



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**CONSIDERAÇÃO DA REAÇÃO DO SISTEMA DE
POTÊNCIA EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO DO
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

Cedrick Calhau Fontes

Dissertação de Mestrado PPGEE-44/2003
Orientador: Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel

junho de 2003



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Cedrick Calhau Fontes

CONSIDERAÇÃO DA REAÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, elaborada sob a orientação do Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel.

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Belo Horizonte
2003

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Aluízio e Maria Aparecida e minha irmã Jéssica por sempre terem acreditado e me apoiado

A minha esposa querida e amada Ana Elisa por sempre acreditar em mais uma vitória em nossas vidas e pelo seu espírito de luta

Ao meu orientador e professor Dr. Peter Ekel por todo conhecimento transmitido

Aos professores, amigos e funcionários da PUC

À FAPEMIG

RESUMO

O presente trabalho é dedicado ao desenvolvimento e estudo das diferentes abordagens para a construção de modelos para a consideração da reação de sistemas de potência em problemas de otimização da configuração das redes em sistemas de distribuição.

Levando em consideração que a análise direta da reação do sistema de potência é difícil de realizar, os caminhos estudados são relacionados à construção de modelos (equivalentes) funcionalmente orientados exatos e aproximados que permitem estimar a reação do sistema de potência associada com transferência ou tentativa de transferência de locação (locações) da desconexão em rede de distribuição. A disponibilidade dos equivalentes indicados abre a possibilidade de utilizar os diversos métodos para resolver os problemas da escolha dos lugares ótimos de desconexão em redes de distribuição considerando-se a reação dos sistemas de potência.

Questões relativas à construção racional dos modelos exatos com base em aplicação das noções dos coeficientes de distribuição e impedâncias de influência são consideradas. Outra alternativa de estimação da reação dos sistemas de potência é associada com a aplicação das técnicas do planejamento fatorial de experimentos para a construção dos modelos aproximados que também são os equivalentes funcionais. É mostrada a racionalidade da utilização do planejamento fatorial de experimentos fracionais para a obtenção dos equivalentes funcionais com uma estrutura dada. As particularidades da análise estatística (relacionada à verificação da significância dos coeficientes dos modelos e a verificação da adequação dos modelos) são estudadas e os caminhos de superação das dificuldades, em particular, associadas com ausência dos resultados dos experimentos computacionais paralelos são discutidos. As correspondentes recomendações são elaboradas.

A utilização dos resultados dessa dissertação permite aumentar a adequação dos modelos usados em solução de um dos mais importantes problemas de planejamento e operação de sistemas de distribuição – otimização da configuração das redes e em consequência, o fundamento e a eficiência real das soluções, que podem ser obtidos com base em suas aplicações.

ABSTRACT

The present work is dedicated to the development and investigation of different approaches for the construction of models for taking into account power system reaction in problems of optimizing configuration of networks in distribution systems.

Considering that direct analysis of power system reaction is difficult to realize, investigated ways are related to the construction of exact and approximate models (equivalents), which are functionally oriented, and permit one to estimate power system reaction associated with transference or an attempt of transference of a location (locations) of disconnection in a distribution network. The availability of the indicated equivalents opens up the possibility of utilizing diverse methods to resolve problems of choosing optimal places of disconnection in distribution networks taking into account power system reaction.

Questions related to the rational construction of exact models on the basis of applying the notions of distribution coefficients and influence impedances are considered. Another alternative of estimating power system reaction is associated with the application of techniques of factorial experimental design for constructing approximate models, which are functional equivalents as well. It is demonstrated the rationality of utilizing fractional factorial experimental design for obtaining functional equivalents with a given structure. Peculiarities of statistical analysis (related to testing of significance of model coefficients and testing of model adequacy) are studied and ways of overcoming difficulties, in particular, associated with the lack of parallel computational experiment results are discussed. The corresponding recommendations are elaborated.

The utilization of the dissertation results permits one to increase the adequacy of used models in solving one of the most important problems of planning and operation of distribution systems – optimization of network configuration and, as a result, the validity and real efficiency of solutions, which can be obtained on the basis of their applications.

SUMÁRIO

Lista de Figuras e Tabelas.....	v
Lista de Símbolos e Correlações.....	vii
Resumo.....	viii
Abstract.....	x
Organização do Trabalho.....	xii
Capítulo 1 – Introdução	
1.1 – Considerações Gerais.....	01
1.2 – Revisão Bibliográfica de Métodos de Solução do Problema.....	05
1.3 – Objetivos da Dissertação.....	11
1.4 – Contribuições do Trabalho.....	11
Capítulo 2 – Modelos Exatos de Estimção de Reação do Sistema de Potência	
2.1 – Considerações Gerais.....	13
2.2 – Estimção da Reação do Sistema de Potência com Base em Expressões Gerais de Matrizes.....	14
2.2.1 – Construção do Modelo.....	14
2.2.2 – Exemplo de Estimção da Reação do Sistema de Potência.....	18
2.3 – Construção de Equivalentes Funcionais com Base em Coeficientes de Distribuição e Impedâncias de Influência.....	26
2.3.1 – Noções de Coeficientes de Distribuição e Impedâncias de Influência e seus Cálculos.....	28
2.3.2 – Exemplo de Estimção da Reação do Sistema de Potência com Base em Equivalentes Funcionais.....	34
Capítulo 3 – Equivalentes Funcionais Construídos com Base em Planejamento de Experimentos	
3.1 – Considerações Gerais.....	37
3.2 – Planejamento Fatorial de Experimentos Completos.....	37

3.3 – Planejamento Fatorial de Experimentos Fracionais.....	43
3.4 – Utilização de Planejamento Fatorial de Experimentos Para Estimação da Reação do Sistema de Potência.....	47
Capítulo 4 – Análise Estatística dos Equivalentes Funcionais	
4.1 – Considerações Gerais.....	53
4.2 – Análise Estatística com Experimentos Paralelos.....	54
4.3 – Análise Estatística Associada com a Construção Artificial das Estimativas da Dispersão de Reprodutibilidade.....	61
Capítulo 5 – Conclusão	
5.1 – Conclusões Sobre o Trabalho.....	71
5.2 – Proposições Para Trabalhos Futuros.....	74
Referências Bibliográficas.....	75

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Sistema de Potência.....	19
2.2 – Esquema das Admitâncias.....	20
2.3 – Sistema com Transferência de Localização de Desconexão entre as Barras 3 e 4.....	24
2.4 – Esquema para Cálculo das Impedâncias de Influência.....	31
3.1 – Interpretação Geométrica dos Efeitos num Planejamento 2^2	41

LISTA DE TABELAS

2.1 – Dados das Linhas de Transmissão.....	19
2.2 – Dados dos Transformadores (130 / 138 kV).....	20
2.3 – Impedâncias e Admitâncias dos Ramos (Reduzidos para 138 kV).....	21
2.4 – Curvas de Carga das Barras do Sistema (A).....	21
2.5 – Coeficientes de Distribuição das Barras 3 e 4.....	35
3.1 – Matriz para o Planejamento de Experimento Completo 2^2	39
3.2 – Matriz para o Planejamento de Experimento Completo 2^3	42
3.3 – Matriz para o Planejamento 2^{7-4} , com os Correspondentes Valores de Cada Fator para as Barras 3 e 4.....	49
3.4 - Matriz para o Planejamento 2^{7-4} , com os Correspondentes Valores de Cada Fator para as Barras 2 e 6.....	52
4.1 – Matriz do Planejamento 2^{7-4} para Análise Estatística com Experimentos Paralelos.....	60
4.2 - Matriz do Planejamento 2^{7-4} para Análise Estatística com Estimativas da Dispersão de Reprodutibilidade.....	64

4.3 - Matriz do Planejamento 2^{7-4} para Análise Estatística com Estimativas da Dispersão de Reprodutibilidade em Dependência do Erro Máximo Possível.....	66
4.4 – Análise de Erro: Variação de Carga de $\pm 10\%$	69
4.5 - Análise de Erro: Variação de Carga de $\pm 20\%$	70

LISTA DE SÍMBOLOS E CORRELAÇÕES

- [I] : Vetor de corrente das barras
- [V] : Vetor de tensões das barras
- [Y] : Matriz de admitâncias das barras
- [Z] : Matriz de impedâncias das barras
- S_i : Potencia injetada na barra i
- $\Delta P + j\Delta Q$: Perdas totais do sistema
- $\delta(\Delta P_{l,m})$: Incremento de perdas entre as barras l e m
- [A] : Matriz de incidências de barras
- [Y_p] : Matriz de admitâncias primitivas
- [R] : Matriz de resistências das barras
- ΔV_j : Queda de tensão para qualquer ramo j
- R_{lm} : Resistência de influência
- X_{lm} : Reatância de influência
- \tilde{x}_p : Fatores normalizados do modelo
- x_p^0 : Valores médios da variação dos fatores
- Δx_p : Intervalos de variação dos fatores
- b_p : Coeficientes do modelo
- $S_n^2\{y\}$: Dispersão para qualquer ponto de experimento
- $S_{rep}^2\{y\}$: Dispersão de reprodutibilidade
- $S^2\{b_p\}$: Dispersão dos coeficientes do modelo
- t_p : t -relações para os coeficientes do modelo
- $S_{ad}^2\{y\}$: Dispersão de adequação

ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo introduz o tema, apresentando os objetivos, a relevância e um apanhado da revisão bibliográfica descrevendo os métodos de solução dos problemas de otimização de configuração de redes em sistema de distribuição. Introduz também o trabalho proposto e apresenta sua contribuição.

Capítulo 2 – Modelos Exatos de Reação do Sistema de Potência

Neste capítulo são considerados dois caminhos para a construção de modelos exatos que podem refletir a reação dos sistemas de potência em problemas de otimização de sistema de distribuição. É feita uma descrição teórica dos dois caminhos indicados com os respectivos exemplos de estimação da reação do sistema de potência.

Capítulo 3 – Equivalentes Funcionais Construídos com Base em Planejamento de Experimento

Este capítulo apresenta uma outra abordagem para a construção dos equivalentes funcionais dos sistemas de potência para estimar sua reação em problemas de otimização de configuração de redes em sistemas de distribuição associada com a utilização de modelos aproximados. É descrita neste capítulo a técnica de planejamento de experimentos utilizada na construção dos modelos aproximados. É apresentado também exemplos de utilização de planejamento fatorial de experimento para a estimação da reação do sistema de potência.

Capítulo 4 – Análise Estatística dos Equivalentes Funcionais

Neste capítulo são estudadas as técnicas da análise estatística dos modelos aproximados construídos com base no planejamento de experimentos. Com essa análise é possível definir o estado final e o nível de adequação dos modelos que permitem avaliar a reação do sistema de potência.

Capítulo 5 – Conclusão

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões sobre os resultados mais relevantes e suas aplicações. Finalizando, são apresentadas algumas proposições para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais

No estágio de desenvolvimento em que se encontra a economia brasileira, o problema do aumento da eficiência do setor energético torna-se bastante relevante. Uma das mais importantes direções para a aceleração do progresso científico-técnico no setor energético da economia nacional e o aumento de sua eficiência é a automatização em grande escala do planejamento e operação de sistemas e subsistemas de potência.

Os problemas de planejamento e operação de sistemas de potência no Brasil, são resolvidos pelas divisões da ELETROBRÁS, seu Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), companhias de energia, universidades, companhias de pesquisas e desenvolvimento e etc. Os resultados obtidos permitiram criar os fundamentos para formação e desenvolvimento bem sucedidos dos sistemas automatizados de planejamento e operação para os níveis superiores dos sistemas de potência. Esses sistemas garantem os altos índices técnico-econômicos de funcionamento do setor energético e o aumento de confiabilidade e qualidade de fornecimento de energia elétrica considerando todos os aspectos temporais e situacionais do planejamento e operação.

Em relação aos sistemas de distribuição, que são parte importante dos sistemas de potência, a automatização do planejamento e operação também permite aumentar a eficiência de funcionamento para todos os índices que refletem a confiabilidade, qualidade e eficiência econômica de fornecimento de energia

elétrica, na solução de problemas tradicionais e também novos, que são geradas pelas condições modernas de desenvolvimento energético. A importância e utilidade dessa automatização estão associadas com as circunstâncias a seguir.

Os sistemas de distribuição atuais (que representam a grande parte do complexo energético do país) são caracterizados pela: variedade dos consumidores, número essencial de elementos diversos das tensões nominais diferentes, a diversidade de funções e influências mútuas dos problemas (tradicionais e novos) que surgem no gerenciamento de seu funcionamento e desenvolvimento.

De acordo com dados de [1], no ano 2000, a extensão das redes de distribuição de média e baixa tensão foi de 1.815.200 km e a extensão das redes de transmissão foi de somente 184.200 km. De acordo com [2], as perdas de energia nos sistemas de distribuição excedem a 50% do total das perdas da geração, transmissão e distribuição.

O nível de energia total não suprida por causa de falhas em sistemas de distribuição, constitui parte essencial de energia não suprida total. Além disso, em sistemas de distribuição são concentrados os meios básicos de influência nos índices de qualidade de energia elétrica. Deste modo, o planejamento e operação racionais dos modos de operação dos sistemas de distribuição e sua automatização devem ser considerados como problemas de grande importância. Esta particularidade é real para o caso brasileiro por possuir enormes áreas e elevado índice de desenvolvimento industrial.

Entretanto, no momento só é possível encontrar a solução, no âmbito dos sistemas automatizados, de parte insignificante dos problemas de planejamento e operação. Muitos dos problemas não são considerados na sua totalidade ou considerados de maneira simplificada, com base empírica-intuitiva (sem

utilização de métodos de modelagem e otimização e sem consideração de muitos fatores).

Levando em consideração o exposto, a expansão essencial dos limites dos problemas de planejamento e operação de sistemas de distribuição, resolvidos dentro de uma estrutura dos sistemas automatizados, incluindo diferentes níveis de hierarquia temporal, é importante e atual do ponto de vista de melhorar a eficiência de sistemas de distribuição. Além disso, essa expansão pode permitir reduzir o nível de trabalho intenso e desqualificado do quadro de funcionários, e desta forma, aproveitar melhor a sua capacitação intelectual.

Entre a variedade de problemas que surgem no planejamento e operação de sistemas de distribuição, um lugar especial é ocupado pelo problema de otimização de configuração de redes.

A reconfiguração de redes (otimização de lugares de desconexão) está associada com alteração das estruturas topológicas das redes através da mudança do estado de suas chaves (fechado/aberto) [3].

Tradicionalmente, a otimização de configuração das redes é considerada como um dos mais efetivos meios de redução de perdas de potência e perdas de energia sem despesas [4]. Em particular, o trabalho [5] inclui a experiência de otimização de configuração das redes de distribuição em 36 cidades (sistema de potência “Donbassenergo”). Os resultados dessas otimizações permitiram reduzir as perdas de energia elétrica em redes de distribuição de 6 e 10 kV dessas cidades entre 10 e 40 %. O trabalho [6] também inclui informações sobre a eficiência dessa medida. Em particular, são considerados os resultados dos cálculos conduzidos para a rede de distribuição de 6 kV da cidade. Essa rede inclui 520 linhas (30% subterrâneo e 70% aéreo). A alimentação dessa rede é realizada por três subestações 35-110/6 kV. A maior parte dos consumidores tem o caráter

residencial. A rede inclui 67 lugares de desconexão. Como resultado dos cálculos de otimização, realizados para horário de carga máxima, foram recebidas as recomendações sobre a necessidade da transferência de 44 lugares de desconexão. As perdas de potência foram reduzidas de 392,4 kW (configuração inicial) para 264,3 kW (configuração ótima). As perdas totais de energia elétrica foram reduzidas de 7.255,3 kWh para 4.991,4 kWh.

As pesquisas realizadas mais tarde [7], [8], mostram convincentemente que a otimização de lugares de desconexão também tem influência essencial no nível de confiabilidade e qualidade de energia elétrica.

Além disso, o trabalho [9] considera que a reconfiguração de redes pode ser realizada para reduzir as perdas e também para evitar as sobrecargas em redes (problema de balanceamento de carga) em diferentes condições de operação. Existe outro problema de restauração de serviço [9], [10], que também pode ser considerado como um problema especial de balanceamento de carga.

Todos os problemas indicados acima surgem em todas etapas de planejamento e também diretamente no processo de operação [11], [12] de sistemas de distribuição. Além disso, a reconfiguração das redes pode ser utilizada em estudos de projeto [9], [13]. Finalmente, o interesse crescente sobre o problema de reconfiguração de redes é associado com a automatização ampla dos sistemas de distribuição, que cada vez mais contém equipamentos para comutações, monitorados e controlados remotamente, permitindo considerar o problema de reconfiguração como um problema “on-line”, de tempo real (por exemplo, [9], [11]).

Desta forma, a otimização de configuração de redes em sistemas de distribuição tem grande variedade de aplicações e também influências nos diferentes índices de modos de operação dos sistemas de distribuição.

1.2 - Revisão Bibliográfica de Métodos de Solução do Problema

Muitos trabalhos foram dedicados a solução do problema de otimização de configuração de redes em sistemas de distribuição. A classificação desses trabalhos pode ser associada com a comunidade dos métodos matemáticos e também técnicas de inteligência artificial, que foram utilizados para sua solução.

Em particular, é possível distinguir o grupo dos trabalhos [7], [8], [11], [14]-[16], baseados na utilização de métodos de busca direta (métodos diretos de otimização). Condicionalmente, é possível dizer, que esses trabalhos utilizam as modificações diversas do método de descida coordenada com a estimação da eficiência da mudança de lugares de desconexão com cálculo direto do incremento de perdas, utilizando fluxo de potência. Por isso, por exemplo, o trabalho [16] inclui os algoritmos efetivos para o cálculo de fluxo de potência aproximado.

O trabalho [17] inclui a tentativa de converter o problema de determinação do estado das chaves da rede pela seqüência dos subproblemas contínuos de programação quadrática.

Uma técnica de otimização baseada na variação especial do método de ramos e fronteiras, foi utilizada em [18] para resolver o problema de reconfiguração com formulação dentro de uma estrutura de modelo de otimização não-linear misto-inteira. A peculiaridade de [18] está associada com o fato que todas as chaves são inicialmente fechadas, convertendo a rede real a uma rede com malhas. O processo de otimização está associado com a abertura, passo o passo, das chaves para restabelecer a configuração radial com o nível mínimo de perdas. O trabalho [19] aperfeiçoa os resultados de [18] do ponto de vista de convergência à solução ótima ou quase ótima para redes de tamanho real, de recursos computacionais necessários, independente da solução final do estado inicial das chaves da rede.

