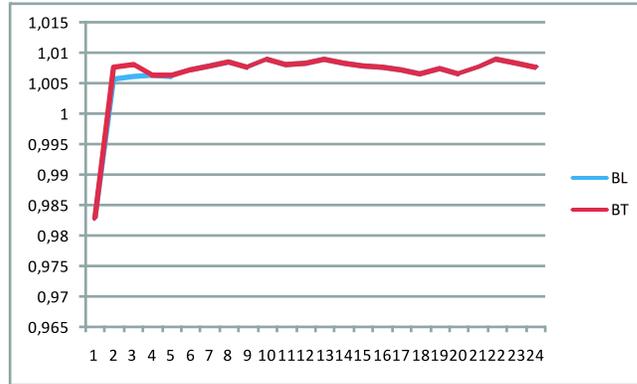
BL	BT
0,1355	0,1365
0,0969	0,0977
0,0871	0,0885
0,082	0,0823
0,082	0,0826
0,1138	0,1138
0,1802	0,1802
0,2569	0,2569
0,3269	0,3269
0,3797	0,3797
0,4504	0,4505
0,4356	0,4357
0,3797	0,3797
0,4356	0,4357
0,4655	0,4657
0,4968	0,4971
0,5295	0,5299
0,6177	0,6184
0,7332	0,7332
0,5993	0,6
0,481	0,4812
0,3797	0,3797
0,2789	0,2789
0,1886	0,1886

Tabela 8.6 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de número de iterações.

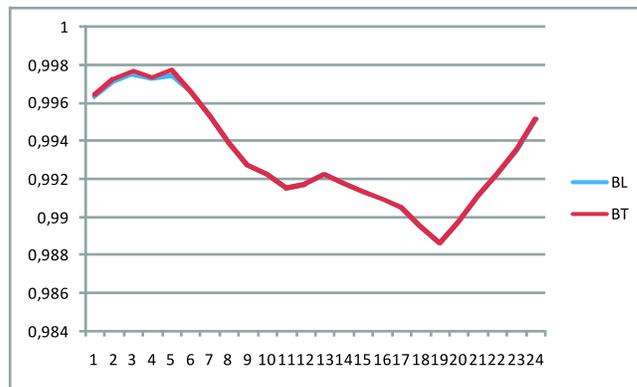
	BL	BT	
1	15	15	
2	15	17	
3	15	18	
4	15	16	
5	15	21	
6	15	17	
7	15	16	
8	13	13	
9	13	13	
10	14	14	
11	15	14	
12	15	14	
13	14	14	
14	15	14	
15	15	14	
16	15	14	
17	15	14	
18	15	14	
19	15	14	
20	15	14	
21	15	14	
22	14	14	
23	13	13	
24	15	15	
Total	351	356	



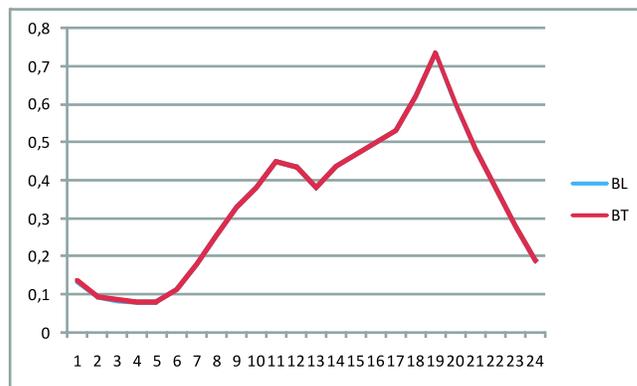
(Figura 8.16 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de tensões mínimas).



(Figura 8.17 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de tensões máximas).



(Figura 8.18 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de tensões médias).



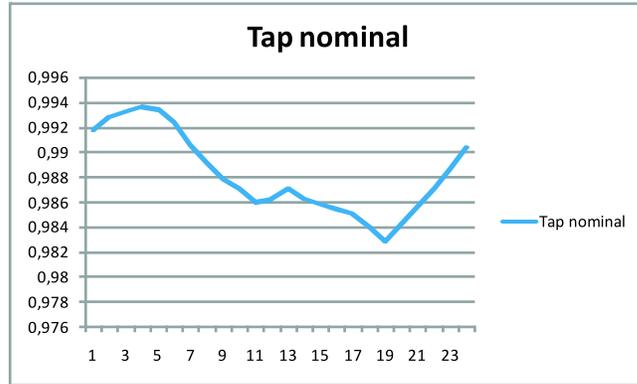
(Figura 8.19 - Comparação das soluções de BT e BL em termos de desvio quadrático).

