

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Modelos Multicritério de Localização de Transformadores

Reservas no Contexto de Planejamento de Manutenção

TESE SUBMETIDA À UFPE

PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE DOUTOR

POR

HELDEMARCIO LEITE FERREIRA

Orientador: Prof. Adiel Teixeira de Almeida, PhD

RECIFE, OUTUBRO/2009

F383m Ferreira, Heldemarcio Leite

Modelos multicritério de localização de transformadores reservas no contexto de planejamento de manutenção / Heldemarcio Leite Ferreira. – Recife: O Autor, 2009.

xviii, 147 f.; il., figs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2009.

Inclui Referências Bibliográficas e Anexos.

1. Engenharia de Produção. 2. Planejamento de Manutenção. 3. Localização. 4. Teoria da Utilidade Multiatributo. 5. Modelo Multicritério. 6. Transformador Reserva. I. Título.

UFPE

658.5 CDD (22.ed.)

BCTG/2009-216



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE TESE DE
DOUTORADO DE

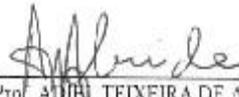
HELDEMARCIO LEITE FERREIRA

**“MODELOS MULTICRITÉRIO DE LOCALIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES
RESERVAS NO CONTEXTO DE PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato HELDEMARCIO LEITE FERREIRA **APROVADO**.

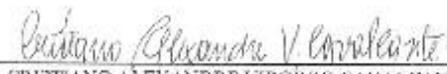
Recife, 22 de outubro de 2009.



Prof. ABEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)



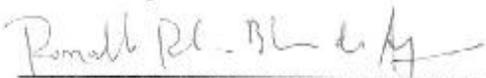
Prof.^ª CAROLINE MARIA DE MIRANDA MOTA, Doutor (UFPE)



Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGINIO CAVA_CANTE, Doutor (UFPE)



Prof. PETR IAKOVLEVITCH EKEL, PhD (PUC-MG)



Prof. RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, Doutor (UFPE)

*Senti o gosto do som
ao ouvir o cheiro das horas
enquanto “vidiei” tocar os delírios...
Aquilo que é inerte me move para a vida*

Heldemarcio Ferreira (06/09/2007)

Aos meus pais, Geraldo Alves Ferreira e Maria do Socorro Leite Ferreira, por representarem a origem de tudo em mim, grande parte da razão de ser como sou e de ser o que sou, e minha primeira orientação na academia da vida.

Aos meus irmãos, Helder Marcos, Heldemar e Helson Tadeu, pela memória afetiva que resgata em mim a confiança quando a distância esteve sempre além do espaço físico.

À minha filha Rachel Souza Ferreira por quem fui, sou e serei eternamente aPAIXonado.

AGRADECIMENTOS

Nesta tese, em que me proponho a expor idéias concebidas à luz da racionalidade, reservo esse pequeno espaço para exprimir a minha gratidão e dar vazão à sensibilidade.

Em primeiro lugar, como é de costume ressaltar, “creio” que devo agradecer a Deus, com toda a fé que ao agnóstico se faz possível, e a contradição a que todo o cristão se torna passível. Ciente de estar entre essas criaturas movidas por desejos e traídas pela vaidade, sendo um mero protagonista desta sutil ambigüidade que é celebrar uma conquista exaltando a divindade.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida, pelo resgate, confiança e paciência para comigo. Em uma época de minha vida que foi pródiga em desafios e repleta de turbulência, também lhe sou grato por ter sido meu amigo.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção pelo alto nível de profissionalismo e dedicação que me proporcionaram a obtenção dos conhecimentos e do necessário formalismo na abordagem dos construtos que permeiam este trabalho e na sua fundamentação.

À secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, na pessoa de Juliane pelo atendimento solícito, simpático e competente na condução dos procedimentos administrativos, sempre no apoio ao corpo discente.

À professora Maria Betânia Rocha Azevedo pela valiosa assistência, no que se refere à língua inglesa, visando o cumprimento da exigência estabelecida por este programa quanto ao exame de proficiência.

Aos colegas de estudo, em particular: Afrânio Galdino Araújo, Alexsandra Prazeres Cesário, Diana Yomali Ospina Lopez, Fernanda Maria Campello de Souza, Rebeca Campos Cavalcanti e aos atuais professores, Adiel Teixeira de Almeida Filho e Rodrigo José Pires Ferreira, com os quais compartilhei momentos de amizade, aprendizado e reflexão. Será sempre uma saudosa lembrança eivada de carinho e guardada no coração.

Ao amigo, que primo quase como irmão, Otoni Nóbrega Neto, pela inestimável ajuda na etapa de programação, que permitiu realizar os cálculos e obter os resultados do capítulo de aplicação. Além das críticas e sugestões que me fizeram aprimorar os modelos durante as simulações, com o auxílio da linguagem matlab que se mostrou tão amigável e bem sucedida que talvez até, quem sabe, também mereça ser agradecida.

Expresso a minha gratidão aos amigos e colegas da CELPE que me apoiaram durante todo o período em que estive debruçado no tema da minha pesquisa. As elicitações e dados usados nesta tese podem ser revertidos em benefícios para a Empresa e para a sociedade que ela visa, e foram propiciados por todos executivos entrevistados de forma bastante precisa.

Por fim, deixo registrado um agradecimento emocionado a todas aquelas pessoas que, de um modo indeterminado, contribuíram para que mais um sonho de vida fosse realizado.

RESUMO

O problema da localização de reservas técnicas em instalações industriais tem caráter bastante específico, sendo raramente encontrado na literatura. Não obstante, essa questão se reveste de grande relevância para o desempenho do processo produtivo subjacente, uma vez que a disposição desses ativos tem influência direta sobre a manutenibilidade do sistema e, por conseguinte, afeta a disponibilidade da planta de produção. Tais efeitos refletem na qualidade do produto, especialmente no caso dos sistemas de produção de serviço. Além disso, a percepção do cliente em relação às falhas ou não conformidades do produto é imediata; as conseqüências desses eventos são geralmente irreversíveis para o usuário do serviço, podendo ocasionar prejuízos de ordem econômica ou de natureza intangível. Este estudo trata da localização de reservas técnicas para transformadores de potência em subestações de uma concessionária de energia elétrica. O problema é abordado mediante uma metodologia multicritério de apoio à decisão, fundamentada na teoria da utilidade multiatributo, para a obtenção de soluções eficientes, interpretadas como recomendações aos gerentes responsáveis pela gestão desses ativos. É proposta uma série de modelos de localização que são adotados de acordo com a conveniência, a fim de contemplar diferentes cenários para reservas únicas ou múltiplas. A progressiva evolução entre os modelos permite incorporar aspectos específicos do sistema de produção em apreço, tais como: arranjo das subestações, propensão à falha dos equipamentos, capacidade e raio de cobertura das reservas técnicas. Como os resultados obtidos do estudo de caso se mostraram coerentes e robustos, indicando soluções que refletem o melhor compromisso entre o conjunto de objetivos previamente estabelecidos para o atendimento global do sistema de produção abordado, fica evidenciado que a adoção desses modelos, no contexto do planejamento da manutenção, propicia um aproveitamento mais racional dos recursos de reserva técnica disponíveis.

Palavras-chave: localização, MAUT, modelo multicritério, planejamento de manutenção, transformador reserva.

ABSTRACT

The issue of location technical reserves in industrial installations is of rather specific character, rarely found in the literature. Nevertheless, it has great relevance in the performance of subjacent production process, once disposal of such assets has direct influence on the maintainability of the system, thus affecting the availability of the production plant. Those effects reflect on the quality of the product, especially regarding the services production systems. Besides, the client's perception of the product's faults or its non-compliance is immediate, the consequences of these events being generally irreversible to the user of the service, enabling technical economic or intangible damage. This paper concerns the location of technical reserves to power transformers in substations of a power distribution company. The problem is approached under a multi-criterium methodology of support to decision, fundamented in the multi-attribute utility theory, in order to obtain efficient solutions, interpreted as recommendations to the managers in charge of those assets. Several location models adopted according to convenience are proposed, in order to contemplate different scenarios of single or multiple reserves. The progressive development among the models allows for the incorporation of specific aspects of the production system in question, such as: the arrangement of the substations, inclination to equipment failure, capacity and coverage area of the reserves. As the outcome of the case study has proved coherent and sound, with solutions which reflect the best commitment to the previously established objectives of the global compliance with the production system in the approach, it becomes evident that adopting such models, in the context of maintenance planning, provides a more rational utilization of the resources of technical reserves available.

Keywords: location, MAUT, multicriteria model, maintenance planning, reserve transformer.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos do trabalho	2
1.1.1. Objetivo Geral	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Estruturação da Tese	3
2. BASE CONCEITUAL.....	5
2.1. Confiabilidade	5
2.1.1. Conceito.....	5
2.1.2. A Função Confiabilidade.....	6
2.1.3. A Confiabilidade na Manutenção	9
2.2. Manutenibilidade	10
2.2.1. Conceito.....	10
2.2.2. A Função Manutenibilidade.....	11
2.2.3. A Manutenibilidade e a Manutenção	12
2.3. Disponibilidade	12
2.3.1. Conceito.....	12
2.3.2. A Função Disponibilidade	13
2.3.3. A Disponibilidade e a Manutenção	15
2.4. Localização.....	16
2.4.1. Sistemas de Apoio a Decisão.....	18
2.4.1.1. Estrutura do Sistema de Apoio à Decisão.....	19
2.4.2. Modelos de Localização de Instalações.....	21
2.4.2.1. Modelos no Plano	22
2.4.2.2. Modelos de Rede	23
2.4.2.3. Modelos Centrais	24
2.4.2.4. Modelos Medianos.....	24
2.4.2.5. Modelos de Cobertura.....	24

2.4.3.	O Problema da Localização de Serviços de Emergência	25
2.4.4.	O Problema de Localização Hierárquico de Máxima Cobertura.....	27
2.4.5.	O Problema da Localização de Reservas.....	29
2.5.	Decisão Multicritério.....	31
2.5.1.	Estrutura do Conjunto de Ações	31
2.5.2.	Modelo Multicritério	33
2.5.3.	Aplicação da MAUT	34
2.5.3.1.	Elicitação da Utilidade.....	36
2.6.	Abordagem Bayesiana.....	37
2.6.1.	Distribuição a priori.....	38
2.6.2.	Método de Elicitação	38
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	40
3.1.	Breve Histórico Sobre Localização.....	41
3.2.	Modelos de Localização.....	43
3.2.1.	Propostas de Classificação dos Modelos de Localização.....	47
3.2.2.	Localização de Instalações em Sistemas de Produção de Bens.....	52
3.2.2.1.	Modelos Exatos.....	53
3.2.2.2.	Modelos Heurísticos	54
3.2.2.3.	Modelos com Metaheurísticas	55
3.2.3.	Localização de Instalações em Sistemas de Produção de Serviços.....	57
3.2.3.1.	Modelos Para Localização de Serviços de Emergência.....	57
3.2.3.2.	Modelos de Localização-Alocação	58
3.2.3.3.	Modelos de Localização Hierárquicos.....	59
3.2.3.4.	Modelos com Competição e Interceptação de Fluxo.....	60
3.2.3.5.	Modelos Multicritério	61
3.2.3.6.	Modelos de Teoria das Filas	63
3.2.3.7.	Modelos com Incerteza	64
3.2.3.8.	Modelos de Localização e Rota com Descarga (ou transbordo).....	66
3.2.3.9.	Modelos de Otimização com Novos Algoritmos e Heurísticas	67

3.3.	Localização de Transformadores Reservas	69
3.4.	Conclusão	71
4.	MODELOS PROPOSTOS PARA RESERVA ÚNICA	72
4.1.	Modelo de Utilidade Multiatributo para Localização de Reserva Técnica de Transformador	73
4.1.1.	Visão geral do problema	73
4.1.2.	Modelagem do problema	76
4.1.3.	Os critérios	77
4.1.4.	Vetor Critério Ponderado	79
4.1.5.	A Estrutura de Preferências do Decisor	79
4.1.6.	A Função Utilidade Multiatributo	81
4.1.7.	O Sistema de Apoio a Decisão	82
4.1.8.	Conclusão	87
4.2.	Modelo Alternativo de Utilidade Multiatributo para Localização de Reserva Técnica de Transformador	88
4.2.1.	Visão geral do problema	88
4.2.2.	Formulação do Modelo	88
4.2.2.1.	A Propensão à Falha por Subestação	89
4.2.2.2.	A Formulação da Função Utilidade	90
4.2.3.	A Função Utilidade Multiatributo	92
4.2.4.	Conclusão	92
5.	MODELO PROPOSTO PARA MÚLTIPLAS RESERVAS	94
5.1.	Modelo Para Localização de Múltiplas Reservas de Transformadores	94
5.1.1.	A Formulação do Modelo	95
5.1.1.1.	A Propensão à Falha por Subestação	96
5.1.1.2.	A Formulação da Função Perda	98
5.1.1.3.	A Estrutura de Preferências do Decisor	100
5.1.2.	A Função Utilidade Multiatributo	101
5.2.	Conclusão	104

6. APLICAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS.....	105
6.1. Contextualização do Problema.....	105
6.2. Metodologia	106
6.3. Abordagem do Problema.....	107
6.4. Resultados obtidos.....	111
6.4.1. Aplicação do Modelo 1.....	112
6.4.2. Aplicação do Modelo 2.....	114
6.4.3. Aplicação do Modelo 3.....	115
6.5. Análise de Sensibilidade dos Resultados	117
6.5.1. Análise de Sensibilidade do Modelo 1	117
6.5.2. Análise de Sensibilidade do Modelo 2	119
6.5.3. Análise de Sensibilidade do Modelo 3	120
6.6. Conclusão	121
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	122
7.1. Conclusões	122
7.2. Sugestões Para Futuros Trabalhos.....	126
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
ANEXO 1.....	139
Modelo 1 (Localização de reserva única para SE's com demanda idêntica)	139
Modelo 2 (Localização de reserva única para SE's com demandas diferenciadas)	141
Modelo 3 (Localização de múltiplas reservas para SE's com demandas diferentes)...	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema reparável x sistema não reparável (Adaptado de Almeida, 1997)	8
Figura 2.2 - Compromisso entre manutenibilidade e confiabilidade	14
Figura 2.3 - Probabilidades de transição de estados	14
Figura 2.4 - Estrutura de um SAD (Adaptado de Dias et al., 2003).....	19
Figura 2.5 - Modelo de Localização de Empresas (Fonte: Ferreira et al., 2003)	29
Figura 2.6 - Empresas Localizadas (Fonte: Ferreira et al. 2003)	30
Figura 4.1 - Localização de reserva para 6 SE's (Adaptado de Ferreira et al, 2005.).....	75
Figura 4.2 - Tela inicial (escolha do tipo de arquivo)	83
Figura 4.3 - Dados de entrada.....	84
Figura 4.4 - Cenários	85
Figura 4.5 - Curvas de utilidade dos atributos.....	85
Figura 4.6 - Resultados e utilidades	86
Figura 4.7 - Análise de sensibilidade.....	87
Figura 4.8 - Representação da transição de estados	89
Figura 5.1 - Representação da transição de estados	96
Figura 5.2 - Função perda para os atributos	101
Figura 6.1 - Localização geográfica das subestações demandantes (Fonte:CELPE).....	111
Figura 6.2 - Representação gráfica das soluções viáveis do Modelo 1	112
Figura 6.3 - Representação das soluções viáveis do Modelo 1 utilizando o ALOCA	113
Figura 6.4 - Representação gráfica das soluções viáveis do Modelo 2	114
Figura 6.5 - Representação Gráfica das soluções viáveis do Modelo 3	116
Figura 6.6 - Análise de sensibilidade do Modelo 1 pelo SAD ALOCA	118
Figura 6.7 - Análise de sensibilidade do Modelo 1 pelo SAD ALOCA (continuação)	118
Figura 6.8 - Transformadores reservas para alocação (fonte: CELPE).....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Dados das subestações demandantes.....	107
Tabela 6.2 - Constantes de escala e parâmetros das funções utilidade.....	109
Tabela 6.3 - Parâmetros da função a priori sobre a propensão à falha das SE's	110
Tabela 6.4 - Tabulação dos Resultados do Modelo 1	112
Tabela 6.5 - Tabulação dos Resultados do Modelo 2.....	114
Tabela 6.6 - Análise de sensibilidade do Modelo 1	117
Tabela 6.7 - Análise de Sensibilidade do Modelo 2	119
Tabela 6.8 - Análise de Sensibilidade do Modelo 3	120
Tabela 7.1 - Hipóteses de cada Modelo.....	125

SIMBOLOGIA

Símbolo	Unidade (SI)	Denominação do Símbolo
$A(t)$		Função disponibilidade
A_1, A_2 e A_3		parâmetros das funções utilidade dos atributos (por elicitación de preferência)
AHP		Processo Hierárquico Analítico (Analytic Hierarchy Process)
a_{ij}		indicador do teste de cobertura da área de demanda $j \in J$ pela facilidade localizada em $i \in I$
a_{ij}		indicador do teste de cobertura da área de demanda $j \in J$ pelo serviço de nível 1 (dentro da distância $R1$) oferecido pela facilidade de nível 1 localizada em $i \in I$
a_{ij}		indicador de cobertura do transformador de nível 1 da SE $j \in J$ (dentro da distância crítica $R11$), oferecido pela reserva de nível 1 na SE $i \in I$
ANEEL		Agência Nacional de Energia Elétrica
β		parâmetro de forma da f.d.p <i>a priori</i> Weibull sobre a probabilidade equivalente de falha
b_{ij}		indicador do teste de cobertura da área de demanda $j \in J$ pelo serviço de nível 2 (dentro da distância $T1$) oferecido pela facilidade de nível 2 localizada em $i \in I$
b_{ij}		indicador de cobertura do transformador de nível 1 da SE $j \in J$ (dentro da distância crítica $R21$), oferecido pela reserva de nível 2 da SE $i \in I$
CELPE		Companhia Energética de Pernambuco
c_{ij}		indicador do teste de cobertura da área de demanda $j \in J$ pelo serviço de nível 2 (dentro da distância $R2$) oferecido pela facilidade de nível 2 localizada em $i \in I$
c_{ij}		indicador de cobertura do transformador de nível 2 (dentro da distância crítica $R22$), oferecido apenas pela reserva de nível 2
CM		Coefficiente de mérito
CPLM		Modelo de localização de plantas capacitadas (Capacitated Plant Location Model)
$ d_{ij} $	m	matriz quadrada de distâncias entre a subestação i e a subestação j
$ d_{kj} $	m	matriz quadrada de distâncias entre a subestação k e a subestação j
$E(L(g_{ij}))$		Esperança da perda, segundo o atributo indústrias atendidas pela subestação j
$E(L(ip_j))$		Esperança da perda, segundo o atributo população atendida pela subestação j