Numerosos trabalhos (por exemplo, [3], [9], [20], [21]) foram dedicados ao desenvolvimento dos algoritmos heurísticos. Em particular, o trabalho [20] está associado com o método de busca baseado na “mudança de ramos”. Considerando que a rede radial corresponde à árvore definida pelo grafo da rede, os ramos de conexões são selecionados e trocadas com ramos do grafo. Esses procedimentos geram a árvore nova. Para realizá-los, o índice heurístico especial foi proposto (para reduzir as perdas e também como para balanceamento de carga).

O trabalho [3] pode ser considerado como o desenvolvimento de [20]. Esse trabalho oferece a fórmula simples para estimar os incrementos de perdas para as correspondentes “mudanças de ramos”. O trabalho [3] inclui a descrição do mecanismo de filtro para diminuir o número dos “candidatos para mudanças”. O trabalho [9] pode ser considerado como o desenvolvimento de [3]. Esse trabalho utiliza os critérios diferentes para escolher o ramo, que deve ser trocado. Para ajudar a busca, dois métodos do cálculo de fluxo de potência aproximado foram desenvolvidos com a variação de grau de precisão dos cálculos. Esses métodos são simples e efetivos e, geralmente, provém a estimativa conservativa da redução de perdas.

Em [21] a solução é baseado na utilização do algoritmo heurístico, que está associado com a concepção de fluxo de potência ótimo padrão (*optimum flow pattern*). Esse fluxo de potência padrão é definido pela solução das equações das leis de Kirchhoff para tensões e correntes. O padrão de fluxo ótimo de potência de malha única é definido através do fechamento artificial dessa malha com a busca do lugar ótimo de abertura da chave correspondente. Esse processo repete-se até o mínimo de perdas ser alcançado. O trabalho [21] também inclui o desenvolvimento do método para o cálculo rápido de fluxo de potência aproximado.

A técnica de “*simulated annealing*” (por exemplo, [22]) é utilizada em trabalhos [23-25] para desenvolver os algoritmos da solução do problema de reconfiguração. A propriedade importante da abordagem de [23], [24] está associada com a possibilidade de formular o problema dentro de uma estrutura do modelo de otimização bicritério, considerando simultaneamente os objetivos de redução de perdas e de balanceamento de carga.

Os trabalhos recentes na área estão associados com a utilização das idéias e métodos de inteligência artificial. Por exemplo, o trabalho [26] é baseado na construção de estratégias de busca heurística, realizadas dentro de uma estrutura do sistema baseado em conhecimento. Os trabalhos [27], [28] utilizam a tecnologia dos sistemas especialistas na maneira mais ampla para resolver o problema.

Os algoritmos genéticos são utilizados em trabalhos [29]-[32] para resolver o problema de reconfiguração. Entre esses trabalhos é possível distinguir o trabalho interessante [32], onde a abordagem de Bellman-Zadeh [33] para tomada de decisões em ambiente fuzzy é utilizada para a construção da função “*fitness*”, que é a agregação correspondente dos objetivos e das restrições.

Finalmente, os trabalhos [34], [35] utilizam a técnica das redes neurais artificiais. Em particular, o trabalho [34] utiliza redes neurais para a estimação do nível das cargas para o regime dado e também próprio, para a definição da topologia apropriada da rede de distribuição. O trabalho [35] é baseado na metodologia, que associa as melhores propriedades de dois algoritmos conhecidos de “*back propagation*” e de Marquardt-Levenberg para o melhoramento da convergência de treinamento das redes neurais utilizadas para a definição da topologia ótima da rede de distribuição.

De tal forma, existem muitas abordagens e correspondentes grupos dos trabalhos associados com a solução do problema de otimização de configuração das redes em sistemas de distribuição. Caracterizando em geral todos esses trabalhos, é necessário ressaltar, que eles “competem” na aspiração de receber as soluções “mais ótimas”. Entretanto, essa aspiração não é suficientemente convincente, considerando-se a combinação de incerteza das informações e a estabilidade relativa de soluções ótimas que geram as regiões de incerteza das soluções [36], [37]. Isso é excepcionalmente correto para os sistemas de distribuição, onde o efeito de incerteza (ambiguidade, etc.) das informações (que está associada com o número insignificante de equipamentos para medição, a impossibilidade de fazer medidas ao mesmo tempo, etc.) é bastante significativo. Ao mesmo tempo, os trabalhos indicados acima não permitem considerar a reação do sistema de potência quando resolvemos o problema de otimização de configuração de redes em sistemas de distribuição.

Os modos de operação dos sistemas de distribuição e dos sistemas de potência (sistemas de alimentação) são unidos de perto. Em particular, qualquer alteração da configuração das redes de distribuição, leva a redistribuição das cargas das subestações dos sistemas de potência, mudança de fluxo de potência e, conseqüentemente, de perdas no sistema de potência.

A falta de consideração da mudança de perdas no sistema de potência não somente pode levar à diminuição da eficiência de reconfiguração das redes de distribuição, mas também pode levar ao efeito negativo [16], [38]. De tal forma, é necessário minimizar as perdas totais em sistemas de distribuição e também em sistemas de potência com o âmbito de solucionar os problemas de reconfiguração das redes de distribuição. Em outras palavras, é necessário considerar a reação do sistema de potência para todo passo de otimização, utilizando, por exemplo, os trabalhos [7], [8], [11], [14]-[16], ou para toda “mudança de ramos”, com os resultados dos trabalhos [3], [9], [20], etc. Essa consideração pode e deve servir

como a base para o aumento real de adequação dos modelos de otimização e, como resultado, de eficiência real das soluções, que podem ser obtidas com base em sua aplicação. Por isso, o problema de consideração da reação dos sistemas de potência em problemas de otimização dos sistemas de distribuição foi escolhido para realização dessa pesquisa.

A consideração direta da reação do sistema de potência é difícil de realizar, devido ao grande volume de informações sobre parâmetros e modos de operação do sistema de potência e do sistema de distribuição. Por isso, a dissertação presente está associada com o desenvolvimento e pesquisa de diferentes abordagens para construção de modelos (equivalentes diversos) para estimar a reação do sistema de potência para um passo (uns passos) arbitrário (s) de otimização sob transferência ou tentativa de transferência de locação (locações) da desconexão da malha arbitrária da rede de distribuição. Essa colocação permite utilizar diretamente, por exemplo, os métodos de otimização de passo (descida coordenada simples, descida coordenada com busca de coordenada mais efetiva, descida coordenada com busca de passo mais efetivo, etc.). A experiência [8], [16] mostra que esses métodos são suficientemente flexíveis e podem ser adaptados para diferentes estratégias práticas de busca de solução. Por exemplo, a descida coordenada com busca da coordenada mais efetiva pode garantir a busca da malha com maior influência no nível das perdas, e a descida coordenada com busca do passo mais efetivo pode garantir o local da desconexão, a qual mudança tem influência essencial no nível das perdas (que é importante com ponto de vista prático). Além disso, os métodos indicados acima podem ser utilizados diretamente em otimização multicritério das redes em sistemas de distribuição [12]. Ao mesmo tempo, a disponibilidade dos equivalentes indicados acima abre a possibilidade de utilizar todos os outros métodos de otimização e técnicas de inteligência artificial para resolver o problema da escolha dos lugares ótimos de desconexão em redes de distribuição, considerando a reação dos sistemas de potência.

Um caminho principal, que pode ser utilizado para a construção de modelos (equivalentes) para estimar a reação do sistema de potência e que é o objetivo dessa dissertação, está associado com o uso de expressões gerais de matrizes (por exemplo, [39]-[41]). Ao mesmo tempo, a experiência dos trabalhos [42], [43] mostra que a utilização da técnica de planejamento de experimentos [44]-[46] em problemas de engenharia de potência permite construir os modelos aproximados orientados funcionalmente (modelos com a estrutura dada) no caminho racional: o objetivo do planejamento de experimentos é organizar os experimentos (com um sistema real ou seu modelo) para maximizar a quantidade de informações, recebidos de um número mínimo de experimentos. Além disso, o planejamento de experimentos permite simultaneamente realizar a verificação estatística de confiabilidade dos resultados obtidos: identificação e eliminação de fatores que não são significativos e também verificação de adequação de modelos construídos. Considerando as possibilidades, criadas através da utilização de planejamento de experimentos, o segundo caminho principal de construção de modelos (equivalentes) para estimar a reação do sistema de potência, está associado com sua aplicação. Ao mesmo tempo, é necessário indicar, que os procedimentos associados com a verificação da significância dos coeficientes dos modelos e sua adequação pressupõe a disponibilidade assim chamada, dispersão de reprodutibilidade [44]-[46]. A realização dos experimentos com o modelo matemático do sistema e não com o sistema real, gera uma peculiaridade essencial, e algumas dificuldades na construção das estimativas da dispersão de reprodutibilidade. Levando isso em consideração, este trabalho apresenta a atenção ao estudo dessas dificuldades específicas e os caminhos de como superá-las.

1.3 - Objetivos da Dissertação

A análise bibliográfica realizada anteriormente permite formular o objetivo geral da dissertação como o desenvolvimento e estudo das diferentes abordagens associados com a construção de modelos exatos e aproximados, orientados funcionalmente, para a consideração da reação de sistemas de potência em problemas de otimização da configuração das redes de sistemas de distribuição.

Portanto a construção dos modelos aproximados (equivalentes funcionais) é baseada na utilização da técnica de planejamento de experimentos; outro objetivo da dissertação está associado com estudo das questões de análise estatística dos modelos obtidos com sua aplicação.

1.4 - Contribuições do Trabalho

A realização dos resultados desta dissertação permitirá aumentar a adequação dos modelos utilizados em solução de um dos mais importantes problemas de planejamento e operação de sistemas de distribuição – problemas de otimização da configuração das redes com diferentes colocações e, em consequência, a eficiência real das soluções, que podem ser obtidas com base em suas aplicações.

Os resultados da dissertação, associados com a utilização de planejamento de experimentos para a construção dos modelos orientados funcionalmente, em particular, a análise estatística dos resultados dos experimentos, tem o caráter universal e podem achar as aplicações em solução de diversos problemas de planejamento e operação de sistemas e subsistemas de potência.

Os resultados desta dissertação foram refletidos em um artigo “*Taking into Account Power System Reaction in Problems of Multicriteria Optimizing Network*”

Configuration in Distribution Systems, publicado em Anais da IEEE Budapest Power Tech'99 Conference, Budapest, 29 de agosto a 2 de setembro de 1999 [12].

CAPÍTULO 2

MODELOS EXATOS DE ESTIMAÇÃO DE REACÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 – Considerações Gerais

É possível indicar dois caminhos para a construção dos modelos exatos, que podem refletir a reação dos sistemas de potência em problemas de otimização de sistemas de distribuição. Em particular, o primeiro caminho está associado com a construção dos modelos baseados nas expressões gerais de matrizes [39], utilizando as matrizes completas de resistências das barras $[R]$.

Um outro caminho de construção de modelos exatos está associado com a formação das expressões analíticas (equivalentes funcionais) para estimar os incrementos de perdas somente para as combinações das barras do sistema de potência, que são conectadas pela rede do sistema de distribuição. É natural, que essa abordagem necessite de alguns elementos separados das matrizes de resistências das barras $[R]$. Sua obtenção pode ser realizada com a utilização das noções dos coeficientes de distribuição e de impedâncias de influência considerados em [47].

2.2 – Estimação da Reação do Sistema de Potência com Base em Expressões Gerais de Matrizes

2.2.1 – Construção do Modelo

É possível construir a expressão de matrizes para calcular as perdas de potência em sistema de potência somando as potências de todas as barras do sistema. Para mostrar isso, introduzimos os vetores de correntes das barras.

$$[I] = \begin{bmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_i \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

vetores de tensões das barras

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_i \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

e matriz de admitâncias das barras

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Esses vetores e matriz permitem escrever a equação de correntes das barras na seguinte forma:

$$[I] = [Y][V]. \quad (2.4)$$

A equação (2.4) pode ser apresentada [39] na forma invertida:

$$[V] = [Z][I]; \quad (2.5)$$

onde a matriz de impedâncias das barras $[Z]$ pode ser obtida com base na matriz $[Y]$, através de sua inversão:

$$[Z] = [Y]^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1i} & \dots & Z_{1n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ Z_{n1} & \dots & Z_{ni} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

A potência injetada na barra i pode ser apresentada como [39]:

$$S_i = P_i + jQ_i = P_{Gi} - P_{Ci} + j(Q_{Gi} - Q_{Ci}), \quad (2.7)$$

onde $P_{Gi} + jQ_{Gi}$ é a potência de geração e $P_{Ci} + jQ_{Ci}$ é a potência de carga.

Somando as potências das barras (2.7) para todas as barras, obtemos, conseqüentemente, a potência total gerada menos a carga total, isto é, as perdas totais do sistema equilibrado [39]:

$$\Delta P + j\Delta Q = \sum_{i=1}^n S_i = 3 \sum_{i=1}^n V_i I_i^*, \quad (2.8)$$

onde * é o símbolo de conjugado.

A correlação (2.8) pode ser apresentada como o produto vetorial. Por isso, temos:

$$\Delta P + j\Delta Q = 3[V]^t [I]^* , \quad (2.9)$$

onde t é o símbolo de transposta.

Utilizando (2.5), a expressão (2.9) pode ser apresentada como:

$$\Delta P + j\Delta Q = 3[I]^t [Z]^t [I]^* = 3[I]^t [Z][I]^* , \quad (2.10)$$

considerando que $[Z]$ é uma matriz simétrica [39].

A matriz de impedâncias das barras $[Z]$ pode ser apresentada na forma de soma das matrizes dos componentes ativo e reativo:

$$[Z] = [R] + j[X] = \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1i} & \dots & R_{1n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ R_{n1} & \dots & R_{ni} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1i} & \dots & X_{1n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ X_{n1} & \dots & X_{ni} & \dots & X_{nn} \end{bmatrix} . \quad (2.11)$$

Analogamente, para o vetor de corrente das barras é possível escrever a soma dos vetores dos componentes ativo e reativo:

$$[I] = [I_p] + j[I_q] = \begin{bmatrix} I_{p_1} \\ \dots \\ I_{p_i} \\ \dots \\ I_{p_n} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} I_{q_1} \\ \dots \\ I_{q_i} \\ \dots \\ I_{q_n} \end{bmatrix} . \quad (2.12)$$

De tal forma, a equação (2.10) pode ser apresentada como:

$$\Delta P + j\Delta Q = 3([I_p] + j[I_q])'([R] + j[X])([I_p] - j[I_q]) \quad (2.13)$$

e

$$\Delta P = 3([I_p]'[R][I_p] + [I_p]'[X][I_q] + [I_q]'[R][I_q] - [I_q]'[X][I_p]). \quad (2.14)$$

Devido ao fato da matriz $[X]$ ser simétrica [39], é possível entender que o segundo e o quarto termo são idênticos, e portanto resulta em uma expressão dada por:

$$\Delta P = 3([I_p]'[R][I_p] + [I_q]'[R][I_q]). \quad (2.15)$$

Para obtermos o resultado em kW, com base em (2.15), é possível escrever:

$$\Delta P = 3([I_p]'[R][I_p] + [I_q]'[R][I_q]) \times 10^{-3}. \quad (2.16)$$

Agora admitimos que temos uma redistribuição de cargas

$$[I'] = [I'_p] + j[I'_q] = \begin{bmatrix} I_{p,1} \\ \dots \\ I_{p,l} + \Delta I_{p,lm} \\ \dots \\ I_{p,m} - \Delta I_{p,lm} \\ \dots \\ I_{p,n} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} I_{q,1} \\ \dots \\ I_{q,l} + \Delta I_{q,lm} \\ \dots \\ I_{q,m} - \Delta I_{q,lm} \\ \dots \\ I_{q,n} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

em relação ao estado inicial

$$[I] = [I_p] + j[I_q] = \begin{bmatrix} I_{p,1} \\ \dots \\ I_{p,l} \\ \dots \\ I_{p,m} \\ \dots \\ I_{p,n} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} I_{q,1} \\ \dots \\ I_{q,l} \\ \dots \\ I_{q,m} \\ \dots \\ I_{q,n} \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

que está associada, por exemplo com a transferência de lugar de desconexão da malha da rede de distribuição, que conecta as barras l e m .

É natural, que utilizando (2.16), é possível calcular o incremento de perdas da seguinte maneira:

$$\delta(\Delta P_{l,m}) = 3([I_p']^t [R][I_p'] + [I_q']^t [R][I_q'] - [I_p']^t [R][I_p] - [I_q']^t [R][I_q]) \times 10^{-3} \quad (2.19)$$

A correlação (2.19) é possível ser apresentada como

$$\delta(\Delta P_{l,m}) = 3([I']^t [R][I'] - [I]^t [R][I]) \times 10^{-3}, \quad (2.20)$$

se as cargas forem homogêneas.

2.2.2 – Exemplo de Estimação da Reação do Sistema de Potência:

Como exemplo de estimação da reação do sistema de potência, consideramos o sistema apresentado na Figura 2.1.

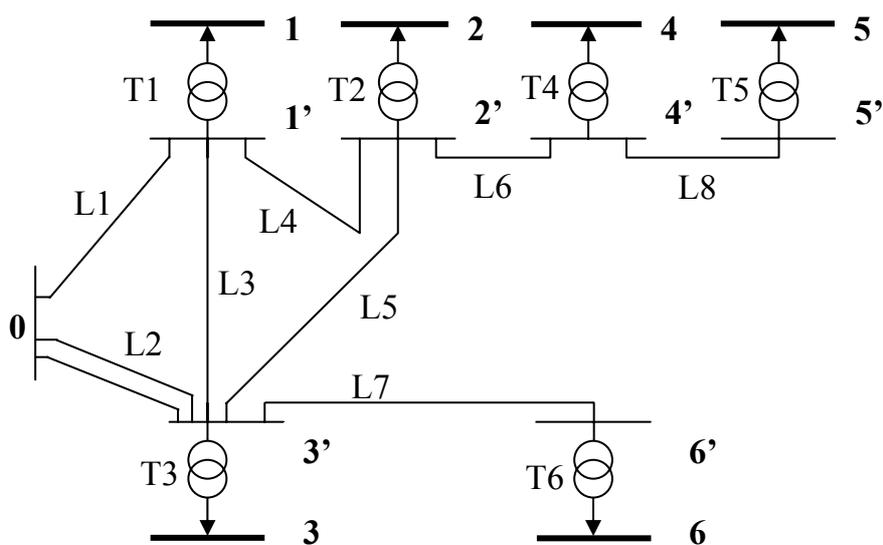


Figura 2.1 – Sistema de Potência

Os dados das linhas de transmissão 138 kV e dos transformadores 130/13.8 kV são apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2, respectivamente.