Tabela 8.20 - Comparação das metodologias BL, BT e MD, em termos de erro quadrático.

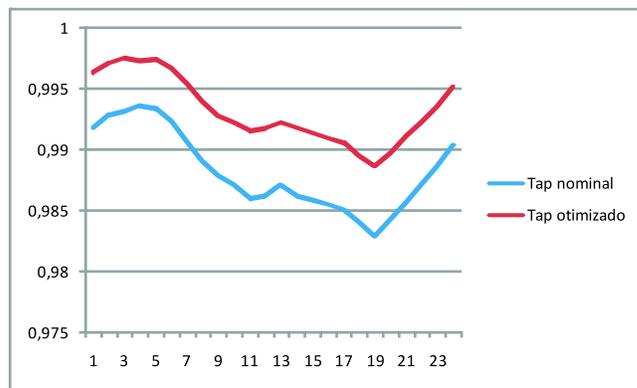
	BL	BT	BTD
1	0,1355	0,133	0,133
2	0,0969	0,0969	0,0967
3	0,0871	0,0871	0,0871
4	0,082	0,082	0,0774
5	0,082	0,082	0,082
6	0,1138	0,1138	0,082
7	0,1802	0,1802	0,1837
8	0,2569	0,2565	0,261
9	0,3269	0,3262	0,3307
10	0,3797	0,3796	0,3818
11	0,4504	0,4504	0,455
12	0,4356	0,4356	0,4348
13	0,3797	0,3796	0,3774
14	0,4356	0,4356	0,4399
15	0,4655	0,4655	0,4673
16	0,4968	0,4968	0,4987
17	0,5295	0,5295	0,5316
18	0,6177	0,6177	0,6244
19	0,7332	0,7332	0,7442
20	0,5993	0,5993	0,5941
21	0,481	0,481	0,4753
22	0,3797	0,3797	0,3755
23	0,2789	0,2789	0,2773
24	0,1886	0,1886	0,1862

8.6 Perfil de Tensão Diário Melhorado

O objetivo das metodologias desenvolvidas era obter um perfil de tensão diário mais adequado do ponto de vista operativo. A Figura 8.20 mostra o perfil de tensão diário obtido pela BT, onde se verifica que o novo perfil de tensão está bem mais próximo de 1,0 p.u.. No caso da BL, o perfil obtido é praticamente idêntico ao caso da BT.



(Figura 8.1 - Tap Nominal).



(Figura 8.20 - Tap Nominal e Tap Otimizado).

Conclusão

Esta tese tratou do problema de despacho e pré-despacho de reativos. Basicamente, foi implementado e testado quatro metodologias para o problema de despacho de reativos. A primeira baseada em AG e FPO visou determinar o despacho de geração de potência reativa e a posição dos tap's buscando minimizar as perdas no sistema de transmissão. Esta metodologia embora otimize a operação do ponto de vista reativo, mostrou-se inadequado ao problema de pré-despacho devido ao alto custo computacional para a resolução de FPO. Dada esta dificuldade, desenvolveu umas outras metodologias, uma utilizando uma busca local e um modelo de fluxo de potência não-linear, e a outra baseada em busca tabu e um modelo de fluxo de potência não-linear. O objetivo da substituição do FPO pelo modelo de fluxo de potência não-linear é diminuir o custo computacional para calcular o estado do sistema de transmissão para cada configuração de taps.

Tanto a BL, como a BT e MD consideram conhecidos os despachos de geração de potências ativa e reativa e atuam sobre o posicionamento dos taps dos transformadores, visando obter um perfil de tensão mais adequado do ponto de vista operativo. Ambas as metodologias utilizam uma busca local em torno de

uma dada solução, avaliando um conjunto de movimentos (mudança de posição nos taps) em torno desta solução e determinando o movimento de maior melhoria. As duas metodologias apresentaram bons resultados, obtendo perfis de tensão mais próximos de 1,0 p.u.. Em termos de eficiência computacional, as duas metodologias apresentaram desempenhos muito próximos.