$E(L(is_j))$	Esperança da perda, segundo o atributo de saúde atendido pela subestação j
$E(U(i_{kj}))$	Esperança da utilidade segundo o critério ponderado de industrialização
$E(U(p_{kj}))$	Esperança da utilidade segundo o critério ponderado de população
$E(U(s_{kj}))$	Esperança da utilidade segundo o critério ponderado de serviços de saúde
ELECTRE	Representação da realidade por eliminação e escolha (ELimination Et Choix Traduisant la REalité)
$E_{\lambda_j}(L(gi_j))$	Esperança da perda, segundo o atributo industrialização, para a comunidade atendida pela subestação j, sob incerteza na probabilidade equivalente de falha
$E_{\lambda_j}(L(ip_j))$	Vesperança da perda, segundo o atributo população, para a comunidade atendida pela subestação j, sob incerteza na probabilidade equivalente de falha
$E_{\lambda_j}(L(is_j))$	Esperança da perda, segundo o atributo saúde, para a comunidade atendida pela subestação j, sob incerteza na probabilidade equivalente de falha
$E_{\lambda_j}(U(gi_j))$	Esperança da utilidade, segundo o atributo industrialização, para a comunidade atendida pela subestação j, sob incerteza na probabilidade equivalente de falha da mesma
$E_{\lambda_j}(U(ip_j))$	Esperança da utilidade, segundo o atributo população, para a comunidade atendida pela subestação j, sob incerteza na probabilidade equivalente de falha da mesma
$E_{\lambda_j}(U(is_j))$	Esperança da utilidade, segundo o atributo saúde, para a comunidade atendida pela subestação j, sob incerteza na probabilidade equivalente de falha da mesma
$E_{\lambda_k}(U(i_{kj}))$	Esperança da utilidade segundo o critério ponderado de industrialização, sob incerteza na probabilidade equivalente de falha da subestação k
$E_{\lambda_k}(U(p_{kj}))$	Esperança da utilidade segundo o critério ponderado de população, sob incerteza na probabilidade equivalente de falha da subestação k
$E_{\lambda_k}(U(s_{kj}))$	Esperança da utilidade segundo o critério ponderado de saúde, sob incerteza na probabilidade equivalente de falha da subestação k
EUA	Estados Unidos da América
$f(t)$	Função densidade de probabilidade de falhas
$F(t)$	Função distribuição acumulada de falhas
Fc_j	fator de carga da subestação j
Fc_k	fator de carga para a subestação k
FDH	Free Disposable Hull
fdp	Função distribuição de probabilidade

F_{ij}		valor do fator j na localidade i
f_j		população da área de demanda j
f_j^c		demanda ponderada atendida pela subestação j
FPL		Florida Power Light
$g(t)$		Função densidade de probabilidade de reparo
$ g_{ij} $	m	vetor do grau de industrialização
g_{ij}		elemento do vetor do critério grau de industrialização para a subestação j
g_{ij}		indicador de industrialização, atendida pela subestação j , corrigido pelo fator de carga
$ g_{ik} $	m	vetor do critério grau de industrialização para a subestação demandante k
g_{ik}		indicador de industrialização, atendida pela subestação k , corrigido pelo fator de carga
GRASP		Procedimento de busca adaptativa, aleatória e gulosa (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)
η		parâmetro de escala da f.d.p a priori Weibull sobre a probabilidade equivalente de falha
$h(t)$		Função risco ou taxa de risco
I		conjunto de locais potenciais para receber as facilidades
I		conjunto de subestações onde as reservas podem ser instaladas
$ i_{kj} $		vetor critério ponderado de industrialização
$ ip_j $		vetor indicador populacional
ip_j		elemento do vetor do critério indicador de população para a subestação j
ip_j		indicador de população, atendida pela subestação j , corrigido pelo fator de carga
$ ip_k $		vetor do critério indicador de população para a subestação demandante k
ip_k		indicador de população, atendida pela subestação k , corrigido pelo fator de carga
$ is_j $		vetor índice de serviços de atendimento coletivo de saúde
is_j		elemento do vetor do critério indicador de serviços coletivos de saúde para a subestação j
is_j		indicador de serviços de saúde, atendidos pela subestação j , corrigido pelo fator de carga
$ is_k $		vetor do critério índice de serviços coletivos de saúde para a subestação demandante k
is_k		indicador de serviços de saúde, atendidos pela subestação k , corrigido pelo fator de carga
φ		atributo genérico
J		conjunto de áreas de demanda
J		conjunto de subestações demandantes

JIT		Just-in-time
K_1, K_2, K_3 e K		constantes de escala estabelecidas pelo processo de elicitação
K_1, K_2, K_3 e K_{13}		constantes de escala estabelecidas pelo processo de elicitação
K_y e K_z		constantes de escala para os critérios y e z
λ		taxa de falhas (modelo exponencial)
$L(f_j^c)$		Função perda referente à demanda ponderada na subestação j ;
$L(g_j)$		Função perda, segundo o atributo indústrias atendidas pela subestação j
$L(ip_j)$		Função perda, segundo o atributo população atendida pela subestação j
$L(is_j)$		Função perda, segundo o atributo de serviços saúde atendidos pela subestação j
$L(\theta, d(x))$		Função perda decorrente da decisão $d(x)$ quando a natureza escolhe o estado θ
λ_j		probabilidade equivalente de falha da subestação j
λ_k		probabilidade equivalente de falha da subestação k
μ		taxa de reparo (modelo exponencial)
$M(t)$		Função mantabilidade
$\mu(t)$		taxa de reparo instantânea
MAUT		Teoria da utilidade multiatributo (Multiple Attribute Utility Theory)
MCLP		Problema de localização de máxima cobertura (Maximal Covering Location Problem)
m_j		número de transformadores da subestação j
m_k		número de transformadores da subestação k
MLHMC		Modelo de localização hierárquico de máxima cobertura
MME		Ministério das Minas e Energia
MTBF	h	tempo médio entre falhas (Mean Time Between Failute)
MTTF	h	tempo médio para a falha (Mean Time To Failure)
MTTR	h	tempo médio para reparo (Mean Time To Repair)
n		número de subestações
p		número de facilidades a serem localizadas
p		número de reservas (facilidades) de nível 1 a serem localizadas;
π		valor de utilidade atribuída por um procedimento de elicitação de preferência
$ p_{kj} $		vetor critério ponderado de população
$P(i_{kj})$		probabilidade do estado da natureza na subestação j , cuja utilidade da consequência, para cada ação escolhida, é medida segundo o critério de industrialização;
$P(i_{kj})$		probabilidade do estado da natureza, cuja consequência é avaliada pelo critério ponderado de industrialização
$P(ip_j)$		probabilidade do estado da natureza na subestação j , cuja utilidade da consequência, para cada ação escolhida, é medida segundo o critério de população;

$\pi(\lambda_j)$		Função distribuição de probabilidade <i>a priori</i> sobre a probabilidade equivalente de falha da subestação j
$\pi(\lambda_k)$		Função distribuição de probabilidade <i>a priori</i> sobre a probabilidade equivalente de falha da subestação k
$P(p_{kj})$		probabilidade do estado da natureza, cuja consequência é avaliada pelo critério ponderado de população
$\pi(\theta)$		Função distribuição de probabilidade <i>a priori</i> sobre o parâmetro θ (do estado da natureza)
$P(\theta_j)$		Probabilidade do estado da natureza na subestação j
$P(s_{kj})$		probabilidade do estado da natureza na subestação j, cuja utilidade da consequência, para cada ação escolhida, é medida segundo o critério de serviços de saúde
$P(s_{kj})$		probabilidade do estado da natureza, cuja consequência é avaliada pelo critério ponderado de serviços coletivos de saúde
PIB		Produto interno bruto
P_j		peso relativo ao fator j
PLHMC		Problema de localização hierárquico de máxima cobertura
Θ		conjunto de valores possíveis de θ quando o número de valores desse parâmetro é finito
q		número de reservas (facilidades) de nível 2 a serem localizadas;
θ		parâmetro representativo do estado da natureza sob elicitação
QFD		Desdobramento da função qualidade (Quality Function Deployment)
θ_j		estado da natureza correspondente à falha de transformador na subestação j
$R(t)$		Função confiabilidade
R_1	m	distância crítica para o serviço de nível 1 oferecido pela facilidade de nível 1
R_{11}	m	distância crítica para o serviço de nível 1 oferecido pela reserva de nível 1
R_2	m	distância crítica para o serviço de nível 2 oferecido apenas pela facilidade de nível 2
R_{21}	m	distância crítica para o serviço de nível 1 oferecido pela reserva de nível 2
R_{22}	m	distância crítica para o serviço de nível 2 (oferecido apenas pela reserva de nível 2)
S	m	distância de serviço definida no problema de máxima cobertura
SA		Arrefecimento simulado (Simulated Annealing)
SAD		Sistema de Apoio a Decisão
SIG		Sistema de Informação Geográfica
$ s_{kj} $		vetor critério ponderado de serviços coletivos de saúde
S_{kj}	MVA	capacidade do transformador de ordem k situado na subestação j
SMARTER		Simple Multi-Attribute Rating Technique using Exploiting Rankings

SPLP		Problema de localização de plantas sem restrição de capacidade (Simple Plant Location Problem)
S_x^j	MVA	capacidade do transformador avariado da subestação j
T1	m	distância crítica para o serviço de nível 1 oferecido pela facilidade de nível 2
TBF	h	tempo entre falhas (Time Between Failure)
TTF	h	tempo até a falha (Time to failure)
TTR	h	tempo para reparo (Time To Repair)
v		Função objetivo do modelo de localização de múltiplas reserva
$u(P(p/\theta, d(x)))$		Função utilidade para a consequência p decorrente da decisão d(x), se a natureza se manifesta através do estado θ
$u(x)$		Função utilidade para a consequência x
$u(x_1, x_2, \dots, x_n)$		Função utilidade multiatributo
$u(y, z)$		Função utilidade multiatributo segundo os critérios y e z
UFLP		Problema de localização de planta não capacitada (Uncapacitated Facility Location Problem)
U_{ikj}		Função utilidade, segundo o critério ponderado de grau de industrialização
U_{kj}		Utilidade para a comunidade da subestação k se a reserva for localizada na subestação j
U_{pkj}		Função utilidade, segundo o critério ponderado de população
UPLM		Modelo de localização de plantas não capacitadas (Uncapacitated Plant Location Model)
U_{skj}		Função utilidade, segundo o critério ponderado de serviços coletivos de saúde
UTE		Usina Termoelétrica
U_{tj}		Utilidade total para a subestação j
$u_y(y)$		Função utilidade, segundo o critério y
$u_z(z)$		Função utilidade, segundo o critério z
V_i		quantidade a ser enviada de ou para a fonte ou destino i
x_g e y_g		coordenadas de localização para o centro de gravidade
x_i e y_i		coordenadas da fonte ou destino i
x_j		vetor cobertura para a subestação j
x_j		vetor que designa se área de demanda j é coberta
y_i		vetor que designa se uma facilidade é localizada na localidade i
y_i		vetor que designa se uma reserva (facilidade) de nível 1 é localizada na localidade i
z_i		vetor de localização para a reserva de nível 2
z_i		vetor que designa se uma facilidade de nível 2 é localizada na localidade i

1. INTRODUÇÃO

O problema da localização dos equipamentos reservas do sistema de produção está inserido no contexto do planejamento da manutenção. A engenharia de manutenção dispõe de um arsenal de recursos para subsidiar a solução desse tipo de problema. A logística para disposição dos ativos físicos incorpora aspectos de custos, confiabilidade, técnicas de análise de risco e sistemas de apoio à decisão. Não obstante, na grande maioria das empresas brasileiras ainda se assiste a um cenário desestruturado e carente do emprego regular de ferramentas de suporte ao planejamento da manutenção.

A localização das chamadas “reservas frias” ou “reservas técnicas” constitui um dos aspectos da logística dos recursos gerenciados pela área de manutenção. De uma maneira geral, a localização dessas reservas é muitas vezes baseada em poucos critérios considerados como mais relevantes, deixando de levar em conta alguns atributos, tidos como desprezíveis para a escolha, mas que podem vir a se mostrar essenciais mais tarde. Em outros casos, ainda que os critérios sejam, em princípio, bastante coerentes com os objetivos da organização, estes não são devidamente tratados na modelagem do problema, de modo que a solução escolhida pode atender de forma satisfatória a apenas uma parte desses critérios. Um dos problemas metodológicos comumente verificados é a falta de modelos adequados para incorporar a incerteza sobre a demanda pelos equipamentos reservas, cuja natureza probabilística é negligenciada. Por outro lado, existem situações em que a localização é fundamentada apenas na experiência ou no *feeling* do gerente responsável. Esse procedimento pode causar comprometimento da disponibilidade do sistema e um impacto direto nos custos da manutenção.

Modelos para tratamento do problema da localização das reservas no contexto da manutenção são raramente encontrados na literatura, embora esse problema possa ser considerado de mesma natureza que a localização de instalações de serviço, cujos enfoques exploram desde aspectos econômicos de custo a questões relacionadas à disponibilidade dos recursos de produção.

O presente trabalho apresenta alternativas de modelos para a alocação de equipamentos de reserva técnica que agregam a incerteza sobre comportamento da demanda por estes ativos. Por ser um problema de decisão, a escolha da localização dos ativos é tratada por meio de uma abordagem multicritério que confere um caráter gerencial apropriado à sua natureza.

1.1. Objetivos do trabalho

1.1.1. Objetivo Geral

As crescentes demandas por qualidade e lucratividade no setor produtivo têm exigido das empresas revisões contínuas em seus processos, visando o alcance de metas cada vez mais desafiadoras. Diante desse cenário, cabe à manutenção um papel de relevância, não só como coadjuvante, no suporte às estratégias empresariais, mas como parte integrante delas. Essa concepção estratégica geralmente não é percebida pelos decisores que ainda consideram a manutenção como uma atividade secundária e onerosa.

Este trabalho visa oferecer uma contribuição para o tratamento do problema da localização de reservas técnicas, mediante uma abordagem multicritério, conciliando aspectos relacionados aos impactos da perda de produção do serviço para a sociedade e a escassez dos recursos de produção disponíveis.

1.1.2. Objetivos Específicos

O presente trabalho apresenta uma visão geral das pesquisas relacionadas ao tema do planejamento da manutenção com o enfoque nos modelos de localização de um ativo físico no contexto de uma instalação de serviço. A modelagem da demanda também é considerada, mediante uma abordagem de engenharia de manutenção que incorpora a confiabilidade dos ativos como uma característica intrínseca à natureza desse fenômeno. Os custos para deslocar estes ativos podem atingir vultosas cifras, a depender dos recursos necessários para essa atividade e do processo em foco. A adoção de soluções que não considerem informações acerca da condição operativa dos ativos pode se tornar ineficaz para assegurar a disponibilidade do sistema de produção e, ainda, produzir impactos diretos sobre os custos de manutenção. Além da escolha dos locais recomendados para sedes das reservas técnicas, como objetivos específicos deste trabalho podem ser destacados os seguintes aspectos:

- Apresentar o estado da arte em localização, com ênfase nas instalações de serviço;
- Tratar o problema da localização de reservas técnicas no contexto da manutenção, incorporando a incerteza sobre a demanda por esses ativos;
- Apresentar uma série de modelos de localização de reserva técnica e um SAD específico desenvolvido com o propósito de apoiar um desses modelos;
- Aplicar os modelos propostos a um problema específico no contexto do setor elétrico.

1.2. Estruturação da Tese

A estruturação da presente tese adota a seqüência de capítulos que são discriminados, conforme segue:

Este capítulo 1 corresponde à introdução, no qual são apresentados: o tema do estudo, os seus objetivos geral e específicos, bem como a organização do trabalho.

O capítulo 2 discorre acerca da base conceitual, sobre a qual está fundamentado todo o estudo e direciona a linha metodológica a ser abordada nesta pesquisa. Neste capítulo é feita uma breve revisão de conceitos fundamentais no campo da confiabilidade, análise de falhas, manutenibilidade e modelos representativos do processo de localização, destacando o modelo de localização hierárquico, a teoria da utilidade multiatributo (MAUT) e finalizando com a educação do conhecimento *a priori* no contexto da abordagem bayesiana.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema da localização de instalações ou facilidades com ênfase no contexto das instalações de serviço, na qual são destacados os modelos que apresentam diferentes abordagens para a emergente gama de novas aplicações da problemática em apreço. Na discussão desses modelos, são identificados os pontos em comum e as diferentes visões dos autores sobre aspectos relevantes da estrutura do problema de localização.

O capítulo 4 aborda um modelo multicritério de apoio à decisão proposto para o tratamento da problemática de escolha da localização de uma unidade de reserva técnica no contexto da manutenção em um sistema de produção de serviço, mediante a formulação de uma função utilidade multiatributo e avança na proposição de um segundo modelo de reserva única, inserindo um parâmetro adicional para contemplar a propensão a falha de cada subestação com reflexos na ponderação das demandas dessas instalações

O capítulo 5 apresenta uma extensão aos modelos anteriores, que permite contemplar a localização de múltiplas unidades reservas com diferentes níveis de hierarquia, e também incorpora o parâmetro de confiabilidade dos equipamentos em operação nas instalações para a ponderação da demanda pelas aludidas unidades reservas.

O capítulo 6 trata de um estudo de caso envolvendo um equipamento, no contexto do setor elétrico, no qual é feita a aplicação dos modelos propostos para a localização das unidades de reserva técnica entre as diversas instalações de uma concessionária de serviço de distribuição de energia. Após a apresentação dos resultados, é feita uma análise de sensibilidade sobre os parâmetros para avaliar a robustez de cada modelo.