Tabela 2.1
Dados das Linhas de Transmissão

Linhas	R (Ω)	X (Ω)	Comprimento (km)
L1:0 – 1'	3.24	14.97	32
L2:0 – 3'	2.68	6.89	28
L3:1' – 3'	5.73	14.76	30
L4:1' – 2'	3.34	8.61	17.5
L5:2' – 3'	6.11	15.74	32
L6:2' – 4'	3.63	9.35	19
L7:3' – 6'	4.77	12.3	25
L8:4' – 5'	3.82	9.84	20

Os parâmetros do esquema das impedâncias do sistema (Figura 2.1) são apresentados na Tabela 2.3. A Tabela 2.3 também inclui os valores das admitâncias do esquema das admitâncias apresentados na Figura 2.2.

Tabela 2.2

Dados dos Transformadores (130 / 13.8 kV)

Transformador	Potência Nominal (MVA)	R (Ω)	X (Ω)
T1:1' – 1	41.67	2.01	67.15
T2:2' – 2	41.67	2.01	67.15
T3:3' – 3	10	13.74	228.37
T4:4' – 4	15	4.71	188.86
T5:5' – 5	15	4.71	188.86
T6:6' – 6	41.67	2.01	67.15

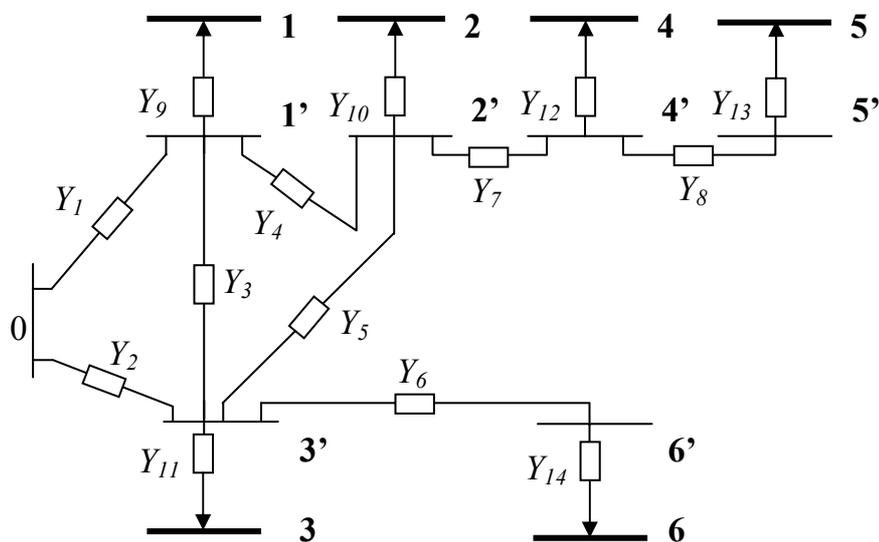


Figura 2.2 – Esquema das Admitâncias

Tabela 2.3

Impedâncias e Admitâncias dos Ramos (Reduzidas para 138 kV)

Ramo	$i - j$	$Z(\Omega)$	$Y(\Omega)$
1	0 - 1'	3.24 + j 14.97	0.0138 - j 0.0638
2	0 - 3'	2.68 + j 6.89	0.0490 - j 0.1261
3	1' - 3'	5.73 + j 14.76	0.0229 - j 0.0589
4	1' - 2'	3.34 + j 8.61	0.0392 - j 0.1009
5	2' - 3'	6.11 + j 15.74	0.0214 - j 0.0552
6	3' - 6'	4.77 + j 12.30	0.0274 - j 0.0707
7	2' - 4'	3.63 + j 9.35	0.0361 - j 0.0929
8	4' - 5'	3.82 + j 9.84	0.0343 - j 0.0883
9	1' - 1	2.01 + j 67.15	0.000445 - j 0.014879
10	2' - 2	2.01 + j 67.15	0.000445 - j 0.014879
11	3' - 3	13.74 + j 228.37	0.000263 - j 0.004363
12	4' - 4	4.71 + j 188.86	0.000132 - j 0.005292
13	5' - 5	4.71 + j 188.86	0.000132 - j 0.005292
14	6' - 6	2.01 + j 67.15	0.000445 - j 0.014879

As informações sobre as curvas de carga das barras são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4

Curvas de Carga das Barras do Sistema (Reduzidas para 138 kV)

Barras	Períodos (Horas)					
	0 - 4 (A)	4 - 8 (A)	8 - 12 (A)	12 - 16 (A)	16 - 20 (A)	20 - 24 (A)
1	50	60	110	100	120	70
2	50	60	100	90	100	50
3	20	12	15	20	30	30
4	20	20	30	55	50	25
5	20	35	50	30	50	40
6	40	45	90	90	80	50

Para construir a matriz de resistências das barras $[R]$, é necessário [39] determinar e utilizar a matriz de incidências de barras $[A]$. Essa matriz reflete a correspondência entre os ramos e as barras do sistema, e tem dimensão rxn , onde r é o número de ramos, e n é o número de barras. Os elementos a_{ij} são determinados de acordo com as seguintes regras:

$a_{ij} = 1$, se o ramo i incidir na barra j e for orientado “saindo” desta barra;

$a_{ij} = -1$, se o ramo i incidir na barra j e for orientado “entrando” nessa barra;

$a_{ij} = 0$, se o ramo i não incidir na barra j .

Para o sistema apresentado na Figura 2.1, a matriz $[A]$ tem a seguinte forma:

$$[A] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1' & 2' & 3' & 4' & 5' & 6' & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \left[\begin{matrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{matrix} \right. \end{matrix} \quad (2.21)$$

Com base na matriz $[A]$, é possível construir a matriz de admitância das barras da seguinte maneira [39]:

$$[Y] = [A]^t [Y_p] [A], \quad (2.22)$$

onde $[Y_p]$ é a matriz quadrada de admitâncias primitivas [39], que para nosso caso é:

$$[Y_p] = \begin{bmatrix} Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{14} \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Então, com base de (2.22), é possível construir a matriz de admitâncias das barras, e substituindo na mesma os dados da Tabela 2.3 e considerando também sua inversão, obtemos a matriz de resistências das barras $[R]$.

$$[R] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1' & 2' & 3' & 4' & 5' & 6' & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1' \\ 2' \\ 3' \\ 4' \\ 5' \\ 6' \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2.31 & 1.85 & 0.99 & 1.85 & 1.85 & 0.99 & 2.31 & 1.85 & 0.99 & 1.85 & 1.85 & 0.99 \\ 1.85 & 3.82 & 1.33 & 3.82 & 3.82 & 1.33 & 1.85 & 3.82 & 1.33 & 3.82 & 3.82 & 1.33 \\ 0.99 & 1.33 & 1.96 & 1.33 & 1.33 & 1.96 & 0.99 & 1.33 & 1.96 & 1.33 & 1.33 & 1.96 \\ 1.85 & 3.82 & 1.33 & 7.45 & 7.45 & 1.33 & 1.85 & 3.82 & 1.33 & 7.45 & 7.45 & 1.33 \\ 1.85 & 3.82 & 1.33 & 7.45 & 11.27 & 1.33 & 1.85 & 3.82 & 1.33 & 7.45 & 11.27 & 1.33 \\ 0.99 & 1.33 & 1.96 & 1.33 & 1.33 & 6.73 & 0.99 & 1.33 & 1.96 & 1.33 & 1.33 & 6.73 \\ 2.31 & 1.85 & 0.99 & 1.85 & 1.85 & 0.99 & 4.32 & 1.85 & 0.99 & 1.85 & 1.85 & 0.99 \\ 1.85 & 3.82 & 1.33 & 3.82 & 3.82 & 1.33 & 1.85 & 5.83 & 1.33 & 3.82 & 3.82 & 1.33 \\ 0.99 & 1.33 & 1.96 & 1.33 & 1.33 & 1.96 & 0.99 & 1.33 & 15.69 & 1.33 & 1.33 & 1.96 \\ 1.85 & 3.82 & 1.33 & 7.45 & 7.45 & 1.33 & 1.85 & 3.82 & 1.33 & 12.16 & 7.45 & 1.33 \\ 1.85 & 3.82 & 1.33 & 7.45 & 11.27 & 1.33 & 1.85 & 3.82 & 1.33 & 7.45 & 15.98 & 1.33 \\ 0.99 & 1.33 & 1.96 & 1.33 & 1.33 & 6.73 & 0.99 & 1.33 & 1.96 & 1.33 & 1.33 & 8.74 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.24)$$

A operação de inversão foi realizada com base no software “Matlab”.

Com base na matriz (2.24), consideramos de que maneira é possível estimar o incremento de perdas em sistema de potência, se por exemplo temos mudança de lugar de desconexão da malha de distribuição entre as barras 3 e 4 (Figura 2.3). Esta mudança pode acarretar um aumento de carga na barra 3, e diminuir a carga da barra 4.

Estimamos o incremento de perdas por exemplo para um passo das curvas de carga das subestações no regime entre 16 e 20 h (Tabela 2.4). Admitimos, que $\Delta I_{3,4} = 21$ A. (ou 2,1 A reduzido a 138 kV).

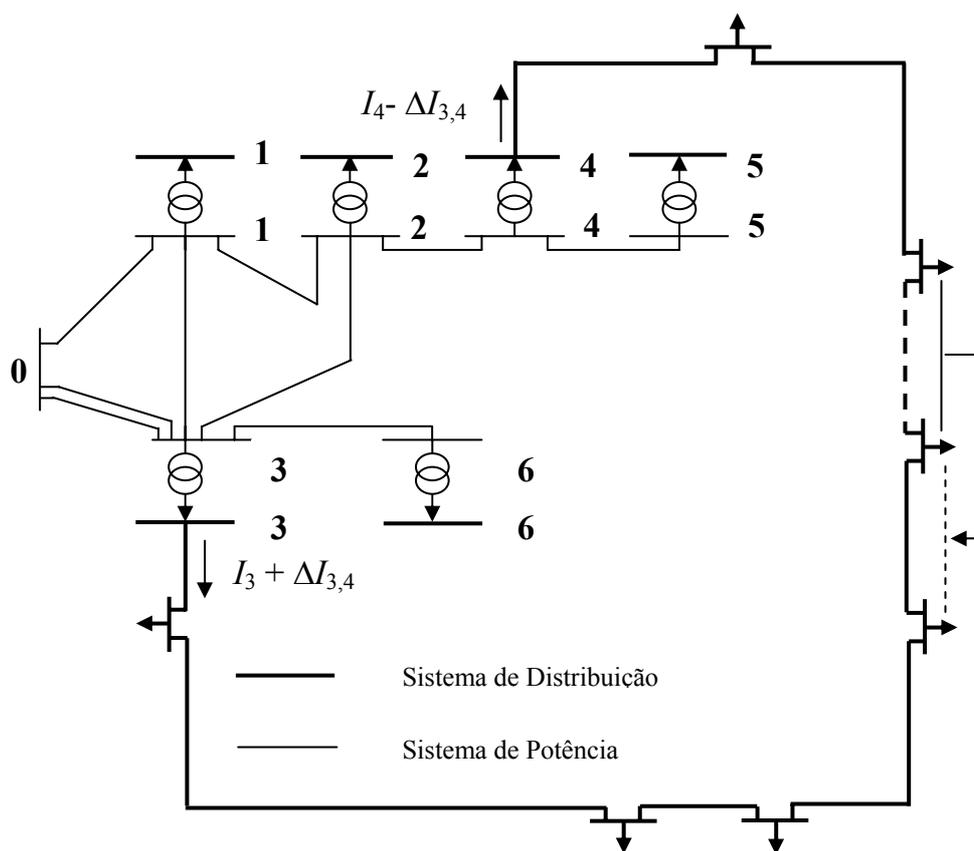


Figura 2.3 – Sistema com Transferência de Localização de Desconexão entre as Barras 3 e 4

Considerando isso, com orientação na equação (2.20), temos

$$[I] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 120 \\ 100 \\ 30 \\ 50 \\ 50 \\ 80 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Ao mesmo tempo o vetor $[I']$, é o seguinte:

$$[I'] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 120 \\ 100 \\ 32.1 \\ 47.90 \\ 50 \\ 80 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Então executando todos os cálculos de acordo com (2.20), é possível estimar o incremento de perdas $\delta(\Delta P_{3,4}) = -8.7198 \text{ kW}$.

Na qualidade de outro exemplo, consideramos a mudança de lugar de desconexão da malha entre as barras 2 e 6 (Figura 2.3). Esta mudança acarreta um aumento de carga da barra 2, e uma diminuição de carga da barra 6. Admitimos também que $\Delta I_{2,6} = 2.1$ A. É natural que para esse caso o vetor $[I]$ coincide com (2.26). Ao mesmo tempo,

$$[I] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 120 \\ 102.10 \\ 30 \\ 50 \\ 50 \\ 77.90 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Executando os cálculos de acordo com (2.20), obtemos $\delta(\Delta P_{2,6}) = 2.5678$ kW.

2.3 – Construção de Equivalentes Funcionais com Base em Coeficientes de Distribuição e Impedâncias de Influência

Considerando as dificuldades na obtenção das matrizes de resistências $[R]$, as suas propriedades [39]-[41] e também ao fato que, em processo de otimização do sistema de distribuição, não é necessário estimar os incrementos de perdas $\delta(\Delta P_{lm})$ para todas as barras do sistema de potência l ($1 \leq l \leq n$) e m ($1 \leq m \leq n$) (é suficiente considerar os pares das barras de baixa tensão das subestações (barras de alimentação), que são conectadas através da rede do sistema de distribuição), a

abordagem anterior considerada não é viável, pelo menos para problemas de dimensões reais.

A abordagem alternativa pode ser baseada na construção dos equivalentes funcionais para calcular $\delta(\Delta P_{lm})$, somente para as combinações das barras de alimentação que são conectadas pela rede do sistema de distribuição.

Em particular, considerando a expressão (2.20), quando $[I] = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$ e

$$[I'] = \begin{bmatrix} I_1 + \Delta I_{1,3} \\ I_2 \\ I_3 - \Delta I_{1,3} \end{bmatrix}, \text{ temos}$$

$$\begin{aligned} \delta(\Delta P_{1,3}) = & 3 \left(\begin{bmatrix} I_1 + \Delta I_{1,3} & I_2 & I_3 - \Delta I_{1,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{23} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 + \Delta I_{1,3} \\ I_2 \\ I_3 - \Delta I_{1,3} \end{bmatrix} \right. \\ & \left. - \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{23} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \right) 10^{-3} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Fazendo as operações necessárias e simplificações correspondentes, é possível obter de (2.28)

$$\begin{aligned} \delta(\Delta P_{1,3}) = & 3 \left\{ \Delta I_{1,3}^2 (R_{11} + R_{33} - R_{13} - R_{31}) + 2\Delta I_{1,3} [I_1 (R_{11} - R_{13}) \right. \\ & \left. - I_3 (R_{33} - R_{31}) + I_2 (R_{21} - R_{32}) \right\}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Considerando que $R_{13} = R_{31}$ (ou no caso geral, $R_{lm} = R_{ml}$) e generalizando (2.29), é possível escrever

$$\delta(\Delta P_{lm}) = 3 \left\{ \Delta I_{lm}^2 (R_{ll} + R_{mm} - 2R_{lm}) + 2\Delta I_{lm} [I_l (R_{ll} - R_{lm}) - I_m (R_{mm} - R_{lm}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l, m}}^n I_i (R_{li} - R_{mi})] \right\} 10^{-3} \quad (2.30)$$

ou para o caso geral, levando em consideração (2.19), obtemos a seguinte expressão.

$$\begin{aligned} \delta(\Delta P_{lm}) = & 3 \left\{ (\Delta I_{p,lm}^2 + \Delta I_{q,lm}^2) (R_{ll} + R_{mm} - 2R_{lm}) \right. \\ & + 2 [(\Delta I_{p,lm} I_{p,l} + \Delta I_{q,lm} I_{q,l}) (R_{ll} - R_{lm}) \\ & - (\Delta I_{p,lm} I_{p,m} + \Delta I_{q,lm} I_{q,m}) (R_{mm} - R_{lm}) \\ & + \Delta I_{p,lm} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l, m}}^n I_{p,i} (R_{li} - R_{mi}) \\ & \left. + \Delta I_{q,lm} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l, m}}^n I_{q,i} (R_{li} - R_{mi}) \right\} 10^{-3}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

É natural, que a construção de (2.30) ou (2.31) está associada com a utilização dos elementos da matriz $[R]$. Estes elementos podem ser obtidos sem a construção da matriz de admitâncias $[Y]$. Em particular, para a obtenção dos elementos necessários da matriz $[R]$, é possível utilizar as noções de coeficientes de distribuição e impedâncias de influência [47].

2.3.1 – Noções de Coeficientes de Distribuição e Impedâncias de Influência e seus Cálculos

A distribuição da carga de corrente de uma barra de uma fonte por qualquer ramo, determinada pelo cálculo do fluxo de potência, é o valor constante dado.

Este valor depende somente de parâmetros da rede: do seu esquema, e das impedâncias dos elementos.

Este valor é chamado de coeficiente de distribuição da carga considerada para o ramo correspondente. O coeficiente de distribuição [47], é um número complexo sem dimensão, da seguinte maneira:

$$\alpha_{j,i} = \alpha_{p,ji} + j \alpha_{q,ji}, \quad (2.32)$$

onde j e i são os índices correspondentes do ramo e barra considerados, respectivamente.

Para o cálculo dos coeficientes de distribuição, é necessário colocar uma unidade de corrente ativa, de cada vez para cada barra que nos interessa, e fazer para todo caso, o cálculo do fluxo de potência, com base em qualquer método.

Da noção de coeficiente de distribuição, é possível entender que a corrente de qualquer ramo j associada com a barra arbitrária i , é:

$$\dot{I}_{j,i} = \dot{I}_i \alpha_{j,i} = I_{p,i} \alpha_{p,ji} - I_{q,i} \alpha_{q,ji} + j (I_{p,i} \alpha_{q,ji} + I_{q,i} \alpha_{p,ji}) \quad (2.33)$$

Com a consideração de todas as barras para a corrente de qualquer ramo, temos:

$$\dot{I}_j = \sum_{i=1}^n \left[(I_{p,i} \alpha_{p,ji} - I_{q,i} \alpha_{q,ji}) + j (I_{p,i} \alpha_{q,ji} + I_{q,i} \alpha_{p,ji}) \right]. \quad (2.34)$$

A aplicação dos coeficientes de distribuição é baseada no princípio de superposição. É possível admitir qualquer apresentação de elementos da rede e parâmetros de regimes em cálculos dos estados dos sistemas de potência, com

base na utilização dos coeficientes de distribuição [16], [47]. A utilização do método dos coeficientes de distribuição é justificada, quando é necessário realizar muitos cálculos do estado do sistema de potência, para uma certa configuração.