A BL, a BT e o MD também foram aplicados ao problema de pré-despacho de reativos, onde foi avaliado a operação ao longo de um dia considerando uma curva de carga diária típica. Neste caso considerou-se também conhecido os despachos de geração de potências ativa e reativa conhecidos em cada um dos intervalos de tempo. O problema de pré-despacho foi tratado como uma sequência de problemas de despacho de reativos, um para cada intervalo de tempo. Todos estes problemas foram tratados por BL, BT e MD. As metodologias obtiveram um perfil de tensão diário mais adequado e apresentaram desempenhos computacionais muito próximos.

Em termos de trabalhos futuros, vários aspectos devem ser tratados. A primeira é aplicação destas metodologias em sistemas de maior porte. O outro ponto é a investigação de novas estratégias de busca. Um outro ponto é a inclusão de outras variáveis de decisão, tais como o acionamento de banco de capacitores, unidades síncronas e compensadores.

Referências Bibliográficas

- [1] ABDUL-RAHAMAN, K. H., SAHIDEHPOUR, S. M., "Application of Fuzzy Sets to Optimal Reactive Power Planning with Security Constraints", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, no. 2, pp. 589-597, maio, 1994.
- [2] ADIBI, M.M., MILANICZ, D.P., VOLKMANN, T.L., "Optimizing Generator Reactive Power Resources", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, no. 1, fevereiro, 1999, pp. 319-326.
- [3] ADIBI, M.M., POLYAK, R.A., GRIVA, I.A., "Optimal Transformer Tap Selection Using Modified Barrier-Augmented Lagrangian Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, no. 1, fevereiro, 2003, pp. 251-257.
- [4] AL-AGTASH, S.E., SU, R., "Augmented Lagrangean Approach to Hydro-Thermal Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, no. 4, novembro, 1998, pp. 1323-1330.
- [5] ALMEIDA, K.C. "A General Parametric Optimal Load Flow", Tese de Doutorado, McGill University, Montreal, Canadá, novembro, 1994.

- [6] BAI, S., SHAHIDEHPOUR, S.M., "Hydro-Thermal Scheduling by Tabu Search: an Decomposition Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, no. 2, maio, 1996, pp.968-974.
- [7] BAPTISTELLA, L.F.B., GEROMEL, J.C., "Decomposition Approach to Problem of Unit Commitment for Hydrothermal Power Systems", IEEE Proc., Vol. 127, n. 6, Canadá, novembro, 1980.
- [8] BAUGHMANN, M.L., SIDDIQI, S.N., ZARNIKAU, J.W., "Advanced Pricing in Electrical Systems. Part I:Theory", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, no. 1, fevereiro, 1997 pp. 489-495.
- [9] BONAERT, A.P., EL-ABIAD, A.H., KOIVO, A.J., "Optimal Scheduling of Hydrothermal Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 91, no. 1, 1972, pp.263-270.
- [10] CARPENTIER, J.L. "A New Active-Reactive Decoupling Process in Load Flow, Optimal Load Flow in System Control", Proc. IFAC Conference on Power Systems and Power Plan Control, agosto, 1986, pp. 65-70.
- [11] CHIANG, H.D., FLUECK, A.J., SHAH, K.S., BALU, N., "CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power Systems Steady-State Stationary Behavior due to Load and Generations Variations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, no. 2, maio, 1995, pp. 623-633.
- [12] CORSI, S., MARANNINO, P., LOSIGNORE, N. MORESCHINI, G., PICCINI, G., "Coordination Between the Reactive Power Scheduling Function and the Hierarchical Voltage Control of the EHV ENEL System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, no. 2, maio, 1994, pp.686-694.
- [13] COVA, B., LISIGNORE, N., MARANNINO, P., MONTAGNA, M., "Contingency Constrained Optimal Reactive Power Flow Procedures for Voltage Control in Planning and Operation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, no. 2, maio, 1995, pp. 602-608.