No capítulo 7, são apresentadas as conclusões do estudo, mediante a análise dos resultados obtidos quando da aplicação dos modelos propostos, bem como são discutidas as principais hipóteses assumidas, as restrições e contribuições inerentes a cada um dos modelos propostos, mediante uma síntese comparativa, e apontadas sugestões para futuros trabalhos que propiciem a continuidade dessa linha de pesquisa.

2. BASE CONCEITUAL

Neste capítulo são discorridos, de forma sucinta, os conceitos que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho. Uma vez que existe disponível uma vasta literatura, na qual podem ser obtidos mais detalhes e um maior aprofundamento sobre os temas abordados a seguir, procurou-se enfatizar os principais conceitos diretamente relacionados ao foco da pesquisa, de modo a permitir um melhor entendimento do leitor quanto a alguns aspectos teóricos que aparecem contextualizados quando da aplicação destes fundamentos ao problema de interesse sob abordagem.

2.1. Confiabilidade

A confiabilidade é um atributo inerente a um item ou a um sistema, bem como é uma área de interesse reconhecidamente crescente, suportada por toda uma teoria subjacente, na qual vem sendo desenvolvidos estudos e pesquisas em estágios cada vez mais avançados, cujos modelos matemáticos têm sido profícuos em sofisticação e inovação no tratamento de problemas que apresentam características bem peculiares, muito em função das demandas por novas tecnologias.

A qualidade é uma propriedade que pode alterar-se ao longo da vida de um produto. Em consequência, a aceitabilidade de um produto depende em parte da sua capacidade de funcionar satisfatoriamente (ou do seu desempenho) ao longo do tempo. A esta vertente da performance dá-se o nome de confiabilidade (Assis, 2004).

Da teoria da confiabilidade são extraídos alguns conceitos relevantes para subsidiar os estudos apresentados no corpo deste trabalho.

2.1.1. Conceito

A Norma Brasileira NBR 5462 (1994), que é concebida de uma adaptação da norma internacional IEC-60050 (1990) define a confiabilidade como sendo: “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.”

Segundo Kapur & Lamberson (1977), a confiabilidade de um sistema é a probabilidade de que, quando operando sob condições ambientais estabelecidas, o sistema irá realizar a função requerida adequadamente por um intervalo de tempo especificado.

Ainda segundo esses autores, algumas questões são, obviamente, decorrentes dessa definição, como:

1. A aceitação de uma noção probabilística para a confiabilidade que admite a possibilidade de falhas;
2. O conceito de performance (ou desempenho) adequada, segundo determinados parâmetros do sistema que deteriora lentamente com o tempo e;
3. O necessário julgamento para determinar as condições ambientais apropriadas.

2.1.2. A Função Confiabilidade

A questão referente ao comportamento probabilístico da função confiabilidade está largamente difundida na literatura específica em língua inglesa, na qual aparece o termo *Reliability* para representar essa função.

Tomando-se T como o tempo de vida do item, tem-se que a confiabilidade até o tempo “ t ” é a probabilidade de que T seja maior que “ t ”, conforme se apresenta na expressão 2.1:

$$R(t) = \text{Prob}\{T > t\} \quad (2.1)$$

A expressão analítica para a função confiabilidade $R(t)$ é dada pela equação 2.2:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.2)$$

Onde:

$f(t)$ = função densidade de probabilidade de falhas

$R(t)$ = Função confiabilidade

A função distribuição acumulada de falhas $F(t)$ representa a probabilidade de que haja falha no intervalo de $-\infty$ a t , conforme é exibido na equação 2.3:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (2.3)$$

A função risco (*hazard function*) ou taxa de risco (*hazard rate*) $h(t)$ é a probabilidade condicional de falha no intervalo de x a $x+dx$, dado que não houve falha até t , de acordo com a equação 2.4:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.4)$$

Um importante parâmetro associado à confiabilidade é o tempo médio para falha (MTTF), sigla do termo em inglês *mean time to failure*, que representa a vida média de um sistema, que corresponde à equação (2.5) a seguir:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.5)$$

Com relação às falhas, o conceito adotado neste trabalho é aquele definido como a impossibilidade do equipamento desempenhar uma ou mais de suas funções requeridas, quando em operação e submetido a condições expressas em sua especificação, tendo ocorrido a saída de operação do equipamento de forma automática (intempestiva) ou manual, em caráter de emergência devido a algum problema que compromete sua funcionalidade, levando em conta aspectos de qualidade, custo e segurança.

Destarte, no escopo do estudo, considera-se que o equipamento é capaz de desempenhar a sua função requerida, sendo permitido o caso onde podem ocorrer vários graus de degradação do sistema, em decorrência de falhas parciais em seus componentes. Ou seja, o equipamento continua funcional até que algum componente, essencial ao cumprimento de sua função requerida, venha a falhar.

Segundo O'Connor (1988), é necessário distinguir itens reparáveis e não reparáveis, para um adequado tratamento probabilístico da confiabilidade.

Para um item não-reparável, confiabilidade é a probabilidade de sobrevivência durante sua vida esperada, ou durante um período de sua vida útil, quando somente uma única falha pode ocorrer. Durante o tempo de vida do item, a probabilidade instantânea é chamada de taxa de risco.

Quando um componente de um sistema não reparável falha, o sistema geralmente falha, portanto, sua confiabilidade é função do tempo da primeira ocorrência. Na figura 2.1, esta condição está representada pelo gráfico da esquerda.

Para itens reparáveis, há a possibilidade de ocorrência de mais de uma falha num determinado intervalo de tempo. Esse fato é caracterizado por uma medida definida como taxa de falhas, que expressa a probabilidade instantânea de falhas por unidade de tempo. O segundo gráfico da figura 2.1 representa o comportamento da função de estado para um item reparável.

É oportuno salientar que a conotação de alguns itens como reparáveis ou não reparáveis se deve muitas vezes a aspectos de natureza econômica, uma vez que o custo de reparo de alguns itens pode ser considerado inviável, em que pese existirem condições técnicas para a adoção desse curso de ação.

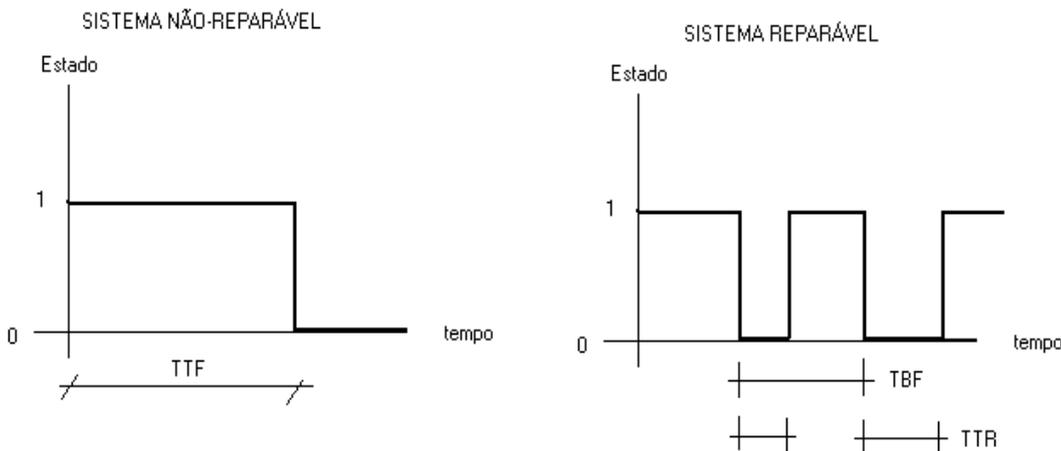


Figura 2.1 - Sistema reparável x sistema não reparável (Adaptado de Almeida, 1997)

A figura 2.1 baseada em Almeida (1997) ilustra a terminologia consagrada:

- TTF (*Time To Failure*) corresponde ao tempo compreendido até a ocorrência da primeira falha para itens não-reparáveis. A esperança dos diversos TTF é denominada MTTF (*Mean Time To Failure*);

- TBF (*Time Between Failure*) corresponde ao tempo compreendido entre duas falhas consecutivas e seu emprego se dá para itens reparáveis. A esperança dos diversos TBF é denominada MTBF (*Mean Time Between Failure*);

- TTR (*Time To Repair*) significa o tempo utilizado para restabelecimento das condições operacionais do item, a esperança dos diversos TTR é denominada MTTR (*Mean Time To Repair*)

- A função de estado pode assumir apenas dois valores:

- 1 = item operacional (apto para funcionar)

- 0 = item não operacional (inapto para funcionar)

Bilinton (1983) procura também, alertar para uma diferença conceitual entre o tempo médio para falha (MTTF) e o tempo médio entre falhas (MTBF). Ele salienta que o MTBF, que indica o ciclo entre falhas, excede o MTTF por uma margem que é atribuída ao tempo para reparo. Porém, como o tempo para reparo da maioria dos sistemas é, geralmente, muito pequeno em relação ao tempo de operação, os valores numéricos desses parâmetros são bastante próximos.

Os equipamentos abordados neste estudo, embora sejam de natureza reparável, são substituídos quando da ocorrência da falha em um de seus componentes essenciais, uma vez

que o tempo de reparo é muito maior que o tempo de substituição e tendo em vista que o ativo em questão está inserido no contexto de um sistema de produção de serviço.

2.1.3. A Confiabilidade na Manutenção

Uma das áreas que se desenvolveram de forma mais intensa com o advento dos estudos no campo da teoria da confiabilidade, a julgar pelos modelos matemáticos que vem sendo apresentados com abordagens cada vez mais sofisticadas para seus problemas, tem sido a área de manutenção, em face do ambiente propício para o tratamento da incerteza que caracteriza esse segmento de atividade humana.

Algumas das principais questões que têm sido tradicionalmente colocadas para os profissionais e envolvidos na área de manutenção dizem respeito a problemas de ordem gerencial, notadamente nas áreas de planejamento e logística dos seus recursos, tais como: a definição de políticas de manutenção, o dimensionamento de equipes, a alocação de recursos e a provisão de peças de reposição, além da própria estruturação adequada para esse setor.

Os modelos disponíveis da teoria da confiabilidade exercem um papel fundamental no suporte à maioria desses problemas, permitindo um tratamento apropriado para os elementos da modelagem do sistema que seguem um comportamento probabilístico predominante, como é o caso encontrado para aqueles fenômenos de interesse na área de manutenção (número de falhas, tempos entre falhas e tempos até a falha).

Não obstante, tem sido observado com freqüência, em uma grande parcela das empresas brasileiras, que o tratamento dedicado a essa área de estudo segue uma abordagem determinística, na qual o parâmetro MTBF (*Mean Time Between Failure*) e a freqüência relativa de falhas têm sido utilizados como indicadores de confiabilidade.

O termo confiabilidade refere-se basicamente a situações na engenharia, entretanto, condições similares ocorrem em outras áreas em que se usam as mesmas técnicas de análise de dados, como na área clínica, geralmente relacionada a dados biomédicos, também chamados de análise de sobrevivência; na área de ciências sociais, em que várias situações de interesse têm como resposta o tempo entre eventos; em estudos criminalistas, onde estudam o tempo entre a liberação de presos e a ocorrência de crimes; os estudiosos do trabalho, que se concentram em mudanças de empregos, desempregos, promoções e aposentadorias; os demógrafos, com nascimentos, mortes, casamentos, divórcios e migrações, entre outros (Barros & Menezes, 2008).

2.2. Manutenibilidade

Uma abordagem abrangente para a manutenibilidade é encontrada em Goldman & Slaterry (1997), onde se trata da probabilidade de que um item que tenha falhado possa ter sua condição operacional restabelecida, dentro de um período de tempo específico, quando a ação de manutenção é executada de acordo com um planejamento estabelecido. É uma característica definida previamente nas fases de projeto e instalação do item. O projetista tem que ponderar e avaliar, previamente, certas características do produto, tais como: tamanho, facilidade de montagem, pontos de teste etc.

Segundo Almeida *et al.* (2001), a manutenibilidade surgiu dentro de um contexto de projeto de equipamentos, tendo como preocupação buscar as concepções de projeto que permitissem uma maior facilidade na realização da manutenção ou reparo de um item.

2.2.1. Conceito

A manutenibilidade é definida como a probabilidade de que um item, tendo falhado, seja restaurado para o estado de operação efetiva dentro de certo período de tempo quando a ação de manutenção é exercida, de acordo com procedimentos pré-estabelecidos.

Não obstante a sua concepção de natureza probabilística, a manutenibilidade é uma característica do projeto que visa minimizar os requisitos de manutenção corretiva e preventiva do produto, quando da sua fase de exploração pelo cliente, com o menor custo possível.

A manutenibilidade, como característica de projeto, está diretamente relacionada à área de sistema de suporte, uma vez que os requisitos da manutenção são afetados pelos resultados diretos da manutenibilidade. Portanto, quando são especificados unicamente fatores de manutenibilidade, também devem ser considerados os requisitos quantitativos e qualitativos do sistema de suporte com o objetivo de determinar os efeitos desses requisitos e a característica de manutenibilidade (Blanchard & Fabrycky, 1990).

No projeto de manutenibilidade de um item, busca-se obter o melhor balanço entre o tempo decorrido, o tempo disponível para o serviço e os requisitos de suporte logístico. Dentre os requisitos de suporte, a provisão de peças de reposição ou sobressalentes e de equipamentos e sistemas de reservas são recursos a serem contemplados para assegurar um tempo de restabelecimento adequado, por ocasião de uma interrupção do serviço.

No contexto deste trabalho, a logística de alocação das reservas técnicas é tratada como um dos fatores que tem impacto direto sobre a manutenibilidade do sistema de produção considerado.

2.2.2. A Função Manutenibilidade

Formalmente, a manutenibilidade aparece na literatura específica, em língua inglesa, sob a designação de *Maintenability* $M(t)$, a qual é representada pela expressão 2.6 que segue:

$$M(t) = \text{Prob}\{ T \leq t \} \quad (2.6)$$

Que significa a probabilidade de um item ser restaurado para a sua condição original de funcionamento no intervalo de tempo "t"; i.e, a probabilidade de que o tempo para o reparo, representado por uma variável aleatória T , não ultrapasse o limite de tempo "t".

Tratando-se de um conceito probabilístico, estudos estatísticos são aplicáveis à manutenibilidade. Assim, sua formulação matemática pode ser obtida a partir do tratamento dos dados temporais disponíveis:

$$M(t) = \int_0^t g(t) dt = 1 - \exp\left[-\int_0^t \mu(t) dt\right] \quad (2.7)$$

Onde: $g(t)$ é a função densidade de probabilidade de reparo

$\mu(t)$ é a taxa de reparo instantânea.

O valor esperado do tempo para reparo, que vem a ser o MTTR, é obtido da expressão que segue:

$$E(t) = \int_0^t t.g(t) dt = \text{MTTR} \quad (2.8)$$

Conforme Almeida & Souza (2001), a manutenibilidade está associada com os tempos envolvidos nas ações necessárias para o restabelecimento dos equipamentos a condição operacional.

Goldman & Slaterry (1977), por sua vez, classificam o tempo necessário para o restabelecimento de um equipamento em duas categorias:

- Tempo de manutenção ativa, que corresponde às ações de localização da falha, estudo, análise e avaliação, reparo e testes;
- Tempo administrativo associado aos processos administrativos, tais como: preparação das equipes, seleção de materiais, documentação técnica, deslocamentos etc.

A manutenibilidade de um sistema pode ser avaliada por meio de modelos de referência que são baseados em dados históricos ou pelo uso do conhecimento *a priori* de especialistas. Os modelos existentes adotam a Lognormal, Gamma, Exponencial e Weibull como principais famílias de distribuição de probabilidade a serem aplicadas (Ferreira *et al.*, 2006).

Bilinton (1983) considera que o tempo médio para reparo constitui o parâmetro que caracteriza a manutenibilidade. Nesse contexto, o MTTR (*mean time to repair*) é bastante utilizado na gestão empresarial, como um indicador de manutenibilidade, segundo uma abordagem determinística, para representar o tempo médio de manutenção corretiva.

2.2.3. A Manutenibilidade e a Manutenção

A manutenibilidade representa a medida da condição reparável de um item que é percebida pelo parâmetro tempo médio para reparo (MTTR), estabelecido através da ação de manutenção corretiva.

Por ser a manutenibilidade essencialmente uma característica de concepção e de fabricação, tudo o que seja susceptível de influenciar a aptidão de um item para receber manutenção é considerado. A manutenibilidade traduz a capacidade de um sistema ser mantido ou reconduzido ao estado operacional, enquanto que a manutenção constitui o conjunto de ações empreendidas com o objetivo de preservar ou restaurar o sistema nas condições operacionais especificadas. Segundo Assis (2004), a manutenibilidade é um requisito do *design* do sistema e a manutenção é o resultado do *design*.

2.3. Disponibilidade

Outro atributo que se relaciona à qualidade no quesito performance de um sistema, notadamente na área de serviço, é a disponibilidade. A disponibilidade é uma característica dos sistemas reparáveis, conceitualmente diferente da confiabilidade, pois na avaliação da disponibilidade não se leva em consideração se o item falhou e foi reparado em seguida, o que interessa é a proporção de tempo em que o item esteve apto a executar sua função requerida durante o período de observação.

2.3.1. Conceito

Na Norma Brasileira (ABNT – NBR-5462, 1994), o termo disponibilidade aparece como: “A capacidade de um item estar em condições de executar certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando em conta os aspectos

combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.”

Embora ocorram falhas, as recolocações em serviço permitem uma continuidade de operação de um sistema de produção. O uso de equipamentos em redundâncias ativas (reservas quentes) ou passivas (reservas frias ou *stand-by*) concorre para assegurar um nível de disponibilidade adequado do sistema, uma vez que as falhas em equipamentos não conduzem necessariamente à falha do sistema ou, quando está ocorrendo, o tempo de recomposição é reduzido.

Almeida *et al.* (2001) define a disponibilidade como uma característica mais global que representa um aspecto mais agregado e geral do desempenho de um item que incorpora os requisitos de confiabilidade e manutenibilidade.