As expressões (2.33) e (2.34), podem ser apresentadas para o caso de potências, da seguinte maneira:

$$\dot{S}_{j,i} = P_i \alpha_{p,ji} - Q_i \alpha_{q,ji} + j (P_i \alpha_{p,ji} + Q_i \alpha_{q,ji}) \quad (2.35)$$

e

$$\dot{S}_j = \sum_{i=1}^n [(P_i \alpha_{p,ji} - Q_i \alpha_{q,ji}) + j (P_i \alpha_{p,ji} + Q_i \alpha_{q,ji})], \quad (2.36)$$

respectivamente.

Determinando os coeficientes de distribuição, podemos a seguir calcular os elementos das matrizes de resistência das barras $[R]$, utilizando a técnica associada com a noção de impedância de influência.

A queda de tensão para qualquer ramo j pode ser calculada da seguinte maneira.

$$\Delta \dot{V}_j = \sqrt{3} \dot{I}_j \dot{Z}_j = \sqrt{3} [(I_{p,j} R_j - I_{q,j} X_j) + j (I_{p,j} X_j + I_{q,j} R_j)]. \quad (2.37)$$

Com base em (2.37), a queda de tensão completa da barra *swing* até a barra arbitrária l (caminho $0 - l$), pode ser calculado como segue:

$$\Delta \dot{V}_l = \sqrt{3} \sum_{j=0}^l \left[(I_{p,j} R_j - I_{q,j} X_j) + j (I_{p,j} X_j + I_{q,j} R_j) \right] . \quad (2.38)$$

Para utilizar as expressões (2.38) e (2.39), é necessário previamente, determinar as correntes dos ramos da rede. Entretanto a queda de tensão pode ser calculada diretamente com base nas correntes das barras da rede. Para ilustrar isso, consideramos o caso mais simples de uma rede radial, que alimenta duas cargas, conforme Figura 2.4.

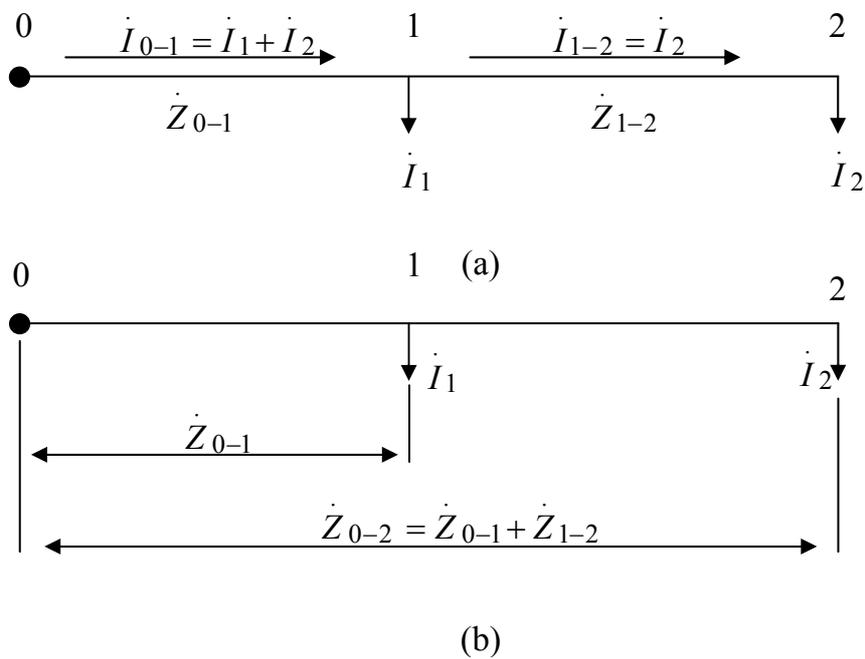


Figura 2.4 – Esquema para o Cálculo das Impedâncias de Influência

No caso da Figura 2.4a, para calcular as quedas de tensão até a barra 1 e até a barra 2, respectivamente, é possível utilizar as seguintes expressões:

$$\Delta \dot{V}_1 = \sqrt{3} \dot{I}_{0-1} \dot{Z}_{0-1}; \quad (2.39)$$

$$\Delta \dot{V}_2 = \sqrt{3} \left[\dot{I}_{0-1} \dot{Z}_{0-1} + \dot{I}_{1-2} \dot{Z}_{1-2} \right]. \quad (2.40)$$

Ao mesmo tempo, para calcular as quedas de tensão até a barra 1 e até a barra 2, respectivamente, para o caso da Figura 2.4b, é possível utilizar as seguintes expressões:

$$\Delta \dot{V}_1 = \sqrt{3} \left[\dot{I}_1 \dot{Z}_{0-1} + \dot{I}_2 \dot{Z}_{0-1} \right]; \quad (2.41)$$

$$\Delta \dot{V}_2 = \sqrt{3} \left[\dot{I}_1 \dot{Z}_{0-1} + \dot{I}_2 \dot{Z}_{0-2} \right] = \sqrt{3} \left[\dot{I}_1 \dot{Z}_{0-1} + \dot{I}_2 \left(\dot{Z}_{0-1} + \dot{Z}_{1-2} \right) \right]. \quad (2.42)$$

De tal forma, para o caso da Figura 2.4a, é necessário somar as correntes das barras, e para o caso da Figura 2.4b, é necessário somar as impedâncias dos ramos. As expressões (2.41) e (2.42), podem ajudar a introduzir a noção das impedâncias de influência.

A impedância que pode definir a influência da corrente da barra l na tensão da barra m , é a impedância mútua de influência dessas barras. Se l é igual a m , falamos sobre impedância própria da barra l ou barra m . Em particular, para a rede mostrada na Figura 2.4, as impedâncias de influência tem os seguintes valores: $\dot{Z}_{1,2} = \dot{Z}_{2,1} = \dot{Z}_{0-1}$; $\dot{Z}_{1,1} = \dot{Z}_{0-1}$; $\dot{Z}_{2,2} = \dot{Z}_{0-1} + \dot{Z}_{1-2}$.

Para redes radiais, a impedância de influência \dot{Z}_{lm} , pode ser definida como soma direta das impedâncias dos ramos do caminho mútuo das correntes da barra *swing* até as barras l e m .

Para qualquer ramo de uma rede com malhas, a queda de tensão associada com as correntes \dot{I}_m é a seguinte:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{j,m} &= \sqrt{3} \dot{I}_{jm} \dot{Z}_j = \sqrt{3} \alpha_{jm} \dot{Z}_j \dot{I}_m = \\ &= \sqrt{3} \dot{I}_m \left[(\alpha_{p,jm} R_j - \alpha_{q,jm} X_j) + j (\alpha_{p,jm} X_j + \alpha_{q,jm} R_j) \right]. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Agora, fazendo a soma da barra *swing* até a barra *l* (caminho 0 - *l*), é possível obter:

$$\Delta \dot{V}_{lm} = \sqrt{3} \dot{I}_m \left[\sum_{j=0}^l (\alpha_{p,jm} R_j - \alpha_{q,jm} X_j) + j \sum_{j=0}^l (\alpha_{p,jm} X_j + \alpha_{q,jm} R_j) \right]. \quad (2.44)$$

A expressão que está em colchete em (2.44) é a impedância de influência. Seus componentes são a resistência de influência

$$R_{lm} = \sum_{j=0}^l (\alpha_{p,jm} R_j - \alpha_{q,jm} X_j) \quad (2.45)$$

e a reatância de influência

$$X_{lm} = \sum_{j=0}^l (\alpha_{p,jm} X_j + \alpha_{q,jm} R_j). \quad (2.46)$$

A análise de (2.45) e (2.46) permite formular a seguinte regra para a determinação de impedâncias de influência (que é a impedância mútua): Se vamos para a barra *l* através de qualquer caminho, é necessário em somatório utilizar coeficientes de distribuição, para os mesmos ramos associados com a barra *m*.

É natural, se $l = m$, as expressões (2.45) e (2.46) são associadas com as impedâncias próprias.

2.3.2 – Exemplo de Estimação da Reação do Sistema de Potência com Base em Equivalentes Funcionais

Voltando ao caso apresentado na Figura 2.3, vamos construir o equivalente funcional para estimar, por exemplo, $\delta(\Delta P_{3,4})$.

Primeiramente, precisamos definir os coeficientes de distribuição somente para as barras 3 e 4. Para realizar isso é necessário colocar uma unidade de corrente ativa na barra 3 e calcular o correspondente fluxo de potência. O mesmo processo é realizado para a barra 4. Os resultados dos cálculos realizados com a utilização do programa de cálculos e otimização de fluxo de potência LF-15¹ são apresentados na Tabela 2.5.

Agora, com base na expressão (2.45), utilizando os dados da Tabela 2.5, vamos calcular $R_{3,4}$ na seguinte maneira:

$$\begin{aligned} R_{3,4} &= (\alpha_{p,2,4} R_2 - \alpha_{q,2,4} X_2) + (\alpha_{p,11,4} R_{11} - \alpha_{q,11,4} X_{11}) = \\ &= [(0.5772 \times 2.68 - 0.0317 \times 6.89)] + [(0.00 \times 13.74 - 0.00 \times 228.37)] = 1.33 \Omega \end{aligned}$$

Agora vamos calcular $R_{4,3}$:

$$\begin{aligned} R_{4,3} &= (\alpha_{p,1,3} R_1 - \alpha_{q,1,3} X_1) + (\alpha_{p,4,2} R_4 - \alpha_{q,4,3} X_4) + (\alpha_{p,6,3} R_6 - \alpha_{q,6,3} X_6) + \\ &+ (\alpha_{p,12,3} R_{12} - \alpha_{q,12,3} X_{12}) = \end{aligned}$$

¹ Programa para cálculo de fluxo de potência, desenvolvido pelo Prof.Dr.Luiz Danilo B.Terra

$$= [(0.2271 \times 3.24 + 0.0169 \times 14.97)] + [(0.0857 \times 3.34 + 0.0064 \times 8.61)] + \\ + [(0.00 \times 4.77 - 0.00 \times 12.30)] + [(0.00 \times 4.71 - 0.00 \times 188.86)] = 1.33 \Omega$$

Tabela 2.5

Coeficientes de Distribuição das Barras 3 e 4

		Barras	
	Ramos	3	4
1	0-1'	0.2271-j0.0169	0.4228-j0.0317
2	0-3'	0.7731+j0.0169	0.5772+j0.0317
3	1'-3'	0.1414-j0.0105	-0.1396-j0.0204
4	1'-2'	0.0857-j0.0064	0.5624-j0.0113
5	2'-3'	0.0857-j0.0064	-0.4382-j0.0122
6	3'-6'	0	0
7	2'-4'	0	1+j0
8	4'-5'	0	0
9	1'-1	0	0
10	2'-2	0	0
11	3'-3	1+j0	0
12	4'-4	0	1+j0
13	5'-5	0	0
14	6'-6	0	0

É natural que os resultados obtidos sejam os mesmos para $R_{3,4}$ e $R_{4,3}$, e podemos observar que estes resultados coincidem com $R_{3,4}$ e $R_{4,3}$ da matriz $[R]$ (2.24).

Vamos mostrar o cálculo da resistência própria, por exemplo $R_{3,3}$:

$$R_{3,3} = (\alpha_{p,2,3} R_2 - \alpha_{q,2,3} X_2) + (\alpha_{p,11,3} R_{11} - \alpha_{q,11,3} X_{11}) = \\ = [(0.7731 \times 2.68 - 0.0169 \times 6.89)] + [(1.00 \times 13.74 - 0.00 \times 228.37)] = 15.69 \Omega .$$

Esse resultado também coincide com $R_{3,3}$ da matriz $[R]$ (2.24).

De tal forma, temos $R_{3,3} = 15.69\Omega$, $R_{3,4} = R_{4,3} = 1.33\Omega$. Entretanto, a estrutura de (2.30) ou (2.31) indica, que para construir $\delta(\Delta P_{3,4})$, é necessário determinar $R_{3,1}$, $R_{3,2}$, $R_{3,5}$, $R_{3,6}$, $R_{4,1}$, $R_{4,2}$, $R_{4,5}$, $R_{4,6}$ e $R_{4,4}$. Os cálculos com base na expressão (2.45), permitem obter: $R_{3,1} = 0.99\Omega$, $R_{3,2} = 1.33\Omega$, $R_{3,5} = 1.33\Omega$, $R_{3,6} = 1.96\Omega$, $R_{4,1} = 1.85\Omega$, $R_{4,2} = 3.82\Omega$, $R_{4,5} = 7.45\Omega$, $R_{4,6} = 1.33\Omega$ e $R_{4,4} = 12.16\Omega$.

Essas resistências de acordo com (2.30) permitem construir

$$\delta(\Delta P_{3,4}) = (75.57 \Delta I_{3,4}^2 + 86.16 \Delta I_{3,4} I_3 - 64.98 \Delta I_{3,4} I_4 - 5.16 \Delta I_{3,4} I_5 - 14.94 \Delta I_{3,4} I_6 + 36.72 \Delta I_{3,4} I_5 + 3.78 \Delta I_{3,4} I_6) 10^{-3}. \quad (2.47)$$

Assumindo que as cargas das subestações são definidas pelo o vetor (2.25) e $\Delta I_{3,4} = 2.10$ A, através da correlação (2.47) temos que $\delta(\Delta P_{3,4}) = -8.7198$ kW.

Na mesma maneira, é possível construir

$$\delta(\Delta P_{2,6}) = (35.73 \Delta I_{2,6}^2 + 27.00 \Delta I_{2,6} I_2 - 44.46 \Delta I_{2,6} I_6 + 5.16 \Delta I_{2,6} I_1 - 3.78 \Delta I_{2,6} I_3 + 14.94 \Delta I_{2,6} I_4 + 14.94 \Delta I_{2,6} I_5) 10^{-3}. \quad (2.48)$$

Se as cargas das subestações são definidas pelo o vetor (2.25) e $\Delta I_{2,6} = 2.10$ A, através da correlação (2.48) temos que $\delta(\Delta P_{2,6}) = 2.5579$ kW.

Além disso, por exemplo, para condições alteradas, onde assumimos $I_1 = 110$ A, $I_2 = 110$ A, $I_3 = 40$ A, $I_4 = 50$ A, $I_5 = 50$ A, $I_6 = 70$ A e $\Delta I_{2,6} = 1.0$ A, com base em (2.48), é possível obter $\delta(\Delta P_{2,6}) = 1.8039$ kW.

CAPÍTULO 3

EQUIVALENTES FUNCIONAIS CONSTRUÍDOS COM BASE EM PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

3.1 – Considerações Gerais

Uma outra abordagem para a construção dos equivalentes funcionais dos sistemas de potência para estimar sua reação em problemas de otimização de configuração de redes em sistemas de distribuição, está associada com o uso dos modelos aproximados. Sua construção, como foi indicado acima, pode ser baseado na aplicação da técnica de planejamento de experimentos [44]-[46]. A racionalidade de sua utilização está associada com a possibilidade de construir os modelos orientados funcionalmente ou, em outras palavras, modelos com estrutura dada.

A discussão das questões de realização dos experimentos (no nosso caso computacionais) completos e fracionais e processamentos dos seus resultados para a construção dos equivalentes funcionais são os aspectos mais importantes deste capítulo.

3.2 – Planejamento Fatorial de Experimentos Completos

A técnica de planejamento fatorial de experimentos [44]-[46] é associada com a variação de fatores em um número limitado de seus níveis. Em particular, um experimento completo é baseado na realização de ensaios para todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Por “níveis” entende-se qualquer um dos possíveis estados discretos (binários, ternários, ...). Geralmente, o planejamento

de experimentos completos está associado com a variação dos fatores nos dois níveis, o que demanda a realização de $N = 2^s$ experimentos, e permite construir os modelos lineares da seguinte forma:

$$y = b_0 + \sum_{p=1}^s b_p x_p + \sum_{\substack{p=1 \\ p < q}}^s b_{pq} x_p x_q + \sum_{\substack{p=1 \\ p < q < r}}^s b_{pqr} x_p x_q x_r + \dots \quad (3.1)$$

Assume-se que, os fatores podem ser especificados com um valor mínimo x_p^- , e um valor máximo x_p^+ , sendo que $(x_p^- \leq x_p \leq x_p^+, p = 1, \dots, s)$. Estes valores, devem ser apresentados na forma normalizada, de acordo com a seguinte correlação.

$$\tilde{x}_p = \frac{x_p - x_p^0}{\Delta x_p}, \quad p = 1, \dots, s, \quad (3.2)$$

onde $x_p^0 = \frac{(x_p^- + x_p^+)}{2}$, $p = 1, \dots, s$ são os valores médios da variação dos fatores e

$$\Delta x_p = \frac{(x_p^+ - x_p^-)}{2}, \quad p = 1, \dots, s \text{ são os intervalos de variação dos fatores.}$$

É natural que os estados dos fatores normalizados de um planejamento de experimento sejam iguais a: -1 (que corresponde x_p^-) e +1 (que corresponde x_p^+). A utilização dos fatores na forma normalizada simplifica os procedimentos para a determinação dos coeficientes do modelo (3.1) e sua análise estatística.

Utilizando os fatores normalizados, é possível construir o modelo

$$\hat{y} = \tilde{b}_0 + \sum_{p=1}^s \tilde{b}_p \tilde{x}_p + \sum_{\substack{p=1 \\ p < q}}^s \tilde{b}_{pq} \tilde{x}_p \tilde{x}_q + \sum_{\substack{p=1 \\ p < q < r}}^s \tilde{b}_{pqr} \tilde{x}_p \tilde{x}_q \tilde{x}_r + \dots \quad (3.3)$$

que pode ser reduzido a (3.1) como resultado da substituição de (3.2).