- [14] DEEB, N.I. AND SHAHIDEHPOUR, S.M., "*Decomposition Approach for Minimizing Real Power Losses in Power Systems*", IEE Proceedings-C, Vol. 138, no. 1, janeiro, 1991.
- [15] DENG, Y., REN, X., ZHAO, C., ZHAO, D., "A Heuristic and Algorithm Combined Approach for Reactive Power Optimization with Time-Varying Load Demand in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, no. 4, novembro, 2002, pp.1068-1072.
- [16] DILLON, T.S., "Rescheduling, Constrained Participation Factors and Parameter Sensitivity", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, 1981, pp. 2628-2634.
- [17] DOMELL, H.W., TINNEY, W.F., "*Optimal Power Flow Solutions*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 87, no. 10, pp. 1866-1876, outubro, 1968.
- [18] DORNELLAS, C.R.R., FALCÃO, D.M. AND BOMFIM, A.L.B., "Optimization of the Reactive Dispatch Using Genetic Algorithms", 11o Congresso Brasileiro de Automática, vol. 1, 1996, pp.155-160.
- [19] DUARTE, M.A.Q., "Algoritmo de Busca Tabu usado no Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição", Tese de Mestrado, FEIS, UNESP-ILha Solteira, 1999.
- [20] GAGNON, C.R., BOLTON, J.F., "Optimal Hydro Scheduling at the Bonneville Power Administration", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 97, no. 3, maio/junho, 1978, pp.772-778.
- [21] GARCIA, A.V., MANTOVANI, J.R.S., "Allocation of Reactive in Systems of Electric Power Using a Model Implicitly Coupled", 7o Brazilian Congress of Automatic, Vol. 1, 1988, pp.861-866.
- [22] GLOVER, F., LAGUNA, M., "Tabu Search", Kluwer Academic Publishers, 1997.

- [23] GLOVER, F. "Tabu Search Fundamentals and Uses", Graduate School of Business, University of Colorado, ABRIL, 1995.
- [24] GOLDBERG, D.E., "Genetic Algorithm in Search Optimizations and Machine Learning", Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [25] GOMES, J.R., SAAVEDRA, O.R., "Dispatch of Power Reactive Using Simulated Evolution", 12o Chilean Congres of Ingenieria Eléctrica, Vol. 1, 1997, pp. 59-63.
- [26] GRANVILLE, S., PEREIRA, M.V.F. AND MONTICELLI, A.J., "An Integrated Methodology for VAR Sources Planing in Large Scale Power Systems", IEEE on Power Apparatus and Systems, Vol. 3, No. 2, maio, 1988, pp. 549-557.
- [27] GROSS, G., TAO, S., BOMPARD, E., CHICCO, G., "Unbundled Reactive Support Service: Key Characteristics and Dominant Cost Component", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, no. 2, maio, 2002, pp.283-289.
- [28] GRUDININ, N., "Reactive Power Optimization Using Successive Quadratic Programming Method", ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, no. 4, novembro, 1998, pp. 1219-1225.
- [29] HABIBOLLAHZADEH, H., BUBENKO, J.A., "Application of Decomposition Techniques to Short-Term Operation Planning of Hydrothermal Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, no. 1, maio, 1996, pp.41-47.
- [30] HAO, S., "A Reactive Power Management Proposal for Transmission Operators", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, no. 4, novembro, 2003, pp. 1374-1381.
- [31] HONG, Y., LIU, C., "A Heuristic Algorithm Approach to VAR Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, no. 2, maio, 1992, pp. 505-512.

- [32] HONG, Y., LIAO, C., "Short-Term Scheduling of Reactive Power Controllers", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, no. 2, maio, 1995, pp.860-868.
- [33] HSIAO, Y., CHIANG, H., LIU, C., CHEN, Y., "Computer Package for Optimal Multi-Objective VAR Planning in Large Scale Power Systems", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.9, No. 2, maio, 1994, pp. 668-676.
- [34] HUANG, S.J., HUANG, C.L., "Application of Genetic-Based Neural Network to Thermal Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, no. 2, maio, 1997, pp.654-660.
- [35] IBA, K., "Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, maio, 1994, pp. 685-692.
- [36] JUSTE, K.A., KITA, H., TANAKA, T., HASEGAWA, J., "An Evolutionary Programming Solution to the Unit Commitment Problem", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, no. 4, novembro, 1999, pp.1452-1459.
- [37] LEBOW, W.M., ROUHANI, R., NADIRA, R., USORO, P.B. AND MEHRA, R.K., "The hierarchical Approach to Reactive Volt-Ampère (VAR) Optimization in System Planning", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, No. 8, agosto, 1985, pp. 2051-2057.
- [38] LIMA, F.G.M., "Fluxo de Potência Ótimo Paramétrico", Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas-SP, outubro, 1993.
- [39] LIMA, F.G.M., "Estudos de Fluxo de Potência Ótimo Via Otimização Paramétrica", Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas-SP, julho, 2000.
- [40] LAI, L.L., MA, J.T., "Application of Evolutionary Programming to Reactive Power Planning Comparison with Nonlinear Programming Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, fevereiro, 1997, pp.198-20.