2.3.2. A Função Disponibilidade

Na literatura especializada, em língua inglesa, o termo *Availability*, $A(t)$, é empregado para representar a disponibilidade. Para o modelo de falhas exponencial, a disponibilidade pode ser obtida da expressão 2.9:

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.9)$$

A confiabilidade e a manutenibilidade influenciam diretamente a disponibilidade, pois o primeiro atributo responde pela probabilidade do item se manter na condição de operação e o segundo está associado ao tempo empregado no restabelecimento das condições operacionais, quando o item se encontra em condição de falha. Portanto, uma alta confiabilidade implica em menos necessidade de manutenção e uma alta manutenibilidade representa uma rápida reposição à condição operacional. Conseqüentemente, a disponibilidade é uma composição desses atributos.

No contexto desse trabalho, a disponibilidade de um serviço é o atributo que interessa de fato ao cliente como usuário do produto em apreço, cabendo ao concessionário exercer gestões adequadas na condução de suas políticas de confiabilidade e manutenibilidade para a consecução desse objetivo.

Goldman & Slattery (1977) mostram que, para uma dada disponibilidade especificada, existe um compromisso entre a manutenibilidade ($1/MTTR$) e a confiabilidade ($MTBF$), conforme se pode ver no gráfico da figura 2.2 a seguir:

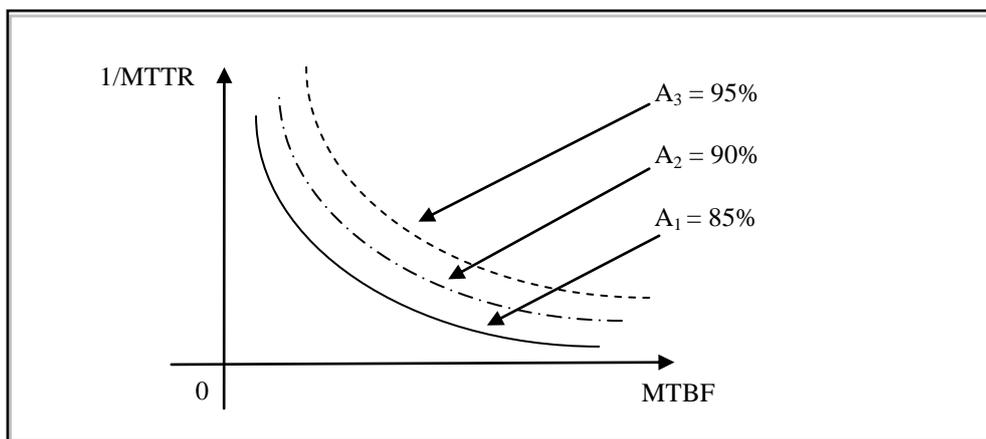


Figura 2.2 - Compromisso entre manutenibilidade e confiabilidade

No gráfico da figura 2.2, observa-se que se pode investir mais no atributo confiabilidade, optando-se por equipamentos com taxas de falha menores ou escolher gastar mais investindo em manutenibilidade, obtendo-se a mesma disponibilidade especificada.

A disponibilidade de um item pode ser abordada segundo uma concepção de função de estado, na qual é vista como um atributo de um sistema associado ao seu estado operacional e que representa a probabilidade do mesmo estar disponível num determinado instante, considerando os dois estados possíveis: Operacional ou Pane.

O estado operacional corresponde aquele em que o item é considerado apto para exercer a função requerida.

O estado de pane consiste naquele que decorre de uma falha e, portanto, resulta na inaptidão do item para exercer a função requerida.

A transição entre esses estados pode ser tratada mediante o uso das probabilidades de transição correspondentes, tal como representado no modelo de Markov representado no diagrama de estado da figura 2.3, seguir:

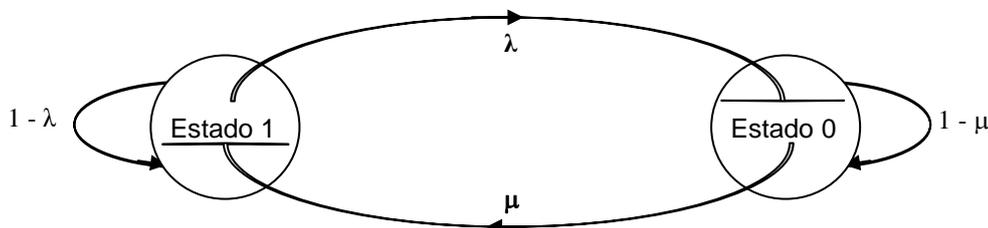


Figura 2.3 - Probabilidades de transição de estados

No processo de análise espaço-estado de Markov representado na figura 2.3, podem-se definir as probabilidades associadas com os estados e com as transições entre eles, de modo

discreto ou contínuo e, dessa forma, a probabilidade do componente ou sistema residir em um dos estados, operacional (estado 1) ou em pane (estado 0), no futuro.

Assim, para as análises de disponibilidade aplicadas no escopo deste trabalho, as probabilidades de falha e de retornar ao estado operacional que são, respectivamente, as taxas de transição de falha (λ) e de reparo (μ) são assumidas como as probabilidades de interesse.

O modelo de Markov pode ser aplicado sempre que forem atendidas as seguintes condições:

1. Esteja sendo observado um processo homogêneo no qual as probabilidades de transição permaneçam constantes;
2. Os estados futuros sejam independentes dos estados passados, exceto o estado imediatamente precedente.

Tais condições se verificam num cenário em que o sistema se encontra no período de vida útil e submetido a manutenções perfeitas que conduzem o equipamento ao estado tão bom quanto novo após o reparo.

2.3.3. A Disponibilidade e a Manutenção

Segundo Mirshawka *et al.* (1993) a manutenção pode ser definida como o conjunto de atividades e recursos aplicados aos sistemas ou equipamentos, visando garantir a consecução de sua função dentro de parâmetros de disponibilidade, de qualidade de prazos, de custos e de vida útil adequados.

Para Almeida & Souza (2001), manter um sistema em níveis elevados de disponibilidade requer uma estrutura de manutenção adequada que pode ser limitada pelo alto custo envolvido. Os setores de manutenção das empresas normalmente procuram comparar os prejuízos decorrentes de uma falha com o custo da política de manutenção a ser adotada. Em relação à área de produção de bens, essa comparação parece adequada. Entretanto, na área de produção de serviços, como o setor elétrico que é abordado neste estudo, os prejuízos para a própria empresa decorrentes de uma falha são pouco significativos quando comparados aos prejuízos acarretados a terceiros. Além disso, devem ser consideradas as multas contratuais previstas pelo órgão regulador do setor que, em casos extremos, poderão redundar na perda da concessão do serviço.

Destarte, o problema que se apresenta para o gerente ou decisor passa a ser: Como proceder a um processo de escolha na alocação de recursos da estrutura de manutenção que permita um compromisso adequado entre custo e disponibilidade?

A resposta a esta questão envolve uma análise apurada sobre as variáveis do problema no qual aspectos de incerteza e risco devem ser observados, tais como:

- O tempo de interrupção não se comporta de forma determinística, mas, sobretudo, como uma variável aleatória;
- Decisores apresentam comportamentos distintos em relação ao risco.

O problema da localização de equipamentos reservas consiste em um problema de decisão, para o qual a escolha do melhor conjunto de soluções é realizada através de um modelo que incorpora a estrutura de preferências do decisor, representada pela função utilidade multiatributo, e o uso do conhecimento *a priori* de especialistas na modelagem probabilística da confiabilidade do sistema.

O estudo visa estabelecer um adequado nível de manutenibilidade global para o sistema elétrico composto por diversas instalações, mediante a alocação de um número limitado de equipamentos reservas em um subconjunto dessas instalações, com vistas à redução dos tempos de interrupção do serviço, e atendendo a critérios previamente estabelecidos para a obtenção da disponibilidade ótima do sistema, sob o enfoque de utilidade.

2.4. Localização

Conforme Scaparra & Scutellà (2001), no terreno das possibilidades dos modelos de localização, quase sempre podem ser identificados três componentes essenciais: facilidades, i.e. os ativos físicos ou instalações a serem localizadas para prover algum tipo de produto; localidades, i.e. o conjunto de pontos candidatos para situar as facilidades; e clientes, i.e. os usuários das facilidades que demandam certos produtos.

Para Ballou (2006), decisões sobre localização envolvem a determinação de um número, local e capacidade das instalações a serem usadas.

Na visão de Almeida (1999), um problema de localização busca atender a uma das seguintes situações, diferenciadas em função do tipo de intervenção sobre a rede de unidades existente: a) localizar m unidades arbitrariamente, partindo da hipótese de que nenhuma unidade existe no local; b) localizar k unidades para ampliar uma rede de unidades existente; e c) reorganizar a distribuição de uma rede de m unidades existentes, visando a melhorar seu desempenho.

Embora estas assertivas possam dar ao problema uma delimitação ao campo dos modelos de otimização da pesquisa operacional, é importante destacar que nem sempre é possível identificar uma solução ótima ou mesmo considerar que esta exista.

Diversos locais possíveis surgem como opções, cada um com suas potencialidades e fragilidades, e a decisão quanto à localização envolve a análise de *trade-offs*; só é possível ganhar um tipo de benefício ao se abrir mão de outro. Esses *trade-offs*, relativos à escolha de pontos estratégicos, conduzem a uma longa e cuidadosa ponderação das vantagens e desvantagens de cada opção (Gaither & Frazier, 2002).

Segundo Slack *et al.* (1995), há duas categorias de estímulos que influem nas decisões de localização das organizações:

- Alterações na demanda de bens e serviços;
- Alterações na oferta de insumos para a operação.

Portanto, a decisão de localização para qualquer operação é determinada pela influência relativa dos fatores dos lados da oferta e da demanda.

O interesse por problemas de localização eclodiu a partir da década de 60, com o surgimento dos primeiros modelos matemáticos nessa área; desde então, o interesse vigente concentrou-se sobre modelos normativos (enfoque microeconômico) que se caracterizam pela otimização de uma norma (medida de eficiência), sujeita a restrições operacionais relevantes. Os modelos normativos visam problemas que podem ser formulados e resolvidos com base em técnicas de otimização de modelos matemáticos (Galvão *et al.*, 1999).

Atualmente, a literatura nesta área é bem mais abrangente e incorpora outros elementos relevantes para a construção dos modelos, permitindo várias formas de tratar o problema em suas várias dimensões.

Segundo Lopes & Almeida (2008), da literatura mais especializada sobre localização de instalações, destacam-se as seguintes abordagens:

- Programação matemática – muito empregada, sobretudo em problemas de localização de facilidades únicas ou múltiplas de capacidade restrita e irrestrita, maximização de cobertura e localização de *hubs* numa rede; esta abordagem está presente numa grande quantidade de artigos nacionais e internacionais e é utilizada em problemas tradicionais ou que apresentam uma característica mais peculiar.
- Apoio Multicritério a Decisão (AMD) – devido à natureza estratégica, o problema de localização tem sido alvo de pesquisas na comunidade de estudos do AMD, com o desenvolvimento de modelos que tratem dos *trade-offs* presentes nesta tomada de decisão através da estruturação e agregação de preferências do decisor e do tratamento dos fatores quantitativos e subjetivos envolvidos.

- Teoria das Filas – é empregada na resolução de problemas de localização, mediante a análise dos indicadores clássicos em sistemas de filas: disponibilidade de atendimento (relacionada com a taxa de ocupação do sistema de atendimento) e o tempo de espera na fila e no atendimento. É encontrada principalmente em localização de serviços públicos de saúde e de atendimento em geral.
- Teoria dos jogos – tem sido utilizada em grande número de trabalhos, em diversos ambientes e contextos. Rhim *et al.* (2003) investigam como empresas devem selecionar o número, os locais e a capacidade de suas instalações produtivas. Em seu trabalho, os autores analisam o equilíbrio de Nash do jogo de entrada e provêm soluções suficientes para o estabelecimento do equilíbrio neste jogo. Berman & Gavius (2007) estudam um jogo entre dois jogadores: uma entidade terrorista e o Estado que demanda instalações de suporte em caso de ataque terrorista. O artigo busca unir as relações de teoria dos jogos a formulações de programação matemática.

De maneira geral, os problemas de localização destinam-se a suprir as necessidades da população de uma dada área geográfica em relação a um determinado produto. O objetivo é determinar a localização e a quantidade ideal de unidades que ofereçam o produto, de maneira que o conjunto de usuários de uma localização conhecida seja atendido da melhor maneira possível (Almeida, 1999; Lobo, 2003). Essas unidades podem ser diferenciadas em emergenciais e de rotina, segundo a natureza do serviço que oferecem, e devem receber tratamentos distintos (Lobo, 2003).

Considerando o caráter estratégico do problema da localização de facilidades e a quantidade de parâmetros e variáveis envolvidos nos modelos que tratam deste problema, bem como a natureza subjetiva que sempre se faz presente em todo processo decisório, é indispensável o uso de uma ferramenta estruturada de suporte que possibilite um apoio na condução do processo de busca de soluções viáveis.

2.4.1. Sistemas de Apoio a Decisão

Os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD's) são sistemas capazes de oferecer flexibilidade e respostas rápidas em um ambiente computacional adaptável às necessidades e estilos de diferentes usuários.

Segundo Gomes *et al.* (2009), os SAD estão inseridos na categoria dos Sistemas de Informação, aplicados na resolução de problemas mais complexos e menos estruturados e buscam combinar modelos analíticos.

Ainda segundo esses autores, essa terminologia surgiu em 1970, e desde então vem ganhando popularidade. Os SAD's constituem um campo multidisciplinar que envolve: teoria da decisão, metodologias de concepção, arquiteturas lógicas, interação homem-máquina e inteligência artificial.

2.4.1.1. Estrutura do Sistema de Apoio à Decisão

A figura 2.4 a seguir, concebida por Dias *et al.* (2003), apresenta uma estrutura típica de um Sistema de Apoio à Decisão direcionada ao problema da localização de instalações:

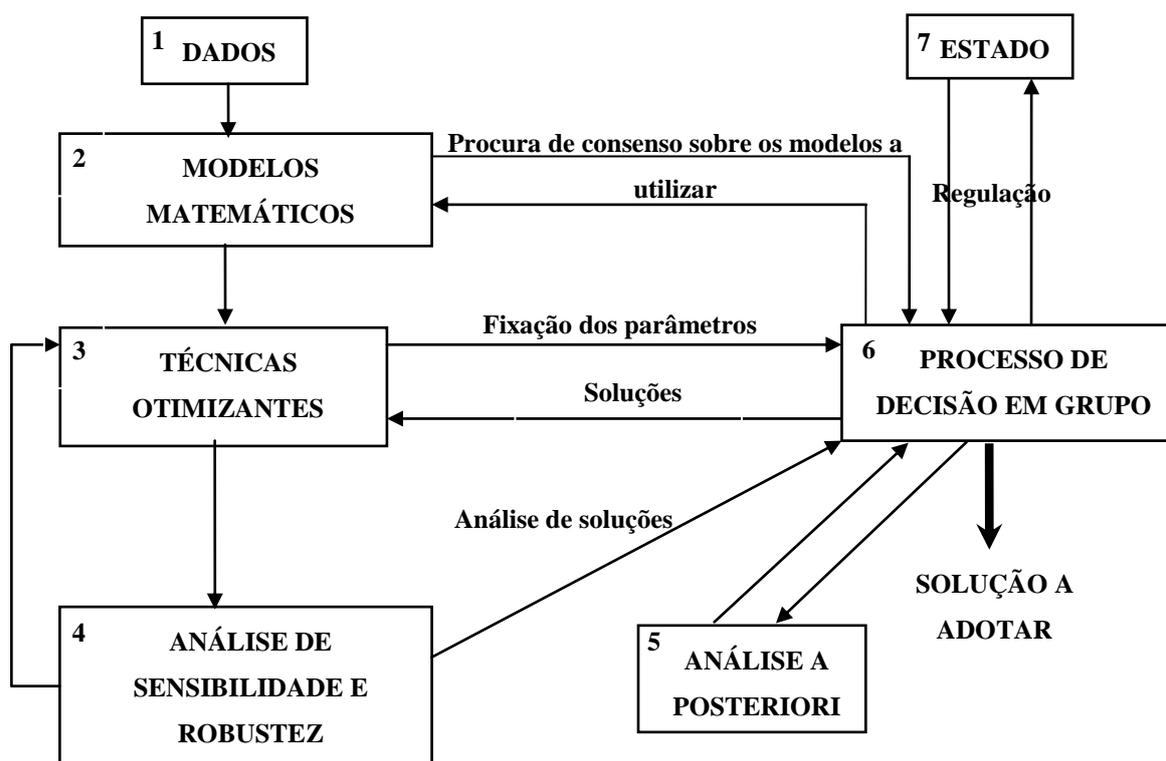


Figura 2.4 - Estrutura de um SAD (Adaptado de Dias *et al.*, 2003)

1- Banco de Dados

A criação de um banco de dados para uma localização adequada é sempre de suma importância e em razão deste fato Autarquias, Estado e empresas concessionárias devem ter em conta que boas previsões de demanda, boas estimativas de disponibilidade financeira e a criação de condições para serem consideradas as várias opções técnicas, eventualmente adequadas, condicionam fortemente o êxito do apoio à decisão que o sistema poderá vir a prestar. Efetivamente, após a utilização do módulo “análise de sensibilidade e de robustez”

(módulo 4), podem ser feitos alguns ajustes; porém, deve-se ter o cuidado quanto à geração de erros grosseiros, pois os mesmos serão difíceis de corrigir.

2- Modelos Matemáticos

Constitui o meio ou método por meio do qual se busca a solução do problema da localização de instalações. São os modelos matemáticos que auxiliam nas tomadas de decisão por parte das empresas. Pode-se destacar que os modelos matemáticos principais são modelos combinatórios multicritério dedicados à localização-alocação dos ativos. Há abordagens em que os modelos matemáticos fazem uma agregação compensatória de atributos ou priorizam um dos atributos a ser otimizado, sob a restrição dos demais, resultando numa função objetivo monocritério. Entretanto, uma análise mais detalhada sobre a natureza da problemática de localização, na qual são considerados todos os fatores envolvidos, conduz ao uso de modelos matemáticos que se baseiam em múltiplos atributos.