A matriz de planejamento dos experimentos completos com dois fatores é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1
Matriz para o Planejamento de Experimento Completo 2²

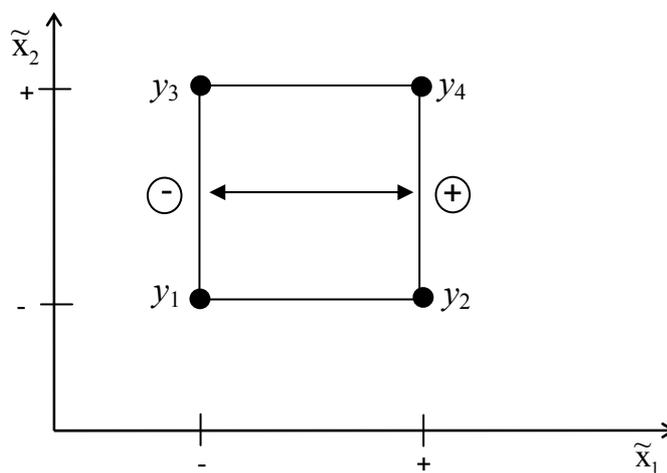
Número de Experimentos <i>n</i>	Fatores			Produto dos Fatores	<i>y</i>
	\tilde{x}_0	\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	$\tilde{x}_1 \tilde{x}_2$	
1	+1	-1	-1	+1	<i>y</i> ₁
2	+1	+1	-1	-1	<i>y</i> ₂
3	+1	-1	+1	-1	<i>y</i> ₃
4	+1	+1	+1	+1	<i>y</i> ₄

O plano de experimento é definido pelos fatores x_1 e x_2 . A coluna com x_0 é introduzida para determinar o termo constante de (3.3). O produto dos fatores x_1x_2 é definido como resultado da multiplicação dos correspondentes fatores em cada linha da matriz.

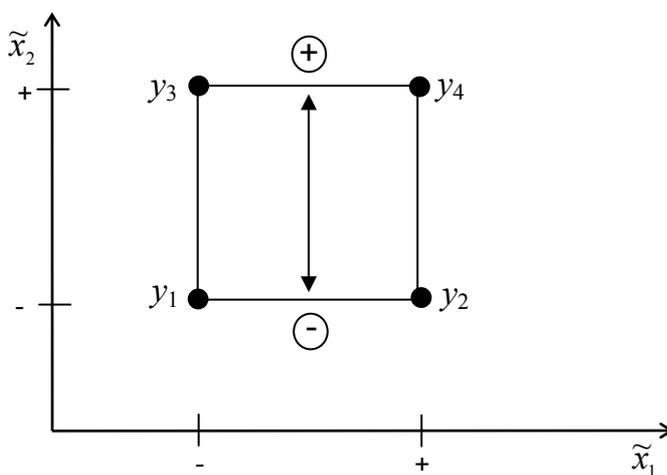
Sob o ponto de vista geométrico, o planejamento dos experimentos completo pode ser representado num sistema cartesiano, em que cada eixo corresponda a um fator. Para o planejamento completo 2² da Tabela 3.1, o espaço definido por eles é um plano, no qual os quatros experimentos ocupam os vértices de um quadrado, conforme Figura 3.1. Com os sinais algébricos atribuídos aos experimentos de acordo com a Tabela 3.1, vemos que os efeitos principais podem ser interpretados como *contrastes*, isto é, diferenças médias entre valores situados

Capítulo 3 – Equivalentes Funcionais Construídos Com Base em Planejamento de Experimentos

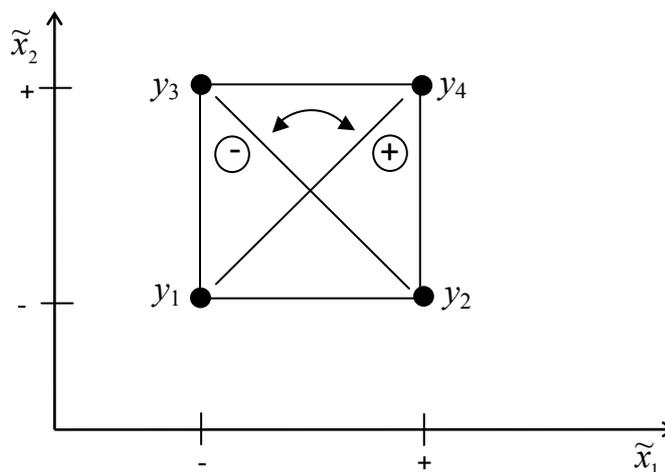
em arestas opostas e perpendiculares ao eixo do fator em questão, como é mostrado nas Figuras 3.1a e 3.1b. O efeito de interação, conforme Figura 3.1c, corresponde ao contraste entre as duas diagonais do quadrado, sendo considerada positiva a diagonal que liga o experimento (--) ao experimento (++)).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1 - Interpretação Geométrica dos Efeitos num Planejamento 2^2

A regra geral para a formação das matrizes do planejamento de experimentos é relativamente simples. Em particular, para a construção da matriz para s fatores é necessário repetir duas vezes a matriz para $s-1$ fatores. No primeiro caso, a matriz é completada pelo s -ésimo fator no nível mínimo e, no segundo caso, pelo s -ésimo fator no nível máximo. Isso é ilustrado pelo planejamento fatorial 2^3 (Tabela 3.2), construído repetindo duas vezes o planejamento 2^2 .

A partir da matriz de planejamento podemos formar a tabela de coeficiente de contraste, multiplicando um a um os sinais das colunas apropriadas para obter as novas colunas correspondendo às interações [44]. Considerando o mesmo caso anterior (planejamento 2^3), como temos três fatores, o efeito de interação de dois desses fatores em princípio depende do nível do terceiro. A interação x_1x_2 , por exemplo, terá um certo valor quando o fator x_3 estiver no nível máximo (+), e possivelmente um outro valor quando estiver no nível mínimo (-), isso também é proposto para as outras interações, onde o efeito de interação entre os três fatores, é $x_1x_2x_3$.

Tabela 3.2

Matriz para o Planejamento de Experimento Completo 2^3

n	Fatores				Produto dos Fatores				y
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

O planejamento fatorial de experimento completo tem as seguintes importante propriedades [44]-[46].

1. O planejamento é simétrico relativamente ao centro do experimento. Portanto, a soma algébrica de todos os elementos de cada coluna é nula.

$$\sum_{n=1}^N x_{np} = 0, \quad p = 1, \dots, s, \quad (3.4)$$

onde s é o número de colunas no plano de experimento.

2. O planejamento de experimento é *ortogonal*. Neste caso, a soma dos produtos dos elementos de qualquer uma de duas colunas diferentes é nula.

$$\sum_{n=1}^N x_{ni} x_{nj} = 0, \quad i \neq j; \quad i, j = 0, \dots, s. \quad (3.5)$$

3. A soma dos elementos de segundo grau de cada coluna é igual ao número de experimentos.

$$\sum_{n=1}^N x_{np}^2 = N, \quad p = 1, \dots, s. \quad (3.6)$$

4. A rotatibilidade está associada com o fato que os pontos da matriz de planejamento são escolhidos na maneira em que a precisão de predição de y é igual nas distâncias iguais do centro do experimento e não depende da direção.

Devido ao fato [44]-[46] das covariâncias serem zero entre os efeitos estimados de um experimento ortogonal, é possível avaliar os efeitos independentemente. Em particular, os coeficientes de (3.3) podem ser calculados como segue:

$$\tilde{b}_p = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{x}_{np} \tilde{y}_n, \quad p = 0, 1, \dots, s, \quad (3.7)$$

$$\tilde{b}_{pq} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{x}_{np} \tilde{x}_{nq} \tilde{y}_n, \quad p, q = 0, 1, \dots, s \quad (p < q), \quad (3.8)$$

$$\tilde{b}_{pqr} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{x}_{np} \tilde{x}_{nq} \tilde{x}_{nr} \tilde{y}_n, \quad p, q, r = 0, 1, \dots, s \quad (p < q < r), \quad (3.9)$$

etc.

3.3 – Planejamento Fatorial de Experimentos Fracionais

Considerando que $2^s > s+1$, os dados obtidos com o experimento fatorial completo possuem informações excessivas, então é possível construir modelos lineares com base na técnica de experimento fatorial fracional.

$$y = \tilde{b}_0 + \sum_{p=1}^s \tilde{b}_p \tilde{x}_p. \quad (3.10)$$

As matrizes dos experimentos fracionais são partes das correspondentes matrizes dos experimentos completos, e o número de experimentos que precisa ser realizado é menor que o número de pontos no espaço fatorial.

As matrizes dos planejamentos fracionais podem ser construídas com a redução do número de ensaios dos experimentos completos em duas, quatro ou mais vezes com substituição das interações com efeitos insignificantes por novos fatores (por exemplo, x_1x_2 por x_3 na Tabela 3.1). O número de tais substituições “g” define o 2^{s-g} planejamento fracional.

Com isso podemos dizer que, a matriz de planejamento do experimento fracional representa a parte da matriz de planejamento do experimento completo de maior dimensão, e possui as mesmas propriedades (3.6) - (3.8).

Supomos que é necessário avaliar o impacto de três fatores construindo o seguinte modelo linear:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (3.11)$$

Para estimar os coeficientes de (3.11) de acordo com o experimento completo 2^3 (Tabela 3.2) é necessário realizar oito experimentos. Portanto, utilizando o planejamento dos experimentos fracionais, considerando que $x_3 = x_1x_2$, se esta correlação for insignificante, é suficiente a realização de quatro experimentos de acordo com o planejamento fatorial de experimento fracional 2^{3-1} , que é parte da matriz da Tabela 3.2

Ao mesmo tempo, é necessário indicar uma particularidade importante do planejamento dos experimentos fracionais. Essa particularidade está associada com o fato de que as estimativas calculadas para cada fator, são misturadas com

as estimativas do produto de dois outros fatores, se falamos, por exemplo, sobre a construção do modelo do tipo (3.11). Isso pode ser refletido na seguinte maneira:

$$b'_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}, \quad b'_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}, \quad b'_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12},$$

onde $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{23}$ são estimativas dos coeficientes para os correspondentes efeitos. Por isso, é impossível separar-se os efeitos x_1, x_2, x_3 dos efeitos x_2x_3, x_1x_3, x_1x_2 , correspondentes.

Evidentemente, a influência da interação de alguns fatores pode ser bastante forte, se os valores dos coeficientes correspondentes ($\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ no caso de três fatores) distingue-se essencialmente de zero e se eles vão influenciar sobre a precisão das estimativas dos coeficientes lineares (b_1, b_2, b_3). Entretanto, quando podemos utilizar um modelo linear conforme equação (3.11), todas as interações em pares ($\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$) tornam-se insignificantes, e é possível diminuir o número de experimentos utilizados no planejamento fatorial dos experimentos fracionais.

A matriz de planejamento fatorial de experimento fracional 2^{3-1} , (Tabela 3.1), como foi indicado acima, representa a metade da matriz de planejamento fatorial de experimento completo 2^3 (Tabela 3.2). Por isso, se após os quatro primeiros ensaios, se β_{pq} não for confirmado para estabelecimento das estimativas independentes de $b_p, p = 1, 2, 3$, é necessário realizar-se mais quatro ensaios de acordo com a segunda parte da matriz de planejamento de experimentos 2^3 . Em tal caso, precisa-se aceitar que, $x_3 = -x_1x_2$ para o qual temos estimativas mistas da seguinte maneira: $b''_1 \rightarrow \beta_1 - \beta_{23}, \quad b''_2 \rightarrow \beta_2 - \beta_{13}, \quad b''_3 \rightarrow \beta_3 - \beta_{12}$.

Levando-se em conta esse fato, as estimativas não misturadas, finalmente, são:

$$b_p = \frac{b'_p + b''_p}{2}, \quad p = 1, 2, \dots, s \quad (3.12)$$

Com base de (3.12), é possível obter $b_1 = \frac{\beta_1 + \beta_{23} + \beta_1 - \beta_{23}}{2}$,
 $b_2 = \frac{\beta_2 + \beta_{13} + \beta_2 - \beta_{13}}{2}$, e $b_3 = \frac{\beta_3 + \beta_{12} + \beta_3 - \beta_{12}}{2}$.

Quando aumentamos o número de fatores do experimento, cresce o número de alternativas para representação de novos fatores. Por exemplo, no planejamento fatorial de experimentos fracionário 2^{5-2} , temos doze alternativas de representação dos fatores x_4 e x_5 [45]:

$x_4 = x_1x_2x_3,$	$x_5 = x_1x_2,$
$x_4 = x_1x_2x_3,$	$x_5 = x_2x_3,$
$x_4 = x_1x_2x_3,$	$x_5 = x_1x_3,$
$x_4 = x_1x_2x_3,$	$x_5 = -x_1x_2,$
$x_4 = x_1x_2x_3,$	$x_5 = -x_2x_3,$
$x_4 = x_1x_2x_3,$	$x_5 = -x_1x_3,$
$x_4 = -x_1x_2x_3,$	$x_5 = x_1x_2,$
$x_4 = -x_1x_2x_3,$	$x_5 = x_2x_3,$
$x_4 = -x_1x_2x_3,$	$x_5 = x_1x_3,$
$x_4 = -x_1x_2x_3,$	$x_5 = -x_1x_2,$
$x_4 = -x_1x_2x_3,$	$x_5 = -x_2x_3,$
$x_4 = -x_1x_2x_3,$	$x_5 = -x_1x_3.$

Não existe uma regra formal para a melhor escolha da forma de mistura das estimativas. Neste caso é necessário utilizarmos informações características sobre a insignificância das interações de dois, três ou mais fatores. No caso geral, quando não temos informações adicionais, podemos julgar que os coeficientes com os mais altos níveis de interações de fatores são os mais insignificantes, por isso, as colunas da matriz de planejamento correspondentes podem ser utilizadas para representação desses novos fatores.

No planejamento fatorial dos experimentos fracionais, para o cálculo dos coeficientes dos modelos construídos é possível utilizar as correlações (3.7)-(3.9). Além disso, a análise estatística, considerada no capítulo 4, dos modelos construídos com base em experimentos completos e fracionais tem a mesma característica.

3.4 – Utilização de Planejamento Fatorial de Experimentos Para Estimação da Reação do Sistema de Potência

Nesta unidade é considerado um exemplo de planejamento fatorial dos experimentos fracionais para estimação da reação do sistema de potência. Como já definimos no capítulo 2, para método de comparação, iremos analisar o sistema específico da Figura 2.1, considerando a mesma transferência de localização de desconexão entre a barra 3 e a barra 4, com a variação na carga entre estas barras especificada por $\Delta I_{3,4}$, conforme Figura 2.3. Com a redistribuição das cargas do sistema, estimaremos a reação do sistema de potência através do valor de incremento de perdas entre essas barras, dado por $\delta(\Delta P_{3,4})$.

Inicialmente para a o cálculo de $\delta(\Delta P_{3,4})$, que no caso de planejamento de experimentos é a nossa função y , é preciso determinar o número de fatores utilizados para a construção da matriz de experimento. Considerando a estrutura de (2.30) ou (2.31) esses fatores são os seguintes: $\Delta I_{3,4}$, $\Delta I_{3,4} I_3$, $\Delta I_{3,4} I_4$, $\Delta I_{3,4} I_1$, $\Delta I_{3,4} I_2$, $\Delta I_{3,4} I_5$, e $\Delta I_{3,4} I_6$. Levando isso em consideração, é possível aplicar o planejamento 2^{7-4} (Tabela 3.2), que permite, de acordo com (3.1), construir

$$\begin{aligned}\hat{y} &= \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 x_1 + \tilde{b}_2 x_2 + \tilde{b}_3 x_3 + \tilde{b}_{12} x_1 x_2 + \tilde{b}_{13} x_1 x_3 + \tilde{b}_{23} x_2 x_3 + \tilde{b}_{123} x_1 x_2 x_3 \\ &= \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 x_1 + \tilde{b}_2 x_2 + \tilde{b}_3 x_3 + \tilde{b}_4 x_4 + \tilde{b}_5 x_5 + \tilde{b}_6 x_6 + \tilde{b}_7 x_7\end{aligned}\tag{3.13}$$

Em (3.13) consideramos que $\Delta I_{3,4} = x_1$, $\Delta I_{3,4} I_3 = x_2$; $\Delta I_{3,4} I_4 = x_3$, $\Delta I_{3,4} I_1 = x_1 x_2 = x_4$, $\Delta I_{3,4} I_2 = x_1 x_3 = x_5$, $\Delta I_{3,4} I_5 = x_2 x_3 = x_6$ e $\Delta I_{3,4} I_6 = x_1 x_2 x_3 = x_7$.

Considerando que a realização dos experimentos implica em pelo menos dois níveis para cada fator (x_p^-, x_p^+) , onde $x_p^- \leq x_p \leq x_p^+$, $p = 1, \dots, s$, e adotando uma margem de variação de 20 % das cargas do sistema, para as curvas de carga da Tabela 2.4 (para refletir as possíveis mudanças de configuração da rede do sistema de distribuição), podemos estabelecer os seguintes intervalos de variação de carga de cada barra do sistema, e dos seus respectivos fatores, da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} 0.10 &\leq \Delta I_{3,4} \leq 2.10, \\ 40.00 &\leq I_1 \leq 144.00, \\ 40.00 &\leq I_2 \leq 120.00, \\ 9.60 &\leq I_3 \leq 36.00, \\ 16.00 &\leq I_4 \leq 66.00, \\ 16.00 &\leq I_5 \leq 60.00, \\ 32.00 &\leq I_6 \leq 108.00; \end{aligned}$$

que permitem construir os intervalos:

$$\begin{aligned} 0.10 &\leq x_1 \leq 2.10, \\ 0.96 &\leq x_2 \leq 75.60, \\ 1.60 &\leq x_3 \leq 138.60, \\ 4.00 &\leq x_4 \leq 302.40, \\ 4.00 &\leq x_5 \leq 252.00, \\ 1.60 &\leq x_6 \leq 126.00, \\ 3.20 &\leq x_7 \leq 226.80. \end{aligned}$$

Com base nesses valores, utilizando a Tabela 3.2, é possível construir as combinações dos níveis dos fatores, conforme apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3
Matriz para o Planejamento de experimento 2^{7-4} , com os
Correspondentes Valores de Cada Fator

Número de Experimento	ΔI	$\Delta I_{3,4} I_3$	$\Delta I_{3,4} I_4$	$\Delta I_{3,4} I_1$	$\Delta I_{3,4} I_2$	$\Delta I_{3,4} I_5$	$\Delta I_{3,4} I_6$	$\delta(\Delta P_{3,4})$ [kW]
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	
1	0.10	0.96	1.60	302.40	252.00	126.00	3.20	-9.9604
2	2.10	0.96	1.60	4.00	4.00	126.00	226.80	-3.5378
3	0.10	75.60	1.60	4.00	252.00	1.60	226.80	3.4235
4	2.10	75.60	1.60	302.40	4.00	1.60	3.20	5.0762
5	0.10	0.96	138.60	302.40	4.00	1.60	226.80	-9.7444
6	2.10	0.96	138.60	4.00	252.00	1.60	3.20	-12.4224
7	0.10	75.60	138.60	4.00	4.00	126.00	3.20	-7.1868
8	2.10	75.60	138.60	302.40	252.00	126.00	226.80	-11.2539

Os resultados dos cálculos, realizados com base no programa de fluxo de potência LF-15, para todas combinações dos fatores, definida por todas as linhas da matriz são apresentados na coluna $\delta(\Delta P_{3,4})$.