- [41] LIU, C.W., HSIAO, Y.J., "Global Fast Optimization Approach to VAR Planning for the Large Scale Electric Power Systems", IEEE/PES/Summer Meeting/2001.
- [42] LIU, M., TSO, S.K., CHENG, Y., "An Extended Nonlinear Primal-Dual Interior Point Algorithm for Reactive-Power Optimization of Large-Scale Power Systems with Discrete Control Variables", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 4, novembro, 2002, pp.982-991.
- [43] MANTOVANI, J.R.S., "Planning of Reactive in Systems of Electric Power; Solution Through Successive Linear Programming Using a Model Implicitly Coupled", Tese de Mestrado, FEEC, UNICAMP, 1987.
- [44] MANTOVANI, J.R.S., "Um Modelo Heurístico para Solução do Problema de Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica", Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, 1994.
- [45] MANTOVANI, J.R.S AND GARCIA, A.V., , "Heuristic Method for Reactive Power Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, 1996, pp. 68-74.
- [46] MANTOVANI, J.R.S., MODESTO, S.A.G. AND GARCIA. A.V.,, "Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica Utilizando uma Metodologia Mista: Programação Linear-Algoritmo Genético", Anais do XII CBA, Vol. VI, setembro, 1998, pp. 2017-2022.
- [47] MANTOVANI, J.R.S., MODESTO,S.A.G., GARCIA, A.V., , "VAR Planning using Genetic Algorithm and Linear Programming", IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No. 3, 2001, pp. 257-262.
- [48] MERLIN, A., LAUZANNE, B., MAURRAS, J.F, AUGE, J., ZIGLIOLI, M.,, "Optimization of Short-Term Scheduling of EDF Hydraulic Valley with Coupling Constraints: The OVIDE Model", Proc. PSCC, Lausanne, agosto, 1981.

- [49] MODESTO, S.A.G., "Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica Utilizando uma Metodologia Mista: Programação Linear Sucessiva-Algoritmo Genético", Tese de Mestrado, Unesp, Ilha Solteira, SP, 1997.
- [50] MODESTO, S.A.G., OHISHI, T., MOREIRA, F.S., "Um Modelo de Despacho de Reativos através de Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo", XXXIII-Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), Campos do Jordão, 2001.
- [51] MODESTO, S.A.G., OHISHI, T., "Uma Metodologia de Cálculo de Valores de Taps no Problema de Despacho de Reativos através de Busca Tabu e Fluxo de Carga Não-Linear", Controle & Automação (submetido).
- [52] MOREIRA, F.S., "Um Modelo de Pré-Despacho com Margem de Estabilidade de Tensão, Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas-SP, 2001.
- [53] NANDA, J., BIJWE, P.R., "Optimal Hydrothermal Scheduling with Cascaded Plants Using Progressive Optimality Algorithm", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. 100, No. 4, 1981, pp.2093-2099.
- [54] NEDWICK, P., MISTR, A.F., GROASDALE, E.B., "Reactive Management: A Key to Survive in the 1990s", IEEE Transactions on Power System, Vol. 10, No. 2, maio, 1995, pp.1036-1043.
- [55] NEPOMUCENO, L., SANTOS, A., "A Equivalent Optimization Model for Loss Minimization: Suitable Analysis Approach", IEEE Transactions on Power System, Vol. 12, No. 4, novembro, 1997, pp. 1403-1412.
- [56] NEPOMUCENO, L., OHISHI, T., SOARES, S., "Uma Metodologia de Pré-Despacho AC co Base em um Modelo de FPO Newton", SBA Controle & Automação, jan./abril, 2000.
- [57] OHISHI, T., SOARES, S., CARVALHO, M.F.H., "A Short-Term Hydrothermal Scheduling Approach for Dominantly Hydro Systems", IEEE Transactions on Power System, Vol. 6, No. 2, maio, 1991, pp.569-575.