As alternativas a considerar no modelo multiatributo resultam da utilização do modelo combinatório e do processo de decisão em grupo. Deve-se salientar que, em muitos casos não é possível obter um consenso sobre um único modelo que seja o mais apropriado para todos os participantes no processo de decisão em grupo; nesses casos, deve-se promover uma tentativa nesse sentido e, se tal não for possível, pelo menos, devem ser identificadas as diferenças irreconciliáveis e clarificar a sua tradução nos modelos adotados.

3- Técnicas Otimizantes

Após a implementação de modelos matemáticos, é interessante se dispor de ferramentas que permitam a obtenção de soluções satisfatórias. Trata-se, em muitos casos, de adotar procedimentos de busca dessas soluções, mediante o uso de simulação com rotinas de otimização baseadas em heurísticas, visto que a complexidade combinatória de vários problemas desaconselha a utilização unicamente de métodos baseados em algoritmos exatos. Dessa forma, uma técnica em auxílio à outra possibilita um manuseio com vistas à identificação da melhor alternativa de localização das instalações.

4- Análise de Sensibilidade e de Robustez

O uso de modelos de pesquisa operacional quase sempre é dificultado devido à falta de conhecimento completo de sua utilização, da inconsistência de dados e/ou fixação de parâmetros técnicos insuficientes ou gerados através de erros grosseiros. Deve-se procurar mitigar esta dificuldade procedendo-se a uma análise de sensibilidade das soluções à variação de um ou mais parâmetros em torno de valores centrais de base, e/ou através de uma análise de robustez dos resultados, admitindo uma imprecisão quantificada no valor de parâmetros, e

procurando concluir que resultados são aceitáveis para quaisquer dos valores admissíveis desses parâmetros. Desse modo, se evita a definição de uma estratégia errônea que poderá causar custos desnecessários.

5- Análise “*a posteriori*”

Apesar de grande esforço ser realizado na tentativa de acertar a melhor localização para a instalação, utilizando-se de modelos matemáticos com o suporte de técnicas otimizantes, pode ocorrer de alguma variável não ser contemplada ou algum elemento novo vir a surgir, modificando o cenário significativamente. O que se pretende avaliar, tendo em conta dimensões não consideradas nos modelos, são soluções admissíveis selecionadas durante o processo de decisão em grupo. Este módulo poderá vir a incluir, entre outros, um procedimento de análise “*what if*”.

6- Processo de Decisão em Grupo

As decisões devem ser tomadas de forma interativa, como saídas estratégicas, referenciando os processos citados anteriormente; podendo ser obtidas através de um processo de negociação menos estruturado, no qual se adota a designação genérica de “decisão em grupo”, visto que, embora a componente de negociação seja significativa, não se pode esquecer que em muitos aspectos se trata de um processo cooperativo, em que predomina a troca de informações e de experiências em busca de consenso. A participação ativa de todos os elementos do grupo é de fundamental importância para atender aos requisitos definidos para a melhor localização das instalações.

7- Estado (Vantagem Local)

Embora muitas das decisões estratégicas do grupo empresarial acabem por deixar de fora a variável Estado, há que observar as normas e legislações pertinentes à localização de um empreendimento, pois, mudança de um Estado para outro poderá resultar em normas mais restritivas que irão afetar sobremaneira os projetos de instalações da empresa. Sendo o papel do Estado, em certa medida, exterior ao sistema de apoio à decisão. É desejável que, para além do estabelecimento das regras (leis) e da definição das disponibilidades financeiras, se promova uma atividade reguladora em busca da equidade e da qualidade. Sempre será necessário relevar esse elemento durante as tomadas de decisão (Dias *et al.*, 2003).

2.4.2. Modelos de Localização de Instalações

Como já foi mencionada, a adoção de um modelo matemático para a localização de instalações é uma decisão estratégica dentro de uma organização e, nesse contexto, o termo

“análise de localização” refere-se à modelagem, formulação e solução de uma classe de problemas que pode ser mais bem descrita como localização de facilidades num dado espaço.

O estudo de localização de instalações é um dos aspectos mais importantes dentro do planejamento estratégico aplicado a áreas tanto públicas como privadas, sejam elas localizadas no âmbito doméstico ou no âmbito internacional. Antes de uma instalação ser construída, um estudo de localização deve ser feito, objetivando determinar a apropriada localização e capacidade, bem como o capital necessário para sua alocação. A localização deve contemplar, entre outras, a posição geográfica, favorecendo as operações e satisfazendo diversas restrições, principalmente aquelas sobre a demanda.

Em 1909, Alfred Weber propôs uma teoria formal sobre a localização, sob a ótica econômica, quando analisava o problema de posicionar um único armazém entre a fonte de suprimento e seus clientes no que tange à distância. Baseados nesse trabalho, muitos outros modelos surgiram para tratamento de problemas específicos, quase sempre promovendo a inserção de novos algoritmos, procedimentos heurísticos que são implementados por meio de recursos computacionais.

Segundo Fernandes *et al.* (2007) os problemas de localização, em sua essência, são classificados de acordo com o objetivo a otimizar e com as características do espaço das soluções. Podendo ser encontrados problemas de localização no plano euclidiano ou em rede.

2.4.2.1. Modelos no Plano

Nos modelos planares, a demanda ocorre em qualquer lugar no plano (com coordenadas x e y). Nesses modelos, supõe-se a inexistência de restrições de percurso, de modo que se pode usar a distância mais curta, ou de posição para a facilidade. Por esse último motivo, algumas vezes a solução ótima para a localização de uma instalação pode estar situada sobre um lago ou uma rodovia, tornando a implementação dessa alternativa inviável. Os mais utilizados são os modelos das métricas euclidiana, metropolitana e o modelo de Weber.

O problema de localização planar de pontos se faz presente em muitas aplicações quando se opera sobre algum domínio geométrico que é decomposto em regiões e desempenha função essencial em sistemas de informações geográficas.

Se as facilidades puderem ser localizadas em qualquer lugar dentro de um espaço de soluções particular (no plano), o modelo denomina-se de contínuo (Klose & Drex1, 2005). Um exemplo desse modelo está presente no problema de Weber (1929). Owen & Daskin (1998) afirmam que tais modelos impõem dificuldades de ordem computacional, por vezes

resultando em formulações não-lineares difíceis de serem solucionadas para mais de uma localização ou por apresentar soluções inviáveis na prática.

2.4.2.2. Modelos de Rede

Em contraste aos modelos contínuos, os modelos de localização em rede são classificados como modelos discretos, pois se assume que a demanda e as instalações estão localizadas nos nós de uma rede, em um conjunto finito de localizações (Mirchandani & Francis, 1990; Owen & Daskin, 1998).

O modelo de localização de rede é definido no que diz respeito a um grafo conectado e um conjunto de pontos de demanda ponderada no grafo, em geral, p novas instalações devem ser estabelecidas para servir a estes pontos de demanda.

Normalmente, os potenciais locais de instalação de serviços não existem em qualquer ponto do espaço, o que faz com que os modelos discretos sejam os mais utilizados (Fernandes *et al.*, 2007).

A teoria de localização ganhou redobrado interesse em 1964, com a publicação de Hakimi, que objetivava determinar a localização de postos de serviços em redes e postos policiais em rodovias. Hakimi (1964) estabeleceu dois teoremas:

1º teorema - A determinação de que existe um ponto em uma rede que minimiza a soma ponderada das distâncias mais curtas de todos os vértices a este ponto, o qual vem a ser um dos vértices da rede; e

2º teorema - Determina que, para o caso de se escolher p pontos centrais (problema conhecido como p -mediana), existe um conjunto de p pontos (vértices da rede) que minimiza a soma das distâncias ponderadas de todos os vértices aos mais próximos de p pontos da rede.

A consequência imediata dos resultados de Hakimi é que a busca de soluções ótimas para o problema pode ser limitada aos vértices da rede.

Modificações foram feitas, de modo a permitir sua aplicação em contextos de decisão estratégica. Desde então, a teoria da localização vem se desenvolvendo ao longo dos anos e inspirando muitos pesquisadores em várias áreas de aplicação.

Os problemas de localização podem assumir três diferentes formulações de acordo com a função objetivo a ser otimizada: problemas de p -medianas, problemas de p -centros e problemas de cobertura (Larson & Odoni, 1981; Lobo, 2003; Santos, 2005).

Para atender a essas formulações básicas, os modelos clássicos de localização estão assim classificados:

2.4.2.3. Modelos Centrais

O objetivo é localizar p instalações em uma rede, minimizando a máxima distância entre os vértices e a instalação, ou entre um nó de origem e a instalação mais próxima. Esse problema é conhecido como problema do p -centro, ou problema de minimax (Daskin, 1995). Pela sua concepção, percebe-se que o modelo é adequado para a localização de serviços emergenciais, cujo objetivo é reduzir o tempo de atendimento ou o deslocamento entre a origem e a chegada. (ReVelle *et al.*, 1977; Belardo *et al.*, 1980; Schilling *et al.*; 1980)

2.4.2.4. Modelos Medianos

Nos chamados modelos medianos, o objetivo é localizar p facilidades nos vértices de uma rede e alocar demandas dessas facilidades de forma a minimizar o total do produto peso pela distância entre as facilidades (instalações) e os pontos de demanda do consumidor.

Se a instalação é sem restrições de capacidade e o número de instalações é fixo, tem-se um problema de p -mediana.

Se o número de instalações é variável e as instalações não têm restrição de capacidade, tem-se um problema denominado Uncapacitated Plant Location Model (UPLM) ou modelo de localização de plantas não-capacitadas (Balinski, 1965 *in* Zhu & ReVelle, 1989).

Se o número de localizações é variável e sua instalação tem capacidade definida, tem-se então um problema denominado *Capacitated Plant Location Problem* (CPLP) ou problema de localização de plantas capacitadas, o qual é bem explorado (Davis & Ray, 1969; Geoffrion & Graves, 1974; Guinard & Spielberg, 1979; Barcelo & Casanovas, 1984; Lee, 1993; Sridharan, 1995; Tragantalerngsak *et al.*, 1997).

2.4.2.5. Modelos de Cobertura

O objetivo é minimizar o custo de localização de uma facilidade pelo qual um máximo nível de cobertura é obtido. Os problemas de cobertura estão divididos em conjunto de problemas de cobertura e problemas de máxima cobertura.

Conforme Almeida (1999), no caso dos problemas de cobertura normalmente já se conhece uma medida de desempenho para o sistema em estudo e a partir disso busca-se encontrar o menor número de unidades que atendam a todos os pontos de demanda com o desempenho desejado.

Problemas de localização de máxima cobertura (MCLP) (Church & ReVelle, 1974) são componentes essenciais de muitos algoritmos de otimização discreta. Enquanto o problema de cobertura (ReVelle *et al.*, 1976) requer a cobertura de toda a demanda com o mínimo número

de facilidades, problemas de máxima cobertura buscam cobrir a máxima demanda com um dado número de facilidades. Um conjunto de pontos de demanda, cada um com um determinado peso, é dado; um conjunto de potenciais localidades também está disponível e um raio de cobertura determina se a demanda em um ponto é coberta por uma potencial localidade. Isto significa que a distância entre o ponto de demanda e a potencial localidade não deve exceder o raio de cobertura; O problema é localizar p facilidades entre as potenciais localidades, de modo que o peso coberto total seja maximizado.

Como exemplo, ReVelle (1986) formula o problema da localização com competição como um problema de máxima cobertura pela definição da “esfera de influência” e segue modelando a área de mercado de uma facilidade como o conjunto de pontos de demanda que estão dentro desta esfera de influência. (Berman *et al.*, 2009)

Esses modelos são mais abrangentes que os anteriores e podem ser aplicados tanto no caso de serviços emergenciais como no de serviços de uso mais freqüente (Lobo, 2003).

2.4.3. O Problema da Localização de Serviços de Emergência

Na localização de serviços de emergência busca-se em geral prover cobertura a áreas de demanda. A noção de cobertura implica na definição de uma distância (tempo) de serviço, que é a distância (tempo) crítica além da qual a área de demanda é considerada não coberta. Uma área de demanda é, portanto, considerada coberta se está a menos da distância crítica de pelo menos uma das facilidades existentes, independentemente de a facilidade (ou servidor) estar ou não disponível quando o serviço é solicitado. (Chiyoshi *et al.*, 2000)

Segundo Galvão *et al.* (1999), o modelo matemático mais simples para problemas de localização com restrições de cobertura, que atende às condições expressas no parágrafo anterior, é o Modelo de Localização para a Cobertura de Conjuntos. Um problema a ele relacionado é o problema de localização dos p -centros, que busca a localização de p facilidades de tal forma que a distância máxima de qualquer área de demanda à facilidade mais próxima seja a mínima possível. O Problema de Localização de Máxima Cobertura atende a esse propósito.

Nesse caso, o objetivo é localizar um número pré-especificado de p facilidades, tal que a máxima população possível de uma dada região esteja coberta a menos de uma distância crítica S pré-definida.

Matematicamente, o problema pode ser definido da seguinte forma.

Sejam:

S = a distância de serviço definida para o problema;

$J = \{1, 2, \dots, m\}$ o conjunto de áreas de demanda,

$I = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto de locais em potencial onde facilidades podem ser localizadas,

f_j = população da área de demanda j ,

$a_{ij} = 1$ se a área de demanda j puder ser coberta por uma facilidade localizada em $i \in I$ a menos da distância de serviço S ($a_{ij} = 0$ caso contrário);

p = número de facilidades a serem localizadas.

$x_j = 1$ se a área de demanda j for coberta ($x_j = 0$ caso contrário);

$y_i = 1$ significa que uma facilidade deve ser localizada em $i \in I$ ($y_i = 0$ caso contrário).

A formulação matemática de problema é dada, a menos de uma distância crítica S pré-definida, por:

$$v = \text{Máx} \left\{ \sum_{j \in J} f_j \cdot x_j \right\} \quad (2.10)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in I} a_{ij} \cdot y_i - x_j \geq 0; j \in J \quad (2.11)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p; \quad (2.12)$$

$$x_j \in \{0, 1\}; \quad (2.13)$$

$$y_i \in \{0, 1\}; \quad (2.14)$$

Na formulação apresentada, a função-objetivo busca maximizar a população total coberta. As restrições (2.11) asseguram que uma área de demanda $j \in J$ está coberta, se existe pelo menos uma facilidade a uma distância inferior a S da mesma. A restrição (2.12) limita o número de facilidades na solução a p . Finalmente, as restrições (2.13) e (2.14) definem a natureza binária das variáveis de decisão.

Uma desvantagem dos modelos apresentados na localização de serviços de emergência é que eles partem da hipótese que as facilidades (servidores) estão sempre disponíveis quando solicitadas. Em sistemas não congestionados, com pouca demanda, a hipótese é razoável, mas em sistemas congestionados, nos quais as chamadas são freqüentes, essa hipótese é totalmente injustificada.

O congestionamento em serviços de atendimento de emergência, que pode causar a indisponibilidade de um servidor situado a menos da distância crítica quando solicitado, motivou o desenvolvimento dos modelos de localização de cobertura probabilísticos.

Este estudo aborda o caso de sistemas não congestionados, dado que a demanda pelas reservas técnicas se dá quando da ocorrência de eventos de frequência muito baixa.

2.4.4. O Problema de Localização Hierárquico de Máxima Cobertura

Em geral, os modelos de localização hierárquicos podem ter duas vertentes possíveis na formulação da função objetivo:

- (i) Minimizar a distância total ponderada percorrida entre cada uma das facilidades e os pontos de demanda (modelos minisoma);
- (ii) Maximizar a população coberta dentro da área compreendida pela distância de serviço crítica em volta de cada facilidade (modelos de máxima cobertura).

Neste trabalho, opta-se pela segunda vertente, a qual trata do Problema de Localização Hierárquico de Máxima Cobertura (PLHMC) que visa maximizar a população atendida.

Segundo Moore & ReVelle (1982, *apud* Espejo & Galvão, 2004), o problema de localização hierárquico pode ser descrito da seguinte maneira: Considere um sistema que fornece k níveis de serviços e que possui k níveis de facilidades. Nesse sistema, um nível de serviço s está disponível somente em uma facilidade de nível igual ou maior que s . O problema a ser resolvido é o de localizar um certo número de facilidades, para cada um dos k níveis definidos, de maneira que se maximize a população com acesso a todos os k níveis de serviço.

Para o caso de facilidades de dois níveis, uma área de demanda é considerada coberta se ela tem acesso, dentro das distâncias de serviço pré-definidas, a ambos os níveis de serviço, nível 1 e nível 2. As distâncias críticas dos serviços definidas por Moore & ReVelle (1982) são diferentes para os dois níveis de serviço, e as distâncias críticas para o serviço de nível 1 são diferentes para os dois tipos de facilidades.

No problema de localização de unidades de serviço emergenciais, a distância crítica foi introduzida como um balizador para o tempo limite de atendimento em relação ao serviço que se pretende disponibilizar. No caso específico do estudo de Moore & ReVelle (1982), o problema se insere no contexto do atendimento a serviços emergenciais de saúde e, na sua formulação, foi tratado como um problema de programação linear inteira mista 0-1.

O problema de localização hierárquico de dois níveis é formulado como segue.

Sejam:

$J = \{1, \dots, m\}$ conjunto de áreas de demanda;

$I = \{1, \dots, n\}$ conjunto de locais onde as facilidades podem ser instaladas;

f_j = população da área de demanda $j \in J$;

R_1 = distância crítica para o serviço de nível 1 oferecido pela facilidade de nível 1;

T_1 = distância crítica para o serviço de nível 1 oferecido pela facilidade de nível 2;

R_2 = distância crítica para o serviço de nível 2 oferecido apenas pela facilidade de nível 2;

$a_{ij} = 1$ se a área de demanda $j \in J$ puder ser coberta pelo nível de serviço 1 (dentro da distância crítica R_1), oferecido pela facilidade de nível 1 localizada em $i \in I$ ($a_{ij} = 0$ caso contrário);

$b_{ij} = 1$ se a área de demanda $j \in J$ puder ser coberta pelo nível de serviço 1 (dentro da distância crítica T_1), oferecido pela facilidade de nível 2 localizada em $i \in I$ ($b_{ij} = 0$ caso contrário);

$c_{ij} = 1$ se a área de demanda $j \in J$ puder ser coberta pelo nível de serviço 2 (dentro da distância crítica R_2), oferecido pela facilidade de nível 2 localizada em $i \in I$ ($c_{ij} = 0$ caso contrário);

p = número de facilidades de nível 1 a serem localizadas;

q = número de facilidades de nível 2 a serem localizadas;

$x_j = 1$ se a área de demanda $j \in J$ é coberta ($x_j = 0$ caso contrário);

$y_i = 1$ se uma facilidade de nível 1 é localizada em $i \in I$ ($y_i = 0$ caso contrário);

$z_i = 1$ se uma facilidade de nível 2 é localizada em $i \in I$ ($z_i = 0$ caso contrário).