Os coeficientes normalizados do modelo foram calculados com base em (3.7)-(3.9), utilizando planilhas do *Microsoft Excel*¹, e são os seguintes:

$$\begin{aligned} \tilde{b}_0 &= -5.7008; & \tilde{b}_1 &= 0.1663; & \tilde{b}_2 &= 3.2155; & \tilde{b}_3 &= -4.4511; \\ \tilde{b}_4 &= -0.7699; & \tilde{b}_5 &= -1.8526; & \tilde{b}_6 &= -2.2840; & \tilde{b}_7 &= 0.4226. \end{aligned}$$

Substituindo estes coeficientes na equação (3.13), obtemos o seguinte modelo:

¹ *Microsoft Excel* é marca registrada da *Microsoft Corporation*.

$$\hat{y} = -5.7008 + 0.1663\tilde{x}_1 + 3.2155\tilde{x}_2 - 4.4511\tilde{x}_3 - 0.7699\tilde{x}_4 - 1.8526\tilde{x}_5 - 2.2840\tilde{x}_6 + 0.4226\tilde{x}_7. \quad (3.14)$$

Considerando que, de acordo com (3.2) e os intervalos de variação dos fatores indicados acima, determinamos os valores normalizados dos fatores do modelo.

$$\tilde{x}_1 = \Delta I_{3,4} = \Delta I_{3,4} - 1.1,$$

$$\tilde{x}_2 = \Delta I_{3,4} I_3 = 0.0268 \Delta I_{3,4} I_3 - 1.0257,$$

$$\tilde{x}_3 = \Delta I_{3,4} I_4 = 0.0146 \Delta I_{3,4} I_4 - 1.0234,$$

$$\tilde{x}_4 = \Delta I_{3,4} I_1 = 0.0067 \Delta I_{3,4} I_1 - 1.0268,$$

$$\tilde{x}_5 = \Delta I_{3,4} I_2 = 0.0081 \Delta I_{3,4} I_2 - 1.0323,$$

$$\tilde{x}_6 = \Delta I_{3,4} I_5 = 0.0161 \Delta I_{3,4} I_5 - 1.0257,$$

$$\tilde{x}_7 = \Delta I_{3,4} I_6 = 0.0089 \Delta I_{3,4} I_6 - 1.0286.$$

Com isso podemos obter

$$\delta(\Delta P_{3,4}) = \{-15.59 + 166.30\Delta I_{3,4} + 86.18\Delta I_{3,4}I_3 - 64.99\Delta I_{3,4}I_4 - 5.16\Delta I_{3,4}I_1 - 14.93\Delta I_{3,4}I_2 - 36.72\Delta I_{3,4}I_5 + 3.78\Delta I_{3,4}I_6\}10^{-3} \quad (3.15)$$

Agora, consideramos a transferência de localização de desconexão entre as barras 2 e a barra 6, com a variação de carga entre estas barras especificada por $\Delta I_{2,6}$ conforme Figura 2.3.

Para o cálculo de $\delta(\Delta P_{2,6})$, na qualidade dos fatores devem ser considerados $\Delta I_{2,6}$, $\Delta I_{2,6} I_2$, $\Delta I_{2,6} I_6$, $\Delta I_{2,6} I_1$, $\Delta I_{2,6} I_3$, $\Delta I_{2,6} I_4$, e $\Delta I_{2,6} I_5$. Nesse caso, em (3.13) temos

Capítulo 3 – Equivalentes Funcionais Construídos Com Base em Planejamento de Experimentos

$\Delta I_{2,6} = x_1$, $\Delta I_{2,6} I_2 = x_2$; $\Delta I_{2,6} I_6 = x_3$; $\Delta I_{2,6} I_1 = x_4$, $\Delta I_{2,6} I_3 = x_5$, $\Delta I_{2,6} I_4 = x_6$ e $\Delta I_{2,6} I_5 = x_7$. Os intervalos de variação desses fatores são os seguintes:

$$0.10 \leq x_1 \leq 2.10,$$

$$4.00 \leq x_2 \leq 252.00,$$

$$3.20 \leq x_3 \leq 226.80,$$

$$4.00 \leq x_4 \leq 302.40,$$

$$0.96 \leq x_5 \leq 75.60,$$

$$1.60 \leq x_6 \leq 138.60,$$

$$1.60 \leq x_7 \leq 126.00.$$

Com base nesses resultados, utilizando a Tabela 3.2, é possível construir as combinações dos níveis dos fatores, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Os resultados apresentados na Tabela 3.4 permitem obter.

$$\begin{aligned} \tilde{b}_0 &= 1.0683 ; & \tilde{b}_1 &= 0.0786 ; & \tilde{b}_2 &= 3.3480 ; & \tilde{b}_3 &= -4.9706 ; \\ \tilde{b}_{12} &= 0.7699 ; & \tilde{b}_{13} &= -0.1411 ; & \tilde{b}_{23} &= 1.0234 ; & \tilde{b}_{123} &= 0.9293 . \end{aligned}$$

De tal forma, temos

$$\begin{aligned} \hat{y} &= 1.0683 + 0.0786 \tilde{x}_1 + 3.3480 \tilde{x}_2 - 4.9706 \tilde{x}_3 + 0.7699 \tilde{x}_4 - 0.1411 \tilde{x}_5 \\ &+ 1.0234 \tilde{x}_6 + 0.9293 \tilde{x}_7 \end{aligned} \quad (3.16)$$

que permite estimar $\delta(\Delta P_{2,6})$ como

$$\begin{aligned} \delta(\Delta P_{2,6}) &= \left\{ -7.80 - 78.60 \Delta I_{2,6} + 26.98 \Delta I_{2,6} I_2 - 44.44 \Delta I_{2,6} I_6 + 5.16 \Delta I_{2,6} I_1 - 3.78 \Delta I_{2,6} I_3 \right. \\ &\quad \left. + 14.94 \Delta I_{2,6} I_4 + 14.94 \Delta I_{2,6} I_5 \right\} 10^{-3} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Tabela 3.4

Matriz para o Planejamento de Experimento 2^{7-4} , com os
Correspondentes Valores de Cada Fator

Número de Experimento	ΔI	$\Delta I_{2,6} I_2$	$\Delta I_{2,6} I_6$	$\Delta I_{2,6} I_1$	$\Delta I_{2,6} I_3$	$\Delta I_{2,6} I_4$	$\Delta I_{2,6} I_5$	$\delta(\Delta P_{2,6})$ [kW]
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	
1	0.10	4.00	3.20	302.40	75.60	138.60	1.60	3.3353
2	2.10	4.00	3.20	4.00	0.96	138.60	126.00	4.0934
3	0.10	252	3.20	4.00	75.60	1.60	126.00	8.3033
4	2.10	252	3.20	302.40	0.96	1.60	1.60	8.4239
5	0.10	4.00	226.80	302.40	0.96	1.60	126.00	-6.5121
6	2.10	4.00	226.80	4.00	75.60	1.60	1.60	-10.0353
7	0.10	252	226.80	4.00	0.96	138.60	1.60	-1.1676
8	2.10	252	226.80	302.40	75.60	138.60	126.00	2.1058

Entretanto, os modelos (3.15) e (3.17) ainda não podem ser utilizados, portanto as correlações (3.14) e (3.16) devem ser submetidas a uma análise estatística, que é o objetivo da consideração do próximo capítulo.

É natural, que a orientação a modelos do tipo (3.3) (ou nos exemplos utilizados, (3.15) ou (3.17)) não permitem ter intervalos muito amplos para o fator $\Delta I_{l,m}$ ($\Delta I_{3,4}$ ou $\Delta I_{2,6}$, nos exemplos utilizados). Entretanto $\Delta I = 2.10$ A, é equivalente a 500 kVA, que é suficientemente grande para sistemas de distribuição.

No caso de haver necessidade de transferência de carga $\Delta I > 2.10$ A, é possível utilizar (3.15) ou (3.17) passo a passo para observar a adequação do modelo em estimar a reação do sistema de potência.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS EQUIVALENTES FUNCIONAIS

4.1 – Considerações Gerais

Este capítulo é dedicado à análise estatística dos modelos do tipo (3.3) construídos com base no planejamento de experimentos. Usando essa análise, podemos definir o estado final dos modelos (por exemplo, (3.14)) que permitem avaliar a reação do sistema de potência para resolver os problemas de configuração das redes em sistemas de distribuição.

A técnica tradicional de análise estatística dos resultados dos experimentos, inclui as seguintes etapas [44]-[46]:

- Verificação da homogeneidade das dispersões;
- Verificação da significância dos coeficientes dos modelos (essa etapa pode permitir eliminar alguns dos fatores, que não tem influência significativa, possibilitando reduzir a dimensão e complexidade dos modelos construídos);
- Verificação da adequação dos modelos construídos e, se necessário, mudança dos intervalos de alteração dos parâmetros para receber os modelos adequados.

Nessas etapas são comuns, que existam os resultados dos experimentos paralelos em pontos do espaço fatorial, definidos por toda linha da matriz de experimentos [44]-[46]. Se falarmos sobre os experimentos computacionais com modelo, esse

fato tem o impacto essencial no caráter de estimação. Primeiramente, a impossibilidade de realizar os experimentos paralelos nos conduz as estimativas das dispersões de $\delta(\Delta P_{l,m})$, que são iguais a zero e a impossibilidade da verificação da homogeneidade das dispersões. Além disso, à verificação da significância dos coeficientes dos modelos e a adequação dos mesmos, é baseada no uso da concepção da dispersão de reprodutibilidade, que é associada com dispersões em correspondentes pontos do espaço fatorial. Um caminho para superar essa dificuldade está associado com a construção artificial dos experimentos fatoriais com base de simulação (com base no método de *Monte Carlo* [48]). Este caminho permite realizar todas as três etapas da análise estatística indicadas acima.

Um outro caminho está associado com a utilização das diferentes abordagens para a construção artificial das estimativas da dispersão de reprodutibilidade. Nesse capítulo consideramos e comparamos experimentalmente duas abordagens [49]. É natural que utilizando essas abordagens, podemos realizar somente as duas últimas etapas da análise estatística indicada acima.

4.2 – Análise Estatística com Experimentos Paralelos

Se utilizarmos o método de *Monte Carlo* [48] para construir os experimentos paralelos, a primeira etapa da análise estatística do modelo está associada com a verificação da homogeneidade das dispersões para diferentes pontos do plano de experimentos. Se para todo ponto, o número de experimentos paralelos for igual, é possível usar o critério de *Gohran* [44]-[46] para esta análise.

A dispersão para qualquer ponto do plano do experimento pode ser definida como [44]-[46]:

$$S_n^2\{y\} = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (y_{un} - \bar{y}_n)^2 \quad n = 1, \dots, N \quad (4.1)$$

onde m é o número de experimentos paralelos para o ponto n do plano de experimento e

$$\bar{y}_n = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m y_{un} \quad n = 1, \dots, N \quad (4.2)$$

De acordo com a verificação da homogeneidade das dispersões, com base do critério de *Gohran*, entre todas as dispersões (4.1), é necessário selecionar a maior $S_{\max}^2\{y\}$. Então, o valor experimental do critério de *Gohran*, pode ser determinado da seguinte maneira:

$$G = \frac{S_{\max}^2\{y\}}{\sum_{n=1}^N S_n^2\{y\}} \quad (4.3)$$

É necessário comparar o valor experimental do critério de *Gohran* (4.3) com o valor crítico G^C , tabulado em correspondentes tabelas [44]-[46] de acordo com o nível de significância α (usualmente, $\alpha=0.05$) e os números de graus de liberdade $f_1 = m - 1, f_2 = N$.

Se $G < G^C$, então, podemos supor que as dispersões são homogêneas, que permitem continuar a análise estatística do modelo, e passar para a etapa associada com a verificação da significância dos coeficientes do modelo. Essa etapa é baseada na noção de dispersão de reprodutibilidade, que pode ser estimada [44]-[46] como:

$$S_{rep}^2\{y\} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_n^2\{y\}. \quad (4.4)$$

Conhecido a dispersão de reprodutibilidade, é possível determinar as dispersões dos coeficientes do modelo

$$S^2\{b_p\} = \frac{S_{rep}^2\{y\}}{m.N}, \quad p = 1, \dots, s \quad (4.5)$$

Para todos os coeficientes do modelo, é possível construir t -relações [44]-[46].

$$t_p = \frac{|b_p|}{S\{b_p\}}, \quad p = 1, \dots, s \quad (4.6)$$

que pode ser comparado com os correspondentes valores críticos do critério de *Student*.

Os valores críticos t_c do critério de *Student* são tabulados em correspondentes tabelas [44]-[46] de acordo com o nível de significância α aceito (usualmente, $\alpha = 0.05$) e um número de grau de liberdade $f = N(m-1)$.

Se $t_p < t_c$, é necessário aceitar a hipótese que o coeficiente não tem significância e o correspondente fator pode ser eliminado do modelo.

A última etapa da análise estatística do modelo é relacionada à verificação da adequação do modelo. Esta etapa esta associada com a utilização da dispersão de adequação definida como

$$S_{ad}^2\{y\} = \frac{1}{N-L} \sum_{n=1}^N (\bar{y}_n - \hat{y}_n)^2 \quad (4.7)$$

onde \hat{y}_n $n = 1, \dots, N$ são os valores obtidos com base no modelo construído e L é o número de coeficientes significantes do modelo.

Se $N = L$, então é necessário realizar mais um experimento no ponto de coordenadas $x_p = 0, p = 1, \dots, s$.

Com base em (4.7), é possível calcular o valor do critério de *Fisher* como

$$F = \frac{S_{ad}^2 \{y\}}{S_{rep}^2 \{y\}} \quad (4.8)$$

O valor do critério de *Fisher* pode ser comparado com o correspondente valor crítico do critério de *Fisher*. Se $F < F^C$, então poder supor que o modelo é adequado.

Os valores críticos F^C do critério de *Fisher* são tabulados em correspondentes tabelas [44]-[46] de acordo com o nível de significância α aceito (usualmente, $\alpha = 0.05$) e o número de graus de liberdade $f_1 = N - L$ e $f_2 = N(m-1)$.

Voltamos ao modelo (3.14). Admitimos que para sua análise estatística, podemos realizar três experimentos paralelos para toda linha da Tabela 3.3. Para preparar os dados iniciais para todos os experimentos, admitimos que as cargas $\Delta I_{3,4}$, I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 , e I_6 , apresentadas na página 48, são definidas com a precisão de $\pm 10\%$. De tal forma, temos

$$\begin{aligned} [0.09 ; 0.11] &\leq \Delta I_{3,4} \leq [1.89 ; 2.31], \\ [36.00 ; 44.00] &\leq I_1 \leq [129.60 ; 158.40], \\ [36.00 ; 44.00] &\leq I_2 \leq [108.00 ; 132.00], \\ [8.64 ; 10.56] &\leq I_3 \leq [32.40 ; 39.60], \\ [14.40 ; 17.60] &\leq I_4 \leq [59.40 ; 72.60], \\ [14.40 ; 17.60] &\leq I_5 \leq [54.00 ; 66.00], \\ [28.80 ; 35.20] &\leq I_6 \leq [97.20 ; 118.80], \end{aligned}$$

que permitem construir os intervalos $\left[x_{-p}^- ; x_p^- \right]$ para $x_p^-, p = 1, \dots, 7$ e $\left[x_{-p}^+ ; x_p^+ \right]$

para $x_p^+, p = 1, \dots, 7$. De tal forma, temos:

$$\begin{aligned} [0.09 ; 0.11] &\leq x_1 \leq [1.89 ; 2.31], \\ [0.78 ; 1.16] &\leq x_2 \leq [61.24 ; 91.48], \\ [1.30 ; 1.94] &\leq x_3 \leq [112.27 ; 137.21], \\ [3.24 ; 4.84] &\leq x_4 \leq [244.94 ; 365.90], \\ [3.24 ; 4.84] &\leq x_5 \leq [204.12 ; 277.20], \\ [1.30 ; 1.94] &\leq x_6 \leq [102.06 ; 152.46], \\ [2.59 ; 3.87] &\leq x_7 \leq [183.71 ; 274.43]. \end{aligned}$$

Com base nesses valores, é possível gerar os níveis dos fatores para usa-los na Tabela 3.3 para dois experimentos paralelos para toda linha com base no método de *Monte Carlo*. Em particular, na qualidade de $x_p^-, p = 1, \dots, s$ podem ser utilizados os valores

$$x_p^- = x_{-p}^- + z \left(x_p^- - x_{-p}^- \right), \quad p = 1, \dots, s. \quad (4.9)$$

Ao mesmo tempo, na qualidade de $x_p^+, p = 1, \dots, s$ podem ser utilizados os valores

$$x_p^+ = x_{-p}^+ + z \left(x_p^+ - x_{-p}^+ \right), \quad p = 1, \dots, s. \quad (4.10)$$

Em (4.9) e (4.10), z são os números aleatórios [45] distribuídos uniformemente ao intervalo $[0;1]$. Os valores $y_{1,n}, n = 1, \dots, 8$ e $y_{2,n}, n = 1, \dots, 8$, calculados utilizando o programa LF-15 são apresentados na Tabela 4.1.

Na qualidade dos valores $y_{3,n}$, $n = 1, \dots, 8$ é natural considerar que

$$\bar{y}_{3,n} = 3\bar{y}_n - \bar{y}_{1,n} - \bar{y}_{2,n}, \quad n = 1, \dots, 8, \quad (4.11)$$

onde $\bar{y}_n = y_n$, $n = 1, \dots, 8$ da Tabela 3.3.

Os valores de $S_n^2\{y\}$, $n = 1, \dots, 8$ calculados com base de (4.1) são apresentados na Tabela 4.1. De tal forma, de acordo com (4.3) temos $G = 0.2748$.

Considerando que para $\alpha = 0.05$, $f_1 = 2$ e $f_2 = 8$, $G^C = 0.8159$, podemos adotar que as dispersões são homogêneas.