- [58] PEREIRA, M.V.F., PINTO, L.M.V.G., "A Decomposition Approach to the Economic Dispatch of Hydrothermal Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. 101, No. 10, 1982, pp.3851-3860.
- [59] RAMOS, J.L.M., EXPÓSITO, A.G., CEREZO, J.C., RUIZ, E.M., SALINAS, Y.C., "Hybrid Tool To Assist the Operator in Reactive Power/Voltage Control and Optimization", IEEE Transactions on Power System, Vol. 10, No. 2, maio, 1995, pp. 760-768.
- [60] RIBEIRO FILHO, J.L., TRELEAVEN, P.C., ALLIPI, C., "Genetic Algorithms Programming Environments, Computer", Vol. 27, No. 6, 1994, pp. 28-43.
- [61] RUDOLF, A., BAYRLEITHNER, R., "A Genetic Algorithm for Solving the Unit Commitment of a Hydro-Thermal Power Systems", IEEE Transactions on Power System, Vol. 14, No. 4, novembro, 1999, 1460-1468.
- [62] SOARES, S., OHISHI, T. "Hydro-Dominated Short-Term Hydrothermal Scheduling Via Hybrid Simulation-Optimization Approach: A Case Study", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 142, No. 6, novembro, 1995.
- [63] SRINIVAS, M. AND PATNAIK, L.M., "Genetic Algorithms: Survey", Computer, Vol.27, No. 6, 1994, pp. 17-26.
- [64] STOTT, B. AND ALSAC, O., "Experience with Linear Successive Programming for Optimal Rescheduling of Active Reactive Power", CIGRE/IFAC Symposium on Control Applications to Power System Security, 1983.
- [65] SUN, D.I., ASHLEY, B., BREWER, B., HUGUES, A., TINNEY, W.F., "Optimal Power Flow by Newton Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, n. 10, outubro, 1984, pp.2864-2880.
- [66] SUN, D.I., HUGUES, A., TINNEY, W.F., BRIGTH, J.M., LAMONT, J., "Optimal Power Flow Solution by Newton's Method", IEE Tutorial Course Reactive Problems: Basics, Problems and Solutions", pp. 35-48.

- [67] SUN, D.I., SHOULTS, R.R., "A Preventive Strategy Method for Voltage and Reactive Power Dispatch", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 104, n. 7, maio, 1985, pp.1670-1676.
- [68] VALENCIA, M.M., "Um Modelo de Decisão Baseado em Conjuntos Nebulosos Aplicados ao Planejamento de Operação de Sistemas de Energia Elétrica", *Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 1993.*
- [69] VENKATSH, B., SADASIVAM, G., KHAN, M.A., "A New Optimal Reactive Power Scheduling Method for Loss Minimization and Voltage Stability Margin Maximization Using Successive Multi-Objective Fuzzy LP Techniques", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, n. 2, maio, 2000, pp.844-851.
- [70] WAKAMORI, F., MASUI, S., MORITA, K., SUGIYAMA, T., "Layred Network Model Approach to Optimal Daily Hydro Scheduling", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, n. 9, setembro, 1982, pp.3310-3314.
- [71] WAKAMORI, F., MASUI, S., MORITA, K., SUGIYAMA, T., "Short-Term Generation Scheduling of Hydraulic Multi-Reservoir Multi-Area Interconnected System ", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 2, n. 3, setembro, 1997, pp. 77-83.
- [72] WANG, S.J., SHAHIDEHPOUR, S.M. KIRSCHEN, D.S., MOKHTARI, S., IRISARRI, G. D., "Short-Term Generation Scheduling with Transmission and Environmental Constraints Using an Augmented Lagrangian Relaxation", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 10, No. 3, agosto, 1995, pp. 1294-1301.
- [73] WEI, H., SASAKI, H., KUBOKAWA, J., "A Decoupled Solution of Hydro-Thermal Optimal Flow Problem by Means of Interior Point Method and Network Programming", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, n. 2, setembro, 1998, pp. 286-293.
- [74] WEI, H., SASAKI, H., KUBOKAWA, J., YOKOYAMA,R., "Large Scale Hydrothermal Optimal Power Flow Problem Based on Interior Point Nonlinear Programming",

- IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, n. 1, 2000, pp. 396-403.
- [75] WU, Q. H., DOG, Y. J., WEN J.Y., "Optimal Reactive Power Dispatching using an adaptive genetic algorithm", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 8, 1998, pp. 563-569.
- [76] ZAMMIT, M.A.B., HILL, D.J., KAYE, R.J., "Designing Ancillary Service Markets for Power Systems Security", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, n. 2, maio, 2000, pp.675-680.
- [77] ZHONG, J., BHATTACHARYA, K., "Design of Competitive Markets for Spinning Reserve Services", IEEE/PES 2002-Summer Meeting, julho, 2002, Chicago.
- [78] ZHONG, J., BHATTACHARYA, K., "Toward a Competitive Market for Reactive Power", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, n. 4, novembro, 2002, pp.1206-1215.