Por hipótese, as facilidades de nível superior são as mais atraentes para o cliente; assume-se, portanto que: $R_1 < T_1 < R_2$.

Utilizando esta nomenclatura, o modelo matemático para a função objetivo pode ser formulado como segue:

$$v = \text{Máx} \left\{ \sum_{j \in J} f_j \cdot x_j \right\} \quad (2.15)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in I} a_{ij} \cdot y_i + \sum_{i \in I} b_{ij} \cdot z_i - x_j \geq 0; j \in J \quad (2.16)$$

$$\sum_{i \in I} c_{ij} \cdot z_i - x_j \geq 0; j \in J \quad (2.17)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p; \quad (2.18)$$

$$\sum_{i \in I} z_i = q; \quad (2.19)$$

$$x_j \in \{0,1\}; \quad (2.20)$$

$$y_i, z_i \in \{0,1\}; \quad (2.21)$$

A função objetivo, a ser maximizada, representa a população total coberta pelos serviços níveis 1 e 2. As restrições (2.16) estabelecem que uma área de demanda $j \in J$ é coberta

pelo serviço de nível 1 se existe pelo menos ou uma facilidade de 1 a uma distância inferior a R_1 e/ou uma facilidade de nível 2 a distância inferior a T_1 . As restrições (2.17) estabelecem que uma área de demanda $j \in J$ é coberta pelo serviço de nível 2 se existe pelo menos uma facilidade de nível 2 a uma distância menor que R_2 . A restrição (2.18) limita em p o número de facilidades de nível 1 e a restrição (2.19) limita em q o número de facilidades de nível 2 na solução do problema. As restrições (2.20) e (2.21) definem a natureza binária das variáveis de decisão.

Moore & ReVelle (1982) resolveram o problema utilizando a relaxação de programação linear da formulação acima. Nos casos em que é obtida uma solução fracionária, os autores recomendam que se busque uma solução ótima por inspeção ou utilizando um algoritmo *branch-and-bound*.

2.4.5. O Problema da Localização de Reservas

O problema de localização de equipamentos reservas é de natureza muito específica e não é apresentado na literatura diretamente. Não obstante, o problema se enquadra na questão da localização, vastamente difundida na literatura e pode aparecer associado a vários enfoques distintos, tais como: localização de negócio, localização industrial e localização de instalações. Assim, do ponto de vista metodológico, a localização de uma instalação ou de uma reserva técnica apresentam a mesma estrutura.

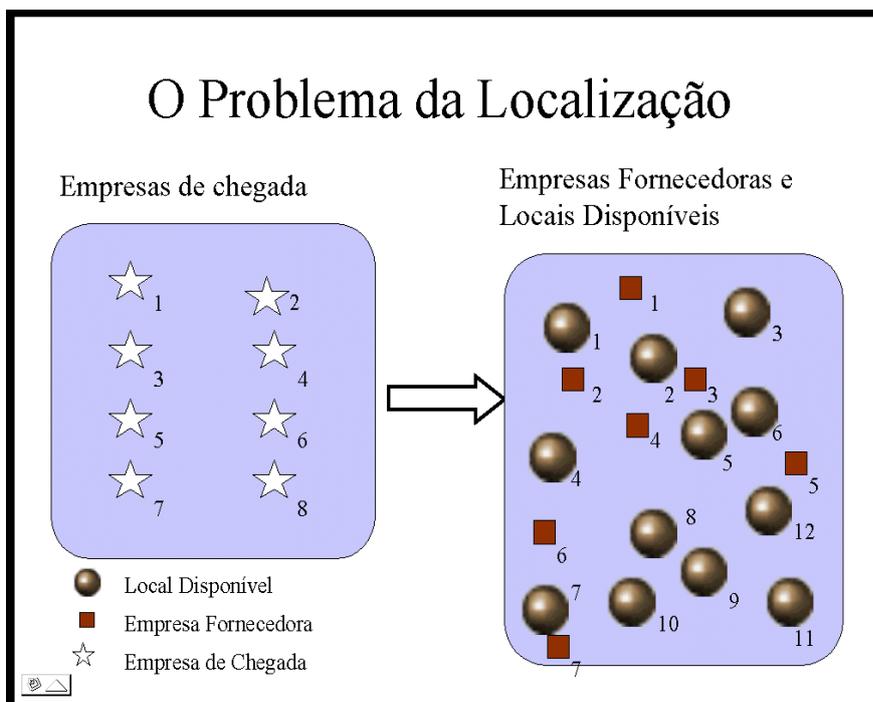


Figura 2.5 - Modelo de Localização de Empresas (Fonte: Ferreira et al., 2003)

Para a localização das reservas técnicas, tem-se por analogia um conjunto de empresas interessadas em se instalarem numa região com algumas localidades disponíveis e um certo número de empresas de suprimentos já instaladas. Deseja-se então localizar essas empresas, de modo a atender critérios definidos e maximizar o ganho (vantagem) total, conforme exhibe a figura 2.5.

Na localização de reserva técnica tem-se um contexto no qual o mercado é representado pela demanda por itens de reserva, que ocorre através das falhas nos equipamentos em operação. Essa demanda está distribuída nas diversas instalações atendidas por um tipo particular de reserva técnica.

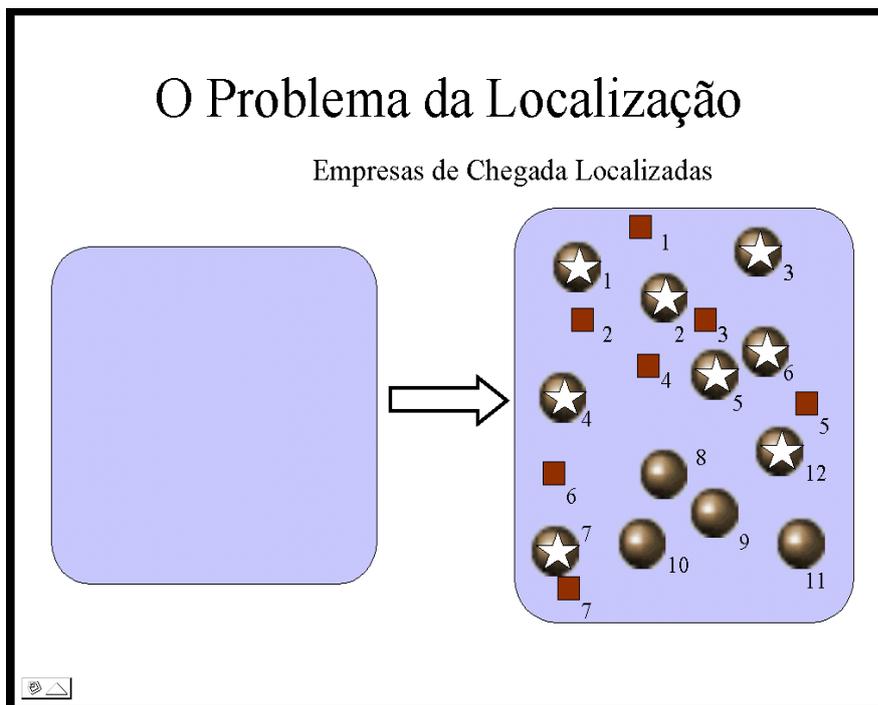


Figura 2.6 - Empresas Localizadas (Fonte: Ferreira et al. 2003)

Portanto, na localização de reservas técnicas tem-se a mesma situação; as empresas de chegada são os equipamentos reservas que devem ser localizados; as localidades disponíveis são as instalações, para as quais as reservas são compatíveis, e, por sua vez, podem ser consideradas fontes de suprimento, já que um dos reservas, uma vez localizado numa dessas instalações, poderá suprir a demanda de falha de uma instalação vizinha. Vide figura 2.6.

Cabe ressaltar que aspectos relacionados à confiabilidade dos equipamentos em operação nas instalações concorrem diretamente para a modulação da demanda pelas reservas técnicas, e que a localização dessas reservas tem impacto direto sobre a mantabilidade do sistema quando a falha suscita a substituição do equipamento avariado.

Por extensão, o tempo de interrupção do serviço reflete na disponibilidade do sistema, cuja garantia constitui o principal objetivo e desafio do setor de manutenção. Nesse sentido, a logística que suporta a estrutura de manutenção deve contemplar em sua estratégia, dentre outras competências, o correto dimensionamento e alocação das reservas técnicas ao longo da planta produtiva.

A problemática da localização é um tema vastamente difundido na literatura, com inserção em diversos segmentos. Existem várias abordagens utilizadas para a determinação da melhor localidade, seja para empresas, equipamentos, imóveis ou qualquer dispositivo de baixa mobilidade ou cuja longa permanência em determinado lugar, faz-se necessária devido a altos investimentos associados à instalação ou por motivos estratégicos (Handler & Mirchandani, 1979; Robeson *et al.*, 1994; Bowersox, 1978).

Seleção de localizações para instalações pode ser visto como um problema típico de decisão multicritério, no qual a preferência gerencial entre os critérios desempenha um papel-chave na decisão final. Para avaliar a instância da decisão escolhida, explicitando um modelo de preferência para o decisor, muitos esforços têm sido realizados no desenvolvimento de teorias e metodologias de avaliação de preferência.

Na literatura, as abordagens preferidas para tratar o problema de localização são a teoria da utilidade multiatributo (MAUT) e o processo hierárquico analítico (AHP) (Falkner & Benhajla, 1990; Saaty, 1990).

2.5. Decisão Multicritério

2.5.1. Estrutura do Conjunto de Ações

Para um problema de decisão, geralmente existem algumas alternativas candidatas, dentre as várias possíveis, que viabilizam alguns objetivos previamente especificados. Para se estabelecer a estrutura do conjunto de ações, duas questões iniciais devem ser consideradas: a problemática e o tipo de conjunto de ações.

A primeira questão a ser analisada está relacionada à problemática que deve ser considerada. Entende-se por problemática o termo usado para descrever a concepção do caminho imaginado como apoio para o entendimento do problema. Nesse contexto, quatro problemáticas básicas são visualizadas, a saber:

- Escolha
- Classificação

- Ordenação
- Descrição

Para o problema em estudo, a problemática de descrição não atende ao escopo pretendido, que busca uma abordagem quantitativa e mais formal para a sua solução. A problemática de classificação não se enquadra nos objetivos desse problema, uma vez que não há interesse no estabelecimento de categorias para as subestações. A problemática de ordenação propicia uma visão interessante tanto para os casos de reserva única, quanto para múltiplas reservas. Outra opção adequada é a problemática de escolha, adotada nesta tese.

A segunda questão a ser analisada está relacionada ao tipo de conjunto de ações. O processo de decisão requer a identificação das possíveis alternativas (ações) e a avaliação de suas respectivas conseqüências para a tomada de decisão.

A definição do conjunto de ações não depende apenas do problema a solucionar ou dos decisores envolvidos, mas está fortemente relacionada com todos os elementos que influenciam o processo de decisão, tais como: definição dos critérios, modelagem das preferências, as variáveis do problema e a escolha do método de decisão a utilizar. Além disso, muitas vezes, em face da dificuldade de definição *a priori*, o conjunto de ações é definido progressivamente ao longo do processo (Vincke, 1992).

Em síntese, Vincke (1992) considera, dentre outros aspectos, as ações como estáveis ou evolutivas e globais ou fragmentadas. Uma ação global é exclusiva de todas as outras ações introduzidas no modelo. Quando não é global, é fragmentada. Cada ação deve ser identificada de modo que sejam distinguidas umas das outras no contexto do problema apresentado.

A estrutura do conjunto de ações do modelo de decisão para o problema em estudo apresenta sumariamente as seguintes características:

- As características apresentadas pelo conjunto de ações o fazem ser considerado como Estável e Global;
- Não são inseridas no conjunto de ações as subestações situadas na região geográfica analisada que não disponham de equipamento compatível com a(s) reserva(s) técnica(s) disponível(is);
- Em relação às duas problemáticas, inicialmente propostas (ordenação e escolha), tem-se uma visualização do tipo de solução:
 - Subconjunto $\{a_i, \dots, a_j\}$, para problemas de escolha; e
 - Conjunto ordenado $\{a^1, a^2, \dots, a^n\}$, para problemática de ordenação.

2.5.2. Modelo Multicritério

O problema da localização de facilidades se enquadra bem no âmbito de modelagem multicritério, considerando os aspectos de múltiplos objetivos envolvidos. No contexto da reserva técnica, é identificada a concepção de logística subjacente, na qual se insere a estrutura de manutenção dos ativos físicos, e os objetivos múltiplos dizem respeito à minimização de custos dos recursos (materiais, humanos, metodológicos, de tecnologia etc.) e à continuidade do serviço para o qual a organização converge o foco do seu negócio.

As decisões estão presentes diariamente para as pessoas em geral e, particularmente, para aqueles executivos de uma organização que estão empenhados na busca de soluções para problemas que apresentam várias alternativas, mediante o uso de diversos métodos.

Entretanto, de uma forma sumária, pode-se descrever a estrutura de um processo de decisão como uma seqüência de etapas em que o decisor identifica alternativas existentes, suas respectivas conseqüências e, em seguida, escolhe a alternativa que apresenta o maior retorno ou vantagem para si.

Os resultados obtidos do modelo são apenas recomendações, que, pela sua própria natureza, podem (ou não) ser seguidas pelos decisores. Tais recomendações não apontam a solução ótima do problema real; são indicações originadas de conclusões bem fundamentadas e de convicções construídas durante o processo de apoio à decisão (Roy, 1993).

De fato, existe uma miríade de métodos de decisão multicritério (Vincke, 1992) disponíveis na literatura específica. Neste trabalho a ênfase recai sobre a Teoria da Utilidade Multiatributo (mais conhecida por MAUT – Multiple Attribute Utility Theory), que é uma abordagem multicritério para problemas de decisão, particularmente muito apropriada em situações de incerteza (Keeney & Raiffa, 1976).

Neste estudo, a incerteza é considerada sobre os estados da natureza dos ativos, ou seja, sobre as ocorrências futuras, fora do controle do decisor, que podem influenciar nas conseqüências de uma alternativa da decisão. Nesse contexto, se adota uma abordagem bayesiana na modelagem probabilística do parâmetro de confiabilidade sob interesse.

Não obstante, a incerteza também se mostra presente na estrutura de preferências do decisor. Para esse contexto, existem alternativas de abordagem que consistem em desenvolver estruturas de relações de preferência baseadas em lógica nebulosa, como é visto nos métodos ELECTRE III (Roy, 1991), PROMETHE (Brans & Vincke, 1985) e mediante o uso de lógica Fuzzy (Roy, 1977).

2.5.3. Aplicação da MAUT

MAUT surgiu da Teoria da Utilidade que trata da quantificação de preferências do decisor para valores de uma única variável (consequência). Uma variável típica está relacionada ao custo C ; nesse caso, a função utilidade de C , $U(C)$ estabelece valores para cada custo dentro da faixa de interesse. A metodologia existente na Teoria da Utilidade consiste em maximizar a utilidade esperada das consequências da ação.

Em determinadas situações, o mecanismo de escolha dos indivíduos não se baseia apenas nos valores de utilidade por eles atribuídos às consequências, mas, sobretudo, no risco associado a cada alternativa. Em decorrência disso, indivíduos diferentes podem tomar decisões diversas para um mesmo problema, conforme as suas disposições em assumir riscos.

Portanto, a Teoria da Utilidade apresenta três categorias de decisores que são classificados com base em sua disposição para assumir riscos: averso ao risco, propenso ao risco e neutro ou indiferente ao risco (Keeney & Raiffa, 1976).

A teoria da Utilidade tem uma forte associação com a Teoria da Decisão (Berger, 1985; Raiffa, 1970). Um aspecto importante da Teoria da Utilidade é a avaliação e estudo das condições de independência. A forma de avaliação permite encontrar uma forma analítica para a função utilidade multiatributo.

Há algumas funções que exibem formas funcionais compatíveis com condições de independência entre os atributos na estrutura de preferências do decisor. De uma maneira geral, a agregação dos atributos é feita com uma função utilidade como apresentado a seguir:

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)) \quad (2.22)$$

A independência em utilidade implica em uma independência das preferências do decisor entre os atributos, de maneira a simplificar o processo de determinação da forma para a função utilidade, pode-se considerar que um atributo é independente de outro em utilidade quando as preferências condicionais para as loterias no primeiro atributo não dependem de um nível particular do segundo atributo.

A independência aditiva consiste em outra condição mais restritiva para a estrutura de preferências do decisor que conduz à forma da função utilidade aditiva, para a qual não existe interação entre os atributos. Os atributos Y e Z possuem independência aditiva se a ordem de preferência por loterias não depende da distribuição de probabilidade conjunta dessas loterias, mas apenas de suas distribuições de probabilidades marginais (Keeney & Raiffa, 1976):

$$u(y, z) = K_y u_y(y) + K_z u_z(z) \quad (2.23)$$

Onde: K_y e K_z são constantes de escala positivas, e $K_y + K_z = 1$.

A função utilidade multilinear é justificada nos casos em que se encontra condição de independência em utilidade entre os atributos, porém existe interação entre os mesmos:

$$u(y, z) = K_1 u(y) + K_2 u(z) + K u(y) u(z) \quad (2.24)$$

Onde: K_1 , K_2 e K são constantes de escala positivas, e $K_1 + K_2 + K = 1$.

A constante K indica o nível de interação entre os atributos: se $K = 0$, não há interação; se $K > 0$, são complementares e; se $K < 0$, são substitutos (Keeney & Raiffa, 1976).