Continuando a análise estatística, para verificarmos a significância dos coeficientes do modelo (3.14), com base de (4.4), definimos a dispersão de reprodutibilidade $S_{rep}^2\{y\} = 2.3107$, que permite de acordo com (4.5) determinarmos as dispersões dos coeficientes do modelo $S^2\{b_p\} = 0.0963$, $p = 1, \dots, 7$. De tal forma, temos $t_1 = 0.5360$, $t_2 = 10.3626$, $t_3 = 14.3445$, $t_4 = 2.4811$, $t_5 = 5.9704$, $t_6 = 7.3606$, $t_7 = 1.3619$ e $t_0 = 18.3719$. Levando em consideração que para $\alpha = 0.05$, $f = 16$, $t_c = 2.120$, portanto os coeficientes t_1 e t_7 não tem significância e os mesmos podem ser eliminados do modelo construído.

Desta maneira, a verificação da significância dos coeficientes permite reduzir o modelo (3.14) ao seguinte modelo:

$$\hat{y} = -5.7008 + 3.2155\tilde{x}_2 - 4.4511\tilde{x}_3 - 0.7699\tilde{x}_4 - 1.8526\tilde{x}_5 - 2.2840\tilde{x}_6 \quad (4.12)$$

Tabela 4.1
Matriz do Planejamento 2^{7-3} para Análise Estatística com Experimentos Paralelos

N	Fatores								Função				Var. dos Exper.	Var. de Adeq.	
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	$y^{(1)}$	$y^{(2)}$	$y^{(3)}$	\bar{y}	\hat{y}	$\Sigma \left(y - \bar{y} \right)^2$	$\left(\bar{y} - \hat{y} \right)^2$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	-10.1073	-8.3391	-11.4354	-9.9606	-9.3717	4.8258	0.3468
2	+	+	-	-	-	-	+	+	-3.6123	-2.7056	-4.2955	-3.5378	-4.1267	1.2721	0.3468
3	+	-	+	-	-	+	-	+	2.5161	3.7989	3.9552	3.4234	3.1671	1.2471	0.0657
4	+	+	+	-	+	-	-	-	4.6324	4.9009	5.6953	5.0762	5.3325	0.6110	0.0657
5	+	-	-	+	+	-	-	+	-8.7029	-8.7397	-11.7906	-9.7444	-10.0007	6.2812	0.0657
6	+	+	-	+	-	+	-	-	-11.6288	-11.0144	-14.6240	-12.4224	-12.1661	7.4590	0.0657
7	+	-	+	+	-	-	+	-	-6.6266	-5.9430	-8.9908	-7.1868	-6.5979	5.1154	0.3468
8	+	+	+	+	+	+	+	+	-10.9826	-9.1482	-13.6312	-11.2540	-11.8429	10.1589	0.3468
Soma												36.9705	1.6500		

Os valores \hat{y}_n , $n = 1, \dots, 8$ calculados de acordo com (4.12) para toda linha do experimento são apresentados na Tabela 4.1. Esses valores, com base de (4.7) permitem construir e estimativa da dispersão da adequação $S_{ad}^2\{y\} = 0.8250$. De tal forma, de acordo com (4.8) temos que $F = 0.3570$.

Portanto para $\alpha = 0.05$, $f_1 = 2$ e $f_2 = 8$, $F^C = 3.60$, então podemos considerar o modelo (4.12) adequado.

Realizando as substituições analógicas às substituições de (3.4), podemos obter o modelo

$$\delta(\Delta P_{3,4}) = \{602.03 + 86.18\Delta I_{3,4}I_3 - 64.99\Delta I_{3,4}I_4 - 5.16\Delta I_{3,4}I_1 - 14.93\Delta I_{3,4}I_2 - 36.72\Delta I_{3,4}I_5\}10^{-3} \quad (4.13)$$

4.3 – Análise Estatística Associada Com a Construção Artificial das Estimativas da Dispersão de Reprodutibilidade

É possível distinguir duas abordagens para a construção artificial das estimativas da dispersão de reprodutibilidade.

A primeira abordagem está associada com as seguintes considerações [43],[49].

Vamos assumir que temos o seguinte modelo:

$$y = \tilde{b}_0 + \sum_{p=1}^s \tilde{b}_p \tilde{x}_p + \sum_{\substack{p=1 \\ p < q}}^s \tilde{b}_{pq} \tilde{x}_p \tilde{x}_q \quad (4.14)$$

Considerando-se que $\tilde{x}_p, p = 1, \dots, s$ pode ser assumida como variável randômica central com $E\{\tilde{x}_p\} = 0$, nós temos $E\{y\} = \tilde{b}_0$ e $S^2\{y\} = E\{[y - E(y)]^2\}$. Se $\tilde{x}_p, p=1, \dots, s$ são independentes, então podemos escrever.

$$S^2\{y\} = S^2\{\tilde{b}_0\} + \sum_{p=1}^s [\tilde{b}_p^2 + S^2\{\tilde{b}_p\}] S^2\{\tilde{x}_p\} + \sum_{p < q} [\tilde{b}_{pq}^2 + S^2\{\tilde{b}_{pq}\}] S^2\{\tilde{x}_p\} S^2\{\tilde{x}_q\} \quad (4.15)$$

onde $S^2\{\tilde{x}_p\} = \frac{S^2\{x_p\}}{\Delta x_p^2}, p = 1, \dots, s$. Além disso, se $S^2\{y\}$ é definido somente pelas dispersões dessas variáveis randômicas, então

$$S^2\{y\} = \sum_{p=1}^s \tilde{b}_p^2 S^2\{\tilde{x}_p\} + \sum_{\substack{p=1 \\ p < q}}^s \tilde{b}_{pq}^2 S^2\{\tilde{x}_p\} S^2\{\tilde{x}_q\} \quad (4.16)$$

Finalmente, se $x_p, p=1, \dots, s$ são normalmente distribuídas nos limites $x_p^0 \pm \Delta x_p$, então, considerando $\tilde{x}_p \approx E\{\tilde{x}_p\} \pm 3\sqrt{S^2\{\tilde{x}_p\}}$, obtemos $S^2\{\tilde{x}_p\} \approx 0,11$ e temos da correlação (4.16):

$$S^2\{y\} = 0,11 \left(\sum_{p=1}^s \tilde{b}_p^2 + 0,11 \sum_{\substack{p=1 \\ p < q}}^s \tilde{b}_{pq}^2 \right). \quad (4.17)$$

O segundo componente de (4.17) é consideravelmente menor que o primeiro. Podemos então escrever a dispersão de reprodutibilidade como

$$S_{rep}^2\{y\} = 0,11 \sum_{p=1}^s b_p^2. \quad (4.18)$$

Com base em (4.18), é possível construir as dispersões dos coeficientes do modelo utilizado (4.5) e assumir que $m = 1$.

A verificação futura da significância dos coeficientes do modelo é baseada na mesma t -relação definida pela correlação (4.6). Os valores críticos t do critério de *Student* são definidos para o número de grau de liberdade $f = N-1$ [44]-[46].

A verificação da adequação do modelo é baseada no mesmo critério de *Fisher*, calculado com base em (4.8). Os valores críticos de F do critério de *Fisher* são definidos para os números de graus de liberdade $f_1 = N-L$ (L é o número de coeficientes significantes do modelo) e $f_2 = L-1$ [49].

Voltamos à análise estatística do modelo (3.14). De acordo com (4.18), temos $S_{rep}^2 \{y\} = 4.3559$ e de acordo com (4.6) temos as seguintes t -relações:

$$\begin{array}{cccc} t_0 = 7.7257 & t_1 = 0.2254 & t_2 = 4.3576 & t_3 = 6.0321 \\ t_4 = 1.0434 & t_5 = 2.5106 & t_6 = 3.0953 & t_7 = 0.5727 \end{array}$$

Considerando que para $\alpha = 0.05$ e $f = 8-1 = 7$, $t_c = 2.37$, é possível concluir que o modelo inclui $\tilde{b}_0, \tilde{b}_2, \tilde{b}_3, \tilde{b}_5$ e \tilde{b}_6 , de tal forma temos

$$\hat{y} = -5.7008 + 3.2155x_2 - 4.4511x_3 - 1.8526x_5 - 2.2840x_6 \quad (4.19)$$

O valores de \hat{y}_n , $n = 1, \dots, N$ calculados de acordo com (4.19) para todo experimento são apresentados na Tabela 4.2. Com base nestes valores e de acordo com (4.7) temos

$$S^2 \{y\}_{ad} = \frac{6.3919}{8-5} = 2.1306$$

Tabela 4.2
Matriz do Planejamento 2^{7-4} para Análise Estatística Associada com
Estimativas da Dispersão de Reprodutibilidade

N	Fatores								Função		Variância de Adequação.
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	\bar{y}	\hat{y}	$(\bar{y} - \hat{y})^2$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	-9.9606	-8.6018	1.8463
2	+	+	-	-	-	-	+	+	-3.5378	-4.8966	1.8463
3	+	-	+	-	-	+	-	+	3.4234	2.3972	1.0531
4	+	+	+	-	+	-	-	-	5.0762	6.1024	1.0531
5	+	-	-	+	+	-	-	+	-9.7444	-9.2308	0.2638
6	+	+	-	+	-	+	-	-	-12.4224	-12.9360	0.2638
7	+	-	+	+	-	-	+	-	-7.1868	-7.3678	0.0328
8	+	+	+	+	+	+	+	+	-11.2540	-11.0730	0.0328
Soma											6.3919

De tal forma, $F = \frac{2.1306}{4.3559} = 0.4891$. Portanto para $\alpha = 0.05$ e $f_1 = 8-5 = 3$ e $f_2 = 5-1 = 4$, $F^C = 6.59$, podemos considerar o modelo (4.19) como adequado.

Realizando as substituições analógicas de (3.2) em (4.19) podemos obter o modelo.

$$\delta(\Delta P_{3,4}) = \{-188.50 + 86.18 \Delta I_{3,4} I_3 - 64.99 \Delta I_{3,4} I_4 - 14.93 \Delta I_{3,4} I_2 - 36.72 \Delta I_{3,4} I_5\} \cdot 10^{-3} \quad (4.20)$$

Considerando os mesmos valores de carga das barras da primeira abordagem (2.25) e $\Delta I_{3,4} = 2.10$ A temos que, $\delta(\Delta P_{3,4}) = - 8.5740$ kW.

A Segunda abordagem recomenda pelo trabalho [49], está associada com a construção da dispersão de reprodutibilidade, em dependência do erro máximo possível (aceitável), dado por ε , em definição da equação da regressão y , utilizando a seguinte correlação:

$$S_{rep}^2 \{y\} = (\varepsilon b_0)^2 \quad (4.21)$$

Para a análise estatística do caso apresentado, iremos adotar um erro máximo de 5%, e para verificarmos a significância dos coeficientes, e a adequação do modelo, utilizamos as mesmas equações (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18) da primeira abordagem. Portanto, para o primeiro caso, a dispersão de reprodutibilidade é a seguinte:

$$S_{rep}^2 \{y\} = (0.05 \times 5.7008)^2 = 0.0813$$

Da mesma maneira da primeira abordagem porém de acordo com (4.21), temos

$S_{rep}^2 \{y\} = 0.0813$ e de acordo com (4.6) temos as seguintes t -relações:

$$\begin{array}{cccc} t_0 = 56.5556 & t_1 = 1.6498 & t_2 = 31.8998 & t_3 = 44.1577 \\ t_4 = 7.6379 & t_5 = 18.3790 & t_6 = 22.6587 & t_7 = 4.1925 \end{array}$$

Tendo em vista que o valor crítico do critério de *Student's* é o mesmo da primeira abordagem, temos que $\tilde{b}_0, \tilde{b}_2, \tilde{b}_3, \tilde{b}_4, \tilde{b}_5, \tilde{b}_6$ e \tilde{b}_7 são significantes para o modelo e de tal forma temos

$$\hat{y} = -5.7008 + 3.2155x_2 - 4.4511x_3 - 0.7699x_4 - 1.8526x_5 - 2.2840x_6 + 0.4226x_7 \quad (4.22)$$

O valores de \hat{y}_n , $n = 1, \dots, N$ calculados de acordo com (4.22) para todo experimento são apresentados na Tabela 4.3. Com base nestes valores e de acordo com (4.7) temos

$$S^2 \{y\}_{ad} = \frac{0.2212}{8-7} = 0.2212$$

Tabela 4.3

Matriz do Planejamento 2^{7-4} para Análise Estatística Associada com Estimativas da Dispersão de Reprodutibilidade em Dependência do Erro Máximo Possível

N	Fatores								Função		Variância de Adequação.
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	\bar{y}	\hat{y}	$\left(\bar{y} - \hat{y}\right)^2$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	-9.9606	-9.7943	0.0277
2	+	+	-	-	-	-	+	+	-3.5378	-3.7041	0.0277
3	+	-	+	-	-	+	-	+	3.4234	3.5897	0.0277
4	+	+	+	-	+	-	-	-	5.0762	4.9099	0.0277
5	+	-	-	+	+	-	-	+	-9.7444	-9.5781	0.0277
6	+	+	-	+	-	+	-	-	-12.4224	-12.5887	0.0277
7	+	-	+	+	-	-	+	-	-7.1868	-7.0205	0.0277
8	+	+	+	+	+	+	+	+	-11.2540	-11.4203	0.0277
Soma											0.2212

De tal forma, $F = \frac{0.2212}{0.0813} = 2.72$. Portanto para $\alpha = 0.05$ e $f_1 = 8-7 = 1$ e $f_2 = 7-1 = 6$, $F^C = 5.99$, podemos considerar o modelo (4.22) como adequado.

Da mesma maneira utilizada na primeira abordagem, podemos determinar a equação que permite calcular o incremento de perdas $\delta(\Delta P_{3,4})$.

$$\delta(\Delta P_{3,4}) = \{167.30 + 86.18 \Delta I_{3,4} I_3 - 64.99 \Delta I_{3,4} I_4 - 5.16 \Delta I_{3,4} I_1 - 14.93 \Delta I_{3,4} I_2 - 36.73 \Delta I_{3,4} I_5 + 3.78 \Delta I_{3,4} I_6\} 10^{-3} \quad (4.23)$$

Considerando os mesmos valores de carga das barras da primeira abordagem (2.25) e $\Delta I_{3,4} = 2.10$ A temos que, $\delta(\Delta P_{3,4}) = -8.8845$ kW.

De tal forma, podemos apresentar abaixo os três modelos encontrados (4.13), (4.20) e (4.23).

$$\delta(\Delta P_{3,4}) = \{602.03 + 86.18\Delta I_{3,4}I_3 - 64.99\Delta I_{3,4}I_4 - 5.16\Delta I_{3,4}I_1 - 14.93\Delta I_{3,4}I_2 - 36.72\Delta I_{3,4}I_5\} \cdot 10^{-3}$$

$$\delta(\Delta P_{3,4}) = \{-188.50 + 86.18\Delta I_{3,4}I_3 - 64.99\Delta I_{3,4}I_4 - 14.93\Delta I_{3,4}I_2 - 36.72\Delta I_{3,4}I_5\} \cdot 10^{-3}$$

$$\delta(\Delta P_{3,4}) = \{167.30 + 86.18\Delta I_{3,4}I_3 - 64.99\Delta I_{3,4}I_4 - 5.16\Delta I_{3,4}I_1 - 14.93\Delta I_{3,4}I_2 - 36.73\Delta I_{3,4}I_5 + 3.78\Delta I_{3,4}I_6\} \cdot 10^{-3}$$

Portanto os diferentes caminhos de construção de dispersão de reprodutibilidade resultam em diferentes modelos depois da análise estatística do modelo obtido com base em planejamento de experimentos. Levando isto em consideração, para realizar a comparação das precisões dos resultados obtidos, foram realizadas simulações (com base de método de *Monte Carlo*) para níveis de variação de cargas $\pm 10\%$ (10 experimentos) e $\pm 20\%$ (10 experimentos). Os resultados dessas simulações são apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

É possível observar que o menor erro médio quadrático, corresponde à construção da dispersão de reprodutibilidade, com base no máximo erro possível (aceitável) (4.23). Em particular o valor deste erro para a variação de $\pm 10\%$ é igual a 1.70% (para a construção do modelo com base em (4.20) o erro médio quadrático é igual a 2.04%; para a construção do modelo com base em (4.13) o erro médio quadrático é igual a 3.78%). Este mesmo erro para a variação de $\pm 20\%$ é igual a 2.00% (para a construção do modelo com base em (4.20) o erro médio quadrático é igual a 3.08%; para a construção do modelo com base em (4.13) o erro médio quadrático é igual a 4.12%).

É possível observar também nas Tabelas 4.4 e 4.5, que entre os maiores percentuais de erro de cada modelo, o menor deles também corresponde à construção da dispersão de reprodutibilidade, com base no máximo erro possível

(aceitável) (4.23). Em particular o valor deste erro para a variação de $\pm 10\%$ é igual a 2.33% (para a construção do modelo com base em (4.20) o maior erro é igual a 3.50%; para a construção do modelo com base em (4.13) o maior erro é igual a 4.77%). Este mesmo erro para a variação de $\pm 20\%$ é igual a 2.72% (para a construção do modelo com base em (4.20) o maior erro é igual a 4.79%; para a construção do modelo com base em (4.13) o maior erro é igual a 6.41%).

De tal forma, é possível concluir que com base nas análises realizadas, do ponto de vista prático, é justificável usar o caminho de construção de dispersão reprodutibilidade com base no máximo erro possível (4.23).