Vincke (1992) critica o modelo aditivo MAUT de ser fortemente compensatório. O autor alega que, por ser um método de agregação dos diversos critérios, o modelo aditivo não possibilita a avaliação de importância relativa entre critérios. Enquanto que, nos métodos não compensatórios, a importância relativa é admitida e as ações bem balanceadas.

No estudo de caso apresentado neste trabalho, otimizar o atributo custo pode estar associado aos efeitos do tempo de deslocamento da reserva técnica (possibilidade de atraso e prejuízo para os clientes). Nessa situação, as perdas indiretas referem-se, por exemplo, ao custo da não disponibilidade do serviço para o cliente. É dessa forma que a Teoria da Utilidade Multiatributo se insere em um problema de decisão, uma vez que o processo de elicitação de preferências permite agregar ao modelo a subjetividade do decisor na avaliação das conseqüências dos atributos. (O termo elicitação é um neologismo do original em inglês *elicitation*, empregado para designar o processo de aquisição de conhecimento sobre a estrutura de preferências do decisor).

Alem disso, a análise direta dos atributos não permite ao decisor estabelecer um processo de escolha que trate com segurança as incertezas existentes no contexto do problema em apreço. Como forma de contornar essa limitação, torna-se necessário empregar a Teoria da Utilidade Multiatributo (Keeney & Raiffa, 1976; Vincke, 1992), que torna possível inserir no modelo de decisão uma abordagem voltada para os aspectos de incerteza.

Os resultados da aplicação dos métodos fundamentados na Teoria da Utilidade Multiatributo são ricos com respeito às relações de dominância, conduzindo a uma função utilidade (ou valor) que permite ordenar todas as ações, da melhor para a pior. Embora, seja imprescindível considerar restrições muito fortes, tais como: existência da função utilidade e outros questionamentos ao decisor sobre a intensidade de preferências e taxas de substituição.

Quando o decisor é questionado a respeito de suas preferências, pode apresentar respostas coerentes com certo desconhecimento da função utilidade em estudo. Assim, cabe

ao analista, tentar estimar a função analítica que representa a utilidade do decisor para determinado problema através de questões bem elaboradas (Keeney & Raiffa, 1976)

Uma das primeiras etapas na aplicação da MAUT consiste na modelagem de preferências do decisor, através da função utilidade. Durante a fase de elicitación da estrutura de preferência do decisor, é possível determinar um valor para a consequência na qual o decisor se mostra indeciso entre optar por esse valor, o equivalente certo, ou permanecer na incerteza do problema.

O procedimento para avaliação de preferências pela função utilidade requer uma preparação inicial do decisor pelo analista, a fim de que o decisor perceba os conceitos de utilidade e esteja motivado o suficiente para expressar suas preferências. Basicamente, são reconhecidas as seguintes etapas (Keeney & Raiffa, 1976):

- Preparação para avaliação;
- Identificação de características quantitativas relevantes;
- Especificação de restrições quantitativas;
- Escolha da função utilidade
- Avaliação de consistência

Segundo Keeney & Raiffa (1976), as decisões mais complexas podem envolver um número de alternativas tão grande que não permite ao decisor a avaliação direta das consequências. Este tipo de decisão exige uma estruturação mais rígida que propicie a quantificação das consequências das alternativas.

Para Erlich (1996, *apud* Cunha, 2003) existem três ocasiões nas quais um problema de decisão aparece associado ao conceito de utilidade, a saber:

1. Nos casos em que valores monetários não são os mais apropriados para avaliar as consequências;
2. Situações em que o valor esperado não representa a incerteza de forma adequada por não levar em conta a propensão do decisor em relação ao risco;
3. Quando se faz necessária a satisfação simultânea de diversos objetivos quantificados.

2.5.3.1. Elicitación da Utilidade

Gomes *et al.* (2009), apresentam duas técnicas para determinação da utilidade, a saber:

- a) avaliação direta;
- b) levantamento da função utilidade.

O processo de avaliação direta da utilidade para conseqüências envolve inicialmente a identificação, por parte do decisor, das conseqüências de maior preferência e de menor preferência. A conseqüência de maior preferência é denominada de x^* e a de menor preferência, de x^0 . Essas duas conseqüências constituem o início e o fim da escala de utilidade para o atributo em apreço, de modo que é possível atribuir a x^* e a x^0 os valores extremos dessa escala: $u(x^*) = 1$ e $u(x^0) = 0$.

A utilidade das demais conseqüências x em relação ao atributo considerado é obtida pela determinação da probabilidade de indiferença entre cada conseqüência e a seguinte loteria $\langle x^*, \pi, x^0 \rangle$. Assim, a cada utilidade da conseqüência x deve corresponder a utilidade esperada da loteria, para um determinado valor de π :

$$u(x) = \pi \cdot u(x^*) + (1 - \pi) \cdot u(x^0) = \pi \quad (2.25)$$

A técnica de avaliação direta é restrita a análises discretas de problemas com poucas conseqüências. Para um número maior de conseqüências, recomenda-se o emprego da função utilidade.

A elicitação da função utilidade baseia-se no procedimento anterior, porém permite que, a partir da utilidade de algumas conseqüências, seja traçada uma curva denominada de função utilidade, na qual é obtida a utilidade de qualquer conseqüência no intervalo predefinido.

A MAUT possibilita a formulação de uma função utilidade que agrega os diversos atributos, cuja forma analítica é definida, mediante uma análise de independência em entre estes atributos tomados aos pares. O processo de escolha é, então, conduzido, a partir desta nova escala que incorpora os aspectos de incerteza inerentes ao problema de decisão. Aquela alternativa que fornece o maior valor para a função utilidade multiatributo representa a melhor solução para o aludido problema, segundo a estrutura de preferência do decisor envolvido.

2.6. Abordagem Bayesiana

A abordagem bayesiana é conveniente quando não se dispõe de dados ou quando esses são insuficientes para permitir a obtenção dos parâmetros de uma distribuição de probabilidade que, sobre a evidência de experiências anteriores, modela apropriadamente esses dados. (Cavalcante & Almeida, 2005)

Nesses casos, os parâmetros são considerados variáveis aleatórias, sobre as quais se buscam informações *a priori* acerca do seu comportamento probabilístico, segundo um grau de credibilidade subjetiva.

O termo *a priori* significa antes de se fazer qualquer experimento. A atribuição dessa probabilidade *a priori* é feita através de um protocolo de elicitacão de especialistas (Campello de Souza, 2002).

A interpretaçao subjetiva ou personalista (Ramsey, de Finetti, Savage etc) considera que a probabilidade representa uma relaçaõ entre a evidência e a hipótese e mede a credibilidade que uma dada pessoa, na posse da evidência, atribui à hipótese (Paulino *et al.*, 2003).

Foi James Bernoulli, em 1873, o primeiro a enunciar que a probabilidade é um “grau de confiança” (ou “grau de crença”) que um indivíduo associa a um evento incerto; e que esse grau depende de seu conhecimento e pode variar de indivíduo para indivíduo.

No contexto da Estatística Bayesiana, Campello de Souza (2002) apresenta algumas características da probabilidade subjetiva ou epistêmica, a saber:

- As probabilidades descrevem os graus lógicos ou psicológicos de crença parcial de um indivíduo ou sistema intencional
- É um raciocínio probabilístico quantitativo baseado em axiomas que fornecem restrições de consistência ou coerência;
- As estimativas são construídas a partir de crenças individuais, julgamentos, preferências, intuição e introspecção.

2.6.1. Distribuição a priori

A informação *a priori* é obtida com base na experiência de um decisor ou mediante observações realizadas ao longo dos anos de experiência por um especialista, as quais compõem um conhecimento acerca de um determinado parâmetro de interesse que pode ser tratado quantitativamente, quando expresso por meio de uma distribuição de probabilidade *a priori* $\pi(\theta)$. (Martz & Waller, 1982)

Segundo Paulino *et al.*, (2003), do ponto de vista lógico, a própria distribuição *a priori* $\pi(\theta)$, correspondente a uma informação *a priori* real e explicitamente quantificável sobre θ , pode ser encarada como uma distribuição *a posteriori*, resultante da atualização bayesiana, por essa informação *a priori* objetivamente representável, de uma distribuição materializando um estado de completa ignorância *a priori*.

2.6.2. Método de Elicitação

Visando a obtenção da distribuição de probabilidade *a priori* sobre o parâmetro de interesse θ , é aplicado um procedimento de elicitacão do conhecimento de um especialista.

Segundo Kadane (1980, *apud* Paulino *et al.*, 2003), designa-se por método estrutural qualquer método de elicitación da distribuição *a priori* de um parâmetro $\theta \in \Theta$, que se baseie em questões relacionadas diretamente ao parâmetro.

O'Hagan (1998, *apud* Paulino *et al.*, 2003) refere dois princípios que acredita serem importantes na elicitación:

- (i) Fazer perguntas que sejam entendidas pelo especialista numa linguagem simples e que lhe seja familiar;
- (ii) Identificar e elicitar separadamente as principais fontes de incerteza.

Se o número de valores possíveis para θ for finito, i.e. $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}$, o problema se reduz a determinar a probabilidade de cada elemento θ de Θ . (Paulino *et al.*, 2003).

Neste trabalho utiliza-se o método dos intervalos equiprováveis de Raiffa (1970) para a elicitación do conhecimento *a priori* do especialista acerca da probabilidade de falha e as funções de distribuição de probabilidade *a priori* adotadas seguem o modelo de Weibull, devido à sua versatilidade de ajuste aos dados obtidos do processo de elicitación (Almeida *et al.*, 1997; Ferreira, 2001; Cavalcante & Almeida, 2006).

Nas entrevistas com os especialistas, o questionário de elicitación do conhecimento *a priori* (QUESTPRI) desenvolvido pelo GPSID (Grupo de Pesquisa em Sistemas de Informação e decisão) é empregado para facilitar o dimensionamento dos intervalos equiprováveis, devido aos recursos de visualização disponíveis; bem como, para reduzir uma eventual influência do analista sobre as respostas, durante a condução do processo.

A partir do conceito de probabilidade subjetiva e por meio do procedimento de elicitación, são obtidos os pontos da função distribuição *a priori* sobre o parâmetro de interesse para cada equipamento, a qual diz respeito ao estado inicial do conhecimento sem a observação de dados, sob uma perspectiva Bayesiana.

Na obtenção dessas funções, por meio do método de elicitación proposto por Raiffa (1970) não se questiona o conhecimento do especialista nem são expressos índices de vagueza de conhecimento ou qualquer outro similar, como ocorre em outros métodos estruturados (Campello de Souza, 2002). Contudo, um procedimento de elicitación consiste num *trade off* entre precisão e entendimento. À medida que são usados procedimentos mais precisos, torna-se mais difícil para o especialista o entendimento do processo.

Nesse sentido, consideram-se bastante razoáveis os resultados obtidos pelo método de elicitación empregado neste trabalho para a fdp *a priori* de falha das subestações, de modo a contemplar a incerteza na ponderação da demanda pelas unidades reservas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo busca descrever o problema da Localização de Instalações, considerando as diversas visões e abordagens que são encontradas na literatura, de modo a abranger as variantes deste problema, bem como os métodos de resolução mais difundidos. Nesse contexto, é apresentada uma revisão bibliográfica que contempla os estudos desenvolvidos nesta área de pesquisa para o tratamento do problema da localização sob a ótica da literatura tradicional de gerência da produção e segundo a visão científica concernente aos periódicos especializados nacionais e internacionais.

No que se refere ao problema de alocação de equipamentos reservas, percebe-se que este constitui um tópico de natureza muito específica e raramente é encontrado na literatura. Os artigos selecionados não estão diretamente relacionados ao problema que se está investigando. No entanto, o tema localização, abordado de uma maneira mais genérica, pode ser facilmente encontrado devido à vasta literatura disponível relacionada a vários problemas distintos: localização de negócio, localização estratégica, localização industrial, localização de instalações. Na maioria dos casos, o tema da localização encontra-se vinculado aos objetivos empresariais. Do ponto de vista metodológico, a localização de uma instalação ou de uma reserva técnica apresenta a mesma estrutura. A questão precípua a se diferenciar está relacionada a dois aspectos que são o objetivo e o ambiente.

No primeiro aspecto, os principais objetivos da localização de uma instalação já foram discutidos e têm uma importância estratégica para a organização. Do ponto de vista de uma reserva técnica, sua localização deve assegurar um nível de qualidade aceitável para o produto, em situações adversas, atendendo a critérios de custo e disponibilidade, no contexto de serviços. Esses objetivos são muitas vezes percebidos apenas no nível operacional, por sua natureza predominantemente técnica, mas têm impactos sobre o negócio, pois refletem diretamente na qualidade do serviço prestado ao cliente.

No aspecto ambiente, para a localização das instalações tem-se um contexto que envolve elementos, tais como: mercado e insumo para o produto produzido. Com respeito à localização da reserva técnica, devem ser observadas as correlações entre esses elementos: o mercado é representado pela demanda de itens reservas, motivada pelas falhas nos equipamentos de produção; e os insumos, pelos meios e condições necessárias para se deslocar a reserva técnica do ponto onde está localizada até o ponto em que é solicitada.

Inicialmente, é apresentado um breve histórico sobre o tema, no qual são destacados alguns dos principais estudiosos que se debruçaram sobre este assunto.

Em seguida, uma revisão da literatura discorre acerca dos problemas de localização de facilidades em diversas aplicações e contextos. Ao final do capítulo, é tratada a questão específica de reserva técnica de transformadores em sistemas elétricos.

3.1. Breve Histórico Sobre Localização

Iniciado no século XVII, com Pierre de Fermat's (1601-1665), o problema de localização apresentava a seguinte abordagem: “Dados três pontos no plano, encontrar um quarto ponto tal que a soma das suas distâncias em relação aos três pontos é um mínimo” (Kuhn, 1967). Evangelista Torricelli (1608-1647) é um dos estudiosos creditados com a construção geométrica necessária para encontrar tal mediano espacial ou “ponto de Torricelli”; detalhes são apresentados por Drezner *et al.* (2002). (*apud* Smith *et al.*, 2009)

Concebida desde o século XIX, a localização industrial teve suas primeiras contribuições teóricas através de Launhardt e Achille Loria; desde então, é um tema de grande interesse, sendo estudado não só pela Engenharia de Produção, mas também, pela Economia, que trouxe os principais modelos de localização, através dos grandes economistas do século XIX: Von Thunen, Alfred Weber e Walter Isard.

Von Thünen (1875) tinha na minimização do custo a base para seu modelo de localização que foi concebido no cenário agrícola, tendo como principal objetivo localizar atividades agrícolas, observando-se aspectos, tais como: a influência da cidade sobre a formação dos preços de produtos agrícolas, a influência da distância da cidade sobre a agricultura e sobre a renda dos agricultores e, por fim, a influência do crescimento das cidades sobre a área rural cultivada. Thünen justifica a formação de anéis à volta do mercado em função da capacidade de pagamento de renda das várias atividades.

Um dos precursores da moderna teoria de localização foi o cientista alemão Alfred Weber, que publicou o livro intitulado “*Über den Standort der Industrien*”, em 1909. Alfred Weber teve a generalização e a abstração como características marcantes de seu modelo de localização. Propôs uma análise rigorosa e individual da influência de cada um dos fatores: custo de transporte, mão-de-obra e das forças aglomerativas. Essa análise baseava-se em três suposições gerais: as localizações das fontes de matérias primas são dadas e conhecidas. A posição e tamanho dos centros de consumo são, também, dados e conhecidos, a mão de obra é ilimitada, podendo ser encontrada em várias localizações.

Observa-se que em seu modelo foi considerado como fator determinante o custo de transporte, uma vez que a demanda é vista como independente da localização da indústria. Sendo assim, a localização ótima, segundo Weber, é aquela que proporciona o menor custo de produção possível, sendo o fator transporte o aspecto primeiro desses custos. Weber estudou o problema da localização de uma planta, com objetivo de minimizar o custo de transporte com relação a três pontos, dos quais dois representavam fontes de abastecimento para a manufatura do produto e o terceiro estava associado ao mercado consumidor.

Nesse contexto, estes dois economistas tinham como o local ideal, aquele que estivesse relacionado ao menor custo em transportes, seja das matérias primas para as fábricas ou dos produtos finais para o mercado. Weber classificou a matéria prima em dois grupos, segundo o fator de influencia nos custos de transporte: de localização e de processamento. A localização diz respeito à disposição geográfica das matérias primas, aquela região de fácil acesso seria mais propensa a localização das unidades já as características de processamento estão relacionadas a variações do peso inicial na transformação das matérias primas em produtos finais. Variando-se para mais ou menos o peso, tem-se a repulsão ou atração das unidades com relação às matérias primas. Se não houvesse mudança de peso entre matérias-primas e produtos acabados, o local a ser escolhido era livre, podendo estar próximo aos fornecedores ou consumidores.

Em complemento a esta última constatação de Weber, Hoover (1957) observou que as taxas de transporte crescem com a distância. Para minimizar os custos de transporte, os processos de transformação envolvidos são o fator de localização dominante, de modo que uma instalação localizada na fonte de matéria-prima ou no mercado consumidor terá o mínimo custo de transporte.

Após essa iniciativa, a teoria da localização foi marcada por poucos trabalhos até meados da década de 1960. Segundo Brandeau & Chiu (1989, *apud* Silva, 2006), eram aplicações pontuais e não unificadas em torno de uma teoria única. Algumas dessas aplicações envolviam estudos de localização de veículos de bombeiros, fábricas, depósitos de lixo e aplicações em redes de ferrovias e comunicações.

De fato, com o surgimento da programação linear, em meados da década de 40, em especial o modelo de transporte, puderam ser introduzidas situações mais complexas que a original.

Weber teve vários seguidores que aperfeiçoaram suas obras, dentre eles, tem-se como destaque Andreas Predohl que na década de 20 trouxe grandes contribuições com seu enfoque Neoclássico. Para Predohl, a substituição de insumos está relacionada com as mudanças

locacionais e o problema de localização é tratado de acordo com a teoria Neoclássica da Produção (Azzoni, 1982). Este enfoque de Predohl tem sido desenvolvido por diversos estudiosos, como: Walter Isard (1956), Leon Moses (1958), William Alonso (1967) Miller & Jensen (1978). Durante esta evolução, muitas modificações também foram propostas, seus principais colaboradores são: Kuhn & Kuenne (1962), Palander (1936) e August Losch (1957).