Tabela 4.4
Análise de Erro – Variação de Carga de $\pm 10\%$

Barras	Experimentos											Erro Médio Quadrático (%)
	Variação de Carga de $\pm 10\%$ (A)											
	Nominal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Delta I	2.10	2.10	1.94	1.90	2.16	2.14	2.06	2.12	2.02	1.94	1.93	
I_1	120.00	126.48	129.60	115.68	124.32	112.08	111.84	130.80	117.84	116.40	118.56	
I_2	100.00	95.40	90.80	96.80	94.20	97.00	99.00	107.20	101.20	109.60	107.00	
I_3	30.00	29.76	29.64	32.46	32.76	28.20	30.84	28.92	28.80	30.12	30.78	
I_4	50.00	49.00	51.60	53.30	45.40	52.80	54.30	45.70	51.40	52.60	45.10	
I_5	50.00	49.20	47.10	50.80	50.90	47.50	52.00	54.00	52.50	47.50	50.70	
I_6	80.00	77.28	75.84	83.20	78.24	78.72	77.28	82.40	87.20	85.76	82.88	
Modelo Exato (2.20) $\delta(\Delta P_{3,4})$ [kW]	-8.7198	-8.5290	-7.9958	-7.8328	-7.7569	-9.2395	-9.0507	-9.0470	-8.9196	-8.3926	-7.5024	
1)Equivalente Funcional (4.20) $\delta(\Delta P_{3,4})$ [kW]	-8.5740	-8.2912	-7.7255	-7.7555	-7.5486	-9.1712	-8.9707	-8.8021	-8.8517	-8.3269	-7.3939	
2)Equivalente Funcional (4.23) $\delta(\Delta P_{3,4})$ [kW]	-8.8845	-8.6951	-8.1120	-7.9379	-7.9418	-9.4178	-9.2037	-9.2183	-9.0583	-8.5072	-7.6145	
3)Equivalente Funcional (4.13) $\delta(\Delta P_{3,4})$ [kW]	-9.0838	-8.8740	-8.2326	-8.1006	-8.1456	-9.6195	-9.3703	-9.4431	-9.2870	-8.6993	-7.7828	
Erro 1 (%)	1.70	2.87	3.50	1.00	2.76	0.75	0.89	2.78	0.77	0.79	1.47	2.04
Erro 2 (%)	-1.85	-1.91	-1.43	-1.32	-2.33	-1.89	-1.66	-1.86	-1.53	-1.35	-1.47	1.70
Erro 3 (%)	-4.01	-3.89	-2.88	-3.31	-4.77	-3.95	-3.41	-4.19	-3.96	-3.53	-3.60	3.78

Tabela 4.5
Análise de Erro – Variação de Carga de $\pm 20\%$

Barras	Experimentos											Erro Médio Quadrático (%)
	Variação de Carga de $\pm 20\%$ (A)											
	Nominal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Delta I	2.10	1.76	1.96	1.94	2.28	2.13	2.29	2.24	1.75	2.30	2.11	
I_1	120.00	117.12	96.96	139.68	98.40	142.08	121.92	143.52	108.96	115.20	136.32	
I_2	100.00	114.00	110.80	86.00	88.80	118.00	108.00	108.40	119.20	113.20	109.20	
I_3	30.00	31.56	35.28	33.24	34.80	31.80	32.52	30.48	35.52	35.52	35.28	
I_4	50.00	40.20	52.40	54.60	50.00	44.80	47.20	43.80	49.40	51.20	58.60	
I_5	50.00	51.40	46.40	46.20	50.60	44.80	48.00	50.40	45.60	44.80	53.20	
I_6	80.00	85.76	69.12	83.20	71.04	82.24	91.84	82.24	67.20	72.96	64.32	
Modelo Exato (2.20) $\delta(\Delta P_{3,4})$ [kW]	-8.7198	-6.3747	-7.4677	-7.6158	-7.9731	-8.1935	-8.5992	-8.8599	-6.6063	-8.6254	-9.8125	
1)Equivalente Funcional (4.20) $\delta(\Delta P_{3,4})$ [kW]	-8.5740	-6.3018	-7.4753	-7.2987	-8.0062	-7.8221	-8.5356	-8.4620	-6.4845	-8.4777	-9.3639	
2)Equivalente Funcional (4.23) $\delta(\Delta P_{3,4})$ [kW]	-8.8845	-6.4388	-7.5883	-7.7320	-8.1961	-8.3682	-8.8275	-9.0710	-6.6680	-8.8563	-9.9797	
3)Equivalente Funcional (4.13) $\delta(\Delta P_{3,4})$ [kW]	-9.0838	-6.5723	-7.6640	-7.9067	-8.3715	-8.5958	-9.1878	-9.3324	-6.6763	-9.0553	-10.0565	
Erro 1 (%)	1.70	1.16	-0.10	4.35	-0.41	4.75	0.74	4.70	1.88	1.74	4.79	3.08
Erro 2 (%)	-1.85	-1.00	-1.59	-1.50	-2.72	-2.09	-2.59	-2.33	-0.93	-2.61	-1.68	2.00
Erro 3 (%)	-4.01	-3.01	-2.56	-3.68	-4.76	-4.68	-6.41	-5.06	-1.05	-4.75	-2.43	4.12

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1 - Conclusões Sobre o Trabalho

Os modos de operação dos sistemas de distribuição e dos sistemas de potência são interligados de perto. Qualquer alteração da configuração das redes de distribuição, leva à redistribuição das cargas das subestações dos sistemas de potência, mudança do fluxo de potência e conseqüentemente, às perdas nos sistemas de potência. A falta de consideração da mudança de perdas no sistema de potência deprecia as soluções dos problemas de otimização de configuração das redes de distribuição. Levando isso em consideração, o presente trabalho está dedicado ao desenvolvimento e estudo das diferentes abordagens para a construção de modelos para a consideração da reação de sistemas de potência em problemas de otimização da configuração das redes de sistemas de distribuição.

A consideração direta da reação do sistema de potência é difícil de realizar, considerando o grande volume de informações sobre o sistema de potência e do sistema de distribuição. Por isso, no presente trabalho foram estudadas as diferentes abordagens para a construção de modelos (equivalentes) funcionalmente orientados para estimar a reação do sistema de potência para um passo (uns passos) arbitrário (arbitrários) de otimização com transferência ou tentativa de transferência de locação (locações) da desconexão da malha arbitrária da rede de distribuição. Isso permite utilizar diretamente métodos de otimização de passo que são suficientemente flexíveis e adaptáveis para diferentes estratégias práticas de busca de solução dos problemas de otimização monocritério e também multicritério da configuração das redes de distribuição. A

disponibilidade dos equivalentes indicados acima abre a possibilidade de utilizar outros métodos de otimização e técnicas de inteligência artificial para resolver os problemas da escolha dos lugares ótimos de desconexão em redes de distribuição considerando a reação dos sistemas de potência.

Os seguintes resultados foram obtidos:

1. Os caminhos para a construção dos modelos exatos foram estudados. Foi mostrada a racionalidade de utilização das noções dos coeficientes de distribuição e impedâncias de influência para a obtenção dos equivalentes funcionais destinados à consideração da reação dos sistemas de potência. Essa abordagem apresenta-se efetiva e clara do ponto de vista substancial. Entretanto, se os coeficientes de distribuição podem ser obtidos com base em uso de programas existentes para cálculo de fluxo de potência, a construção das impedâncias de influência demanda a elaboração do correspondente programa computacional.

2. Como uma alternativa de estimação da reação dos sistemas de potência com base nos modelos exatos pode ser considerada a utilização das técnicas do planejamento fatorial de experimentos para a construção dos modelos aproximados que também são os equivalentes funcionais. Em particular, foi mostrada a racionalidade da aplicação do planejamento fatorial de experimentos fracionais para a obtenção dos equivalentes funcionais com uma estrutura dada.

3. As etapas da análise estatística dos modelos construídos com base em planejamento de experimentos, associadas com a verificação da significância dos coeficientes dos modelos e a verificação da adequação dos modelos, são baseadas na utilização da dispersão de reprodutibilidade. A estimação dessa dispersão em condições de utilização do planejamento fatorial de experimentos não com sistema mas com o modelo do sistema, encontra as dificuldades relacionadas à

ausência dos resultados dos experimentos computacionais paralelos. Levando isso em consideração, foram estudados dois caminhos para a estimação da dispersão de reprodutibilidade: a condução artificial dos experimentos paralelos com base em simulação (método de *Monte Carlo*) e a utilização das duas abordagens para a construção artificial das estimativas da dispersão de reprodutibilidade.

4. Para verificar a precisão dos resultados obtidos depois da análise estatística dos modelos construídos com base em planejamento de experimentos, foram realizadas simulações com base no método de *Monte Carlo*. Estas simulações mostram que o caminho da construção da dispersão de reprodutibilidade baseada no uso de noção de erro máximo possível (aceitável) é mais justificável. Este resultado foi baseado nas simulações particulares, mas podem ter caráter geral para uso do planejamento de experimentos .

A utilização dos resultados dessa dissertação permitirá aumentar a adequação dos modelos utilizados em solução de um dos mais importantes problemas de planejamento e operação de sistemas de distribuição - otimização da configuração das redes e em conseqüência, o fundamento e a eficiência real das soluções, que podem ser obtidos com base em suas aplicações.

Os resultados dessa dissertação foram refletidos em um artigo “Taking into account power system reaction in problems of multicriteria optimizing network configuration in distribution systems”, publicado em Anais da IEEE Budapest Power Tech’99 Conference, Paper BPT99-398-25, Budapest, 1999.

5.2 - Proposições Para Trabalhos Futuros

Os resultados da dissertação, associados com a utilização de planejamento de experimentos para a construção dos modelos orientados funcionalmente, incluindo a análise estatística dos resultados dos experimentos, tem o caráter universal e podem encontrar as aplicações em solução de diversos problemas de planejamento e operação de sistemas e subsistemas de potência. Como exemplo, é possível indicar a construção dos equivalentes dos sistemas de potência em solução dos problemas de compensação de potência reativa em sistemas de distribuição.

A proposição para o desenvolvimento imediato do presente trabalho esta associada com adaptação dos seus resultados para aplicação e implementação computacional para aplicações em planejamento de curta duração e controle em tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Plano Decenal de Expansão 2000/2009*. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1999.
- [2] *Método para Determinação, Análise e Otimização das Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição*. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1996.
- [3] S. Civanlar, J. J. Grainger, H Yin, and S. S. H. Lee, Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.3, no. 3, 1988, pp. 1217-1223.
- [4] V. E. Vorotnitskij, Yu. S. Zelezko, V. N. Kazantsev, V. G. Pekelis e D. L. Fajbsovitch, *Perdas de Energia Elétrica em Redes Elétricas de Sistemas de Potência*. Moscou: Energoatomizdat, 1983 (em Russo).
- [5] I. O. Kneller, *Utilização de Computadores em Engenharia de Potência*. Moscou: Energoatomizdat, 1981 (em Russo).
- [6] A. Z. Krushelnitsky, V. V. Litvinenko, O. V. Musatov, V. A. Popov, B. N. Serdyk e P. I. Ekel, Aplicação de sistema informativo-computacional para cálculos operacionais em sistemas de fornecimento de energia elétrica, *Redes e Sistemas Elétricos*, vol. 16, 1980, pp. 65-75 (em Russo).
- [7] V. V. Zorin e I. V. Nedin, Escolha de esquemas ótimos das redes de distribuição considerando a confiabilidade com ajuda de computador, em *Experiência de Projeto de Sistema de Fornecimento de Energia Elétrica de Cidades*. Leningrad: Energia, 1973, pp. 112-115 (em Russo).
- [8] V. A. Popov e P. I. Ekel, Aplicação de teoria de conjuntos fuzzy para selecionar os lugares de desligamento em redes elétricas de distribuição com vários critérios, *Eletrodinâmica Técnica*, vol. 5, no. 6, 1983, pp. 50-55 (em Russo).

- [9] M. E. Baran and F. Wu, Network reconfiguration in distribution system for loss reduction and load balancing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, 1989, pp. 1401-1407.
- [10] N. G. Bretas, A. C. B. Delbem e A. de Carvalho, Restabelecimento de energia ótimo para sistemas de distribuição radiais por algoritmos genéticos, em *Anais de III Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica*. São Paulo, 1998, pp. 577-581.
- [11] R. P. Broadwater, A. H. Khan, H. E. Shaalan, and R. E. Lee. Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, 1993, pp. 294-300.
- [12] P. Ya. Ekel, L. D. B. Terra, C. C. Fontes, J. P. Souza, and V. A. Popov, Taking into account power system reaction in problems of multicriteria optimizing network configuration in distribution system, in *Proceedings of the IEEE Budapest Power Tech'99 Conference*. Budapest, 1999. BPT99-398-25.
- [13] V. V. Zorin, A. Z. Krushelnitsky, V. A. Popov. P. I. Ekel, Kh. Bassam, A. A. Zuravlev e A. S. Belov, Otimização de desenvolvimento de redes de distribuição de baixa tensão, *Revista de Estabelecimentos de Educação Superior de URSS. Energética*, vol. 34, no. 3, 1991, pp. 25-28 (em Russo).
- [14] C.-C. Liu, S. J. Lee, and K. Vu, Loss minimization of distribution feeders: optimality and algorithms, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, 1989, pp. 1281-1289.
- [15] C. T. Huddleston, R. P. Broadwater, and A. Chandrasekaran, Reconfiguration algorithm for minimizing losses in radial electric distribution systems, *Electric Power Systems Research Journal*, vol. 18, no. 1, 1990, pp. 57-67.
- [16] V. G. Kuznetsov, Yu. I. Tugaj e V. A. Bazenov, *Otimização de Modos de Operação de Redes Elétricas*. Kiev: Naukova Dumka, 1992 (em Russo).

- [17] K. Aoki, T. Ichimori, and M. Kanezashi, Normal state optimal load allocation in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, no. 1, 1987, pp. 147-155.
- [18] A. Merlin and H. Back, Search for a minimum-loss operating spanning tree configuration for an urban power distribution system, *Proceedings of the 5-th Power Systems Computation Conference*. Cambridge, 1975, paper 1.2/6.
- [19] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, 1989, pp. 1492-1498.
- [20] D. W. Ross, J. Patton, A. I. Cohen, and M. Carsov, New methods for evaluating distribution automation and control (DAC) systems benefit, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 6, 1981, pp. 2978-2986.
- [21] S. K. Goswami and S. K. Basu, A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, 1992, pp. 1484-1491.
- [22] P. J. M. Laarhoven and E. H. L. Aarts, *Simulated Annealing: Theory and Applications*. Dordrecht: Richel, 1987.
- [23] H.-D. Chiang and R. Jean-Jumeau, Optimal network reconfiguration in distribution systems: Part 1: A new formulation and solution methodology, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, 1990, pp. 1902-1908.
- [24] H.-D. Chiang and R. Jean-Jumeau, Optimal network reconfiguration in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, 1990, pp. 1568-1574.
- [25] H. C. Cheng and C. C. Kuo, Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing, *Electric Power Systems Research Journal*, vol. 29, no. 3, 1994, pp. 227-238.

- [26] T. Taylor and D. Lubkeman. Implementation of heuristic search strategy for distribution feeder reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 1, 1989, pp. 239-246.
- [27] C. C. Liu, S. J. Lee, and S. S. Venkata, An expert system optimal aid for restoration and loss reduction of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 2, 1988, pp. 619-625
- [28] J. L. Chen and Y. Y. Hsu, An expert systems for load allocation in distribution expansion planning, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 4, no. 3, 1989, pp. 1910-1917.
- [29] K. Nara, T. Satoh, and M. Kitagova, Distribution systems loss minimum reconfiguration by genetic algorithm, in *Proceedings of the Third Symposium on Expert Systems Application to Power Systems*. Tokyo-Kobe, 1991, pp. 724-730.
- [30] N. Kagan e C. C. B. de Oliveira, Utilização de algoritmos genéticos para a minimização de perdas em redes de distribuição de energia elétrica, em *Anais do III Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica*. São Paulo, 1998, pp. 587-591.
- [31] M. A. Pereira e C. A. F. Murari, Aplicação de algoritmos genéticos em de redes de distribuição de energia elétrica, em *Anais do III Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica*. São Paulo, 1998, pp. 592-596.
- [32] N. Kagan and C. C. B. de Oliveira, Fuzzy decision model for the reconfiguration of distribution networks using genetic algorithms, in *Proceedings of the 13th Power Systems Computation Conference*. Trondheim, vol. 2, 1999, pp. 929-935.
- [33] R. Bellman and L. Zadeh, Decision making in a fuzzy environment, *Management Sciences*, vol. 17 (B), no. 4, 1970, pp. 141-164.

- [34] H. Kim, Y. Ko, and K. H. Jung, Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, 1993, pp. 1356-1366.
- [35] E. Gauche, J. Coelho, and R. C. G. Teive, A mixed back-propagation Marquardt-Levenverg algorithm fot optimizing the distribution systems operation, in *Proceedings of the 1999 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*. New Orleans, vol. 2, 1999, pp. 765-770.
- [36] P. Ya. Ekel and V. A. Popov, Consideration of the uncertainty factor in problems of modelling and optimizing electrical networks, *Power Engineering*, vol. 23, no. 2, 1985, pp. 45-52.
- [37] P. Ya. Ekel, Approach to decision making in fuzzy environment, *International Journal of Computers and Mathematics with Applications*, vol. 37, no. 4, 1999, pp. 59-71.
- [38] P. I. Ekel, V. A. Popov e A. I. Klushnik, Análise de reação de redes de alimentação em problemas de otimização de redes de distribuição, *Redes e Sistemas Elétricos*, vol. 22, 1986, pp. 65-72 (em Russo).
- [39] O. E. Elgerd. *Electric Energy Systems: An Introduction*. New Delhi: McGraw-Hill, 1975.
- [40] A. J. Monticelli, *Flixo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Edgar Blücher, 1983.
- [41] A. S. Debs, *Modern Power Systems Control and Operation*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [42] P. Ya. Ekel, L. D. B. Terra, M. F. D. Junges, F. J. A. de Oliveira, R. Kowaltscuk, L. Mikami, J. R. P. da Silva, and T. Y. Taguti, An approach to constructing sensitivity indices and fuzzy control of system voltage and reactive power, in *Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference*. New Orleans, vol. 2, 1999, pp. 759-764.

- [43] P.Ya. Ekel, M.F.D. Junges, J.L.T. Morra, and F.P.G. Paletta, Fuzzy logic based approach to voltage and reactive power control in power systems, *International Journal of Computer Research*, vol. 11, no. 2, 2002, pp. 159-170.
- [44] G. E. P. Box, W. G. Hunter and Y. S. Hunter, *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [45] V. I Barabaschuk, B. P. Kredentser, e B. I. Miroshnichenko. *Planejamento Experimental em Engenharia*. Kiev: Tekhnika, 1985 (em Russo).
- [46] B. Barros-Neto, I. S. Scarmino e R. E. Bruns,. *Planejamento e Otimização de Experimentos*. Campinas: Editora UNICAMP, 1995.
- [47] V. G. Kholmsky, *Cálculos e Otimização de Modos de Operação de Redes Elétricas*. Moscou: Visshaya Shkola, 1985 (em Russo).
- [48] R. E. Shannon, *Systems Simulations: The Art and Science*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1975.
- [49] F. G. Guseinov e S. M. Mamedyarov, *Planejamento de Experimentos em Problemas de Engenharia de Potência*. Moscou: Energoatomizdat, 1988.