Dentre os principais métodos desse período, destacam-se os métodos Gráficos (Weber, 1909) e Aproximados (Wesolowsky & Love, 1972), cujas limitações são apresentadas a seguir:

- A procura é concentrada em pontos;
- Os custos fixos (de investimento) são desprezados;
- Os custos de transporte são considerados lineares;
- As distâncias são euclidianas;
- A solução é estática.

Um grande avanço na determinação da localização foi alcançado a partir da utilização de novas formas de modelagem, como programação inteira/mista (mais especificamente com a utilização de variáveis binárias), programação dinâmica, e programação estocástica.

Segundo Smith *et al.* (2009), a análise de localização tem amadurecido ao longo das últimas décadas, a partir de suas primeiras raízes, e fecundado um vasto número de ramificações que se interligam a outras disciplinas, tais como o planejamento ambiental e a gestão da cadeia produtiva. Os autores dividiram a evolução da teoria da localização em três fases: período das primeiras contribuições, quando foram estudados problemas seminais, envolvendo questões de natureza geométrica e geográfica; a fase de “novos tempos”, com a inclusão de problemas clássicos que se revelaram fundamentais para as pesquisas subsequentes; e a terceira fase, na qual se assiste às novas aplicações emergentes e o desenvolvimento de modelos e algoritmos sofisticados.

3.2. Modelos de Localização

Basicamente, existem duas concepções relacionadas ao sistema de produção no qual o problema da localização de instalações é considerado. De acordo com a natureza do produto produzido, a localização de instalações pode estar inserida no contexto de um sistema de produção de bens ou no contexto de um sistema de produção de serviços.

Não obstante, qualquer que seja o tipo de negócio em que esteja envolvida a empresa considerada, as decisões sobre localização são estratégicas e fazem parte do processo de planejamento (Moreira, 1998).

Em particular, qualquer que seja o contexto do sistema de produção no qual se encontre a instalação a ser localizada, é sempre necessária a alocação dos ativos físicos dedicados à produção; além disso, a disposição de reservas para os aludidos ativos é uma questão pertinente, com vistas a assegurar um nível de atendimento satisfatório para o cliente.

Vários modelos são apresentados na literatura para tratamento da questão de localização. Esses modelos apresentam peculiaridades que os diferenciam quer pela forma de abordar o problema específico ou pela natureza dos fatores avaliados, que podem ser dissociados em qualitativos ou quantitativos, ou uma combinação de ambos (Gaither & Frazier, 2001; Moreira, 1998).

A aplicação dos modelos de localização não se restringe à localização de plantas apenas. De fato, este tipo de modelo é aplicado a problemas em diferentes tipos de áreas, tais como: sistemas de distribuição, redes de telecomunicação, substituição de máquinas etc. (Correia & Captivo, 2003).

Considerando a extensa gama de problemas passíveis de serem tratados por meio dos elementos da teoria da localização, torna-se impraticável e inconcebível tentar estabelecer um critério único para a taxonomia dos inúmeros modelos existentes e os que ainda estão por surgir, tal é a quantidade de pesquisas e de pessoas envolvidas, assim como os recursos tecnológicos cada vez mais versáteis em termos de velocidade, capacidade de processamento e armazenamento de dados. Não obstante, alguns modelos são tradicionalmente contemplados na maioria das classificações pela natureza seminal da qual se revestem e por serem precursores de muitos outros.

Os modelos básicos para decisão de localização são: ponderação qualitativa, comparação entre custos fixos e variáveis, análise dimensional, modelo do centro de gravidade (Davis *et al.*, 2001, Gaither & Frazier, 2001; Slack *et al.*, 1995; Moreira, 1993).

No modelo de localização baseado em custos fixos e variáveis, os custos são divididos em fixos e variáveis, conforme a dependência da quantidade disponível de itens (reservas). A partir deste conceito, é feita uma análise do ponto de equilíbrio (Davis *et al.*, 2001; Slack *et al.*, 1995; Moreira, 1993). Este modelo se mostra de pouca relevância para o contexto da reserva técnica.

O modelo de localização baseado em ponderação qualitativa (Davis *et al.*, 2001; Slack *et al.*, 1995; Moreira, 1993) é justificado para os casos em que não se tem estrutura de custo para cada localidade e há outros fatores que não envolvem custos. Nesse processo, cada localidade “i” recebe um julgamento para cada fator “F_{ij}”. A avaliação da localidade “N_i” é a soma de seus julgamentos ponderada pelos pesos dos fatores, expressa por:

$$N_i = \sum F_{ij} \cdot P_j, \quad (\text{para toda a faixa de valores de } j) \quad (3.1)$$

Este modelo é extremamente simplista, mas está relacionado a uma visão multicritério envolvendo um modelo aditivo linear de função utilidade (na agregação dos fatores). Nesse contexto, a função utilidade aditiva poderia ser aplicada ao problema de reserva técnica com algumas considerações de natureza conceitual e metodológica.

O modelo de localização baseado em análise dimensional (Davis *et al.*, 2001; Slack *et al.*, 1995; Moreira, 1993) abrange a situação em que os custos podem ser quantificados e coexistem com fatores qualitativos. Em síntese, o método define as seguintes etapas básicas:

- Estabelecer os valores mínimos para todos os custos onde isso for possível;
- Ponderar os fatores qualitativos segundo uma escala de valores relativos;
- A cada fator atribui-se um peso que indique a sua importância relativa para a decisão;
- Calcula-se, para cada localidade em relação à outra, um coeficiente de mérito CM.

Para k diferentes fatores, o coeficiente de mérito CM_{1,2} de localidade 1 em relação a 2 é:

$$CM_{1,2} = \left(\frac{F_{1,1}}{F_{2,1}} \right)^{P_1} \cdot \left(\frac{F_{1,2}}{F_{2,2}} \right)^{P_2} \cdot \dots \cdot \left(\frac{F_{1,k}}{F_{2,k}} \right)^{P_k} \quad (3.2)$$

Onde:

F_{ij} = valor do fator j na localidade i (no caso, representa custo).

P_j = peso relativo do fator j

Se CM_{1,2} for maior que 1, a localidade 2 é preferida.

O modelo de localização baseado no conceito de centro de gravidade (Davis *et al.*, 2001; Moreira, 1998 e Slack *et al.*, 1995) é utilizado para localizar uma nova instalação dentro de uma rede de instalações. Nessa abordagem, procura-se minimizar o custo de transporte, considerando a localização das instalações existentes, mercados já existentes e volume de bens e serviços movidos inseridos no custo de transporte.

A melhor localização é representada pelo que, em uma analogia física, seria o centro de gravidade ponderado de todos os pontos “de” e “para” onde os bens são transportados. Assim, as coordenadas do centro de gravidade da localização com menor custo para a instalação, x_g e y_g , podem ser obtidas pelas fórmulas:

$$x_g = \frac{\sum x_i V_i}{\sum V_i} \quad (3.3)$$

e

$$y_g = \frac{\sum y_i V_i}{\sum V_i} \quad (3.4)$$

Onde:

x_i = a coordenada x da fonte ou destino i ;

y_i = a coordenada y da fonte ou destino i ;

V_i = a quantidade a ser enviada de ou para a fonte ou destino i .

O modelo das p -medianas, formulado por Hakimi, em meados dos anos sessenta (Hakimi, 1964, 1965), criou a fundamentação para uma miríade de problemas de localização do setor público e do privado. O problema básico é encontrar as p localizações que minimizam a distância média (ou tempo de viagem) em uma rede. Apenas os nodos da rede são considerados como a localização dos candidatos, uma vez que há sempre, pelo menos uma solução ótima que consiste em localizar as instalações nos nodos na rede (Hakimi, 1965). O modelo p -mediana pressupõe que a demanda de serviço em cada nó e os tempos de viagem entre os nodos sejam deterministas.

Trabalhos mais recentes apresentam novos aspectos ou novas abordagens para tratamento da questão de localização. Vaithyanathana *et al.* (1996) utilizam redes neurais no problema de localização de plantas, destacando as vantagens computacionais para problemas de grande porte; O'Mara (1999) desenvolve um estudo analisando processo decisório sobre localização em quarenta empresas, com ênfase nos fatores utilizados para a tomada de decisão e Ogryczak (1999) apresenta um estudo envolvendo o tratamento de distâncias em questões de localização e utiliza método multicritério para encontrar a melhor solução.

Outro aspecto, que também vem sendo ressaltado em estudos recentes sobre localização de instalações, diz respeito aos *clusters*. Segundo Porter (1999), *clusters* são concentrações geográficas de empresas inter-relacionadas, fornecedores especializados, prestadores de serviços, empresas em setores correlatos e outras instituições específicas (tais como,

universidades, órgãos de normatização e associações comerciais), que competem, mas também cooperam entre si.

Além do artigo de Almeida *et al.* (2006), que serviu de base para os modelos apresentados nessa tese, não foi encontrado nenhum trabalho envolvendo diretamente estudo de localização de reserva técnica, o que indica que se trata de um problema muito específico. A grande maioria dos problemas de localização se apresenta no contexto de instalações; poucos abordam outra situação.

Nozick & Turnquist (2001) apresentam estudo para localização de centros de distribuição, no contexto de sistemas de logística que envolve fatores tais como: custos de transporte, de estoques, e atendimento ao cliente. Nesse caso, há uma leve aproximação com o problema objeto de estudo, onde os fatores estoque e movimentação de material são considerados. Luss (1999) desenvolve estudo focalizando a questão de localização de serviços, utilizando método de minimização lexicográfico.

3.2.1. Propostas de Classificação dos Modelos de Localização

Existem inúmeras possibilidades para a categorização dos modelos de localização, de acordo com os diferentes critérios que podem ser escolhidos para o estabelecimento desta taxonomia, quer seja pela aplicação da facilidade ou instalação envolvida; pelo tipo de modelo matemático empregado na formulação da modelagem do problema ou da função objetivo a ser otimizada; se diz respeito a cenários fixos ou variantes no tempo; ou se o tratamento é determinístico ou estocástico; também podem ser feitas distinções, de acordo com o sistema de produção no qual a facilidade está inserida; ou até em função da natureza da propriedade da instalação; e muitos outros critérios poderiam ser elencados sem que fossem exauridas todas as possibilidades. A seguir, são apresentadas algumas das classificações encontradas na literatura e a abordagem escolhida para este trabalho.

ReVelle *et al.* (1970) analisaram modelos de localização sob o enfoque da propriedade das facilidades a serem localizadas: propriedade pública ou propriedade privada. Esses modelos diferem tanto pela formulação de objetivos e restrições, como principalmente pela natureza da propriedade. No setor privado o interesse maior é a minimização de custos ou maximização de lucros para os proprietários. No setor público o objetivo é a maximização de um benefício ou a minimização de um custo (*apud Galvão et al.*, 1999).

Propostas para formulação de esquemas de classificação dos modelos de localização têm sido apresentadas desde 1979, quando Handler & Mirchandani (1979) sugeriram um

esquema, composto de 4 (quatro) posições, que é aplicável a modelos de localização em rede com funções objetivo do tipo centro. Na posição 1, são fornecidas informações sobre novas facilidades; a posição 2 contempla informação sobre as facilidades existentes; na posição 3, o número de novas facilidades é obtido e, por último, na posição 4, o tipo de rede é descrito.

Brandeau & Chiu (1989) apresentam um *survey* sobre mais de 50 (cinquenta) representativos problemas de localização que são classificados dentro de 4 (quatro) problemas típicos: desenho de rede, localização de armazéns, cobertura de hidrantes contra incêndio e localização de facilidades competitivas. Os autores propõem uma taxonomia para distinguir problemas de localização com relação a 3 (três) critérios: objetivos, variáveis de decisão e parâmetros de sistema. A representação das categorias é feita em formato de tabela, de acordo com os critérios mencionados.

Carrizosa *et al* (1995) propõem um esquema para classificação de modelos planares onde os comportamentos da demanda e do tempo de serviço são regidos por distribuições de probabilidades. A posição 1 fornece informação acerca da distribuição das facilidades existentes, enquanto a posição 2 contém informação sobre a distribuição de novas facilidades. Na posição 3, o número de novas facilidades é dado e, na posição 4, a forma da nova facilidade é descrita. A posição 5 descreve a forma das facilidades existentes e a posição 6 define a métrica usada no modelo para medir as distâncias.

Hamacher & Nickel (1998) apresentam um esquema de classificação para os modelos de localização que busca resolver os problemas que foram por eles atribuídos às propostas dos autores anteriores. Esses autores tecem críticas aos esquemas de classificação propostos pelos seus antecessores:

- Com respeito ao esquema proposto por Handler & Mirchandani (1979), afirmam que “embora bastante intuitivo, suas limitações são evidentes...”;
- O esquema proposto por Brandeau & Chiu (1989) é criticado por “não fornecer um sistema de classificação formal, além de ser restrito a modelos em rede com objetivos do tipo centro, e nenhuma consideração é feita sobre o comportamento da demanda”;
- Para o caso do esquema de classificação proposto por Carrizosa *et al.* (1995), também existem ressalvas sobre a “excessiva especificidade” como um fator restritivo.

O esquema de taxonomia para os modelos de localização defendido por Hamacher & Nickel (1998) apresenta 5 (cinco) posições para informações, conforme discriminado a seguir:

Posição 1. Informação sobre o número e tipo de facilidade;

Posição 2. Tipo de modelo de decisão com respeito ao espaço de decisão (esta informação deveria, no mínimo, distinguir os modelos de rede entre discretos e contínuos);

Posição 3. A descrição de particularidades do modelo de localização específico (tais como, informações sobre as soluções viáveis, restrições de capacidade etc.);

Posição 4. Relação entre as facilidades novas e as existentes (esta relação pode ser expressa pela função distância ou pelos custos associados);

Posição 5. Descrição da função objetivo

São utilizados códigos para identificar os atributos correspondentes em cada uma das posições, o que torna o esquema um tanto confuso para pessoas pouco familiarizadas com a técnica.

Owen & Daskin (1998) consideram que a complexidade dos problemas tem limitado a literatura de localização de facilidades a modelos deterministas e estáticos simplificados. Embora alguns poucos pesquisadores tenham iniciado estudos que incorporam os aspectos estocásticos e dinâmicos relacionados ao problema há muitos anos atrás, apenas nos anos mais recentes muitas das pesquisas dedicadas a essas questões tem sido publicadas. Os autores apresentam um *review*, no qual a literatura sobre o assunto é dividida, segundo o tipo de abordagem utilizada nos modelos, conforme a seguir:

- Problemas de localização com abordagem determinista e estática;
- Problemas de localização com abordagem dinâmica;
- Problemas de localização com abordagem estocástica.

Galvão *et al.* (1999) sugerem que os problemas de localização podem ser classificados em três classes principais: (i) localização no plano com espaço infinito de soluções, (ii) localização no plano com espaço finito de soluções e (iii) localização em redes. Segundo os autores, os modelos de localização da classe (i) têm o inconveniente de poderem propor a localização de facilidades em lugares geograficamente pouco acessíveis ou mesmo inviáveis, como por exemplo, no meio de um lago. Não obstante, este problema pode ser solucionado introduzindo restrições ao espaço de soluções. Os modelos de localização em redes não possuem este inconveniente, já que a rede de interesse é definida pelos usuários do modelo, podendo os vértices, por exemplo, representar cidades e os arcos, as estradas de ligação entre as cidades.

Ballou (2006) classifica os problemas encontrados na determinação da localização em 5 (cinco) categorias: força direcionadora, número de instalações, escolhas discretas, grau de agregação de dados e horizonte de tempo.

Lorena (2001) destaca os seguintes modelos encontrados na literatura específica na área de logística:

- modelos de competição: o ambiente, no qual o produto será distribuído nos locais a serem localizados, já conta com produtos similares, distribuídos por concorrentes. Nesse caso, deseja-se entrar no mercado capturando a maior quantidade possível de demanda, considerando as instalações dos concorrentes;
- modelos probabilísticos: o recurso localizado pode não estar disponível quando necessário, por exemplo, a ambulância localizada pode estar atendendo a um outro chamado quando está sendo necessária em mais de um local ao mesmo tempo. Nesse caso, considera-se a possibilidade da ocorrência desse tipo de evento, incluindo no modelo medidas de probabilidade. Também é possível considerar a existência de filas de atendimento etc.
- modelos que combinam localização e roteamento: empregados quando se deseja localizar e ao mesmo tempo sequenciar uma série de tarefas.
- modelos para materiais perigosos: desenvolvidos quando se pretende localizar, por exemplo, resíduos tóxicos. Nesse caso, deseja-se uma grande distância de aglomerados populacionais.

Current *et al.* (2002) afirmam que muitas vezes modelos de localização são extremamente difíceis de resolver, pelo menos no que se refere a uma solução ótima. Mesmo a maioria dos modelos básicos é computacionalmente intratável para problemas de grande porte. Segundo os autores, a complexidade computacional dos modelos de localização é uma das principais razões pelas quais o grande interesse na formulação e na implementação desses modelos não tenha ocorrido até o advento da computação digital de alta velocidade.

Argumentam, ainda, que os modelos de localização são de aplicação muito específica. Isto é, a sua forma estrutural (os objetivos, limitações e variáveis) é determinada para cada tipo de problema em estudo. Por conseguinte, não existe um modelo geral de localização que seja adequado a todas as aplicações potenciais ou existentes.

Esses autores apresentam um conjunto de 8 (oito) modelos de localização para instalação com base em problemas de: cobertura, máxima cobertura, p-centro, p-dispersão, p-mediana, custo fixo, *hub* e *maxisum*.

Em todos esses modelos, a rede subjacente é dada, assim como as localizações dos pontos de demanda para serem servidos pelos estabelecimentos e, se for pertinente, os locais das atuais instalações. O problema geral é o de localizar novas instalações para otimizar algum objetivo. A distância, ou qualquer outra medida relacionada funcionalmente com a distância direta ou indiretamente (por exemplo, tempo ou custo de viagem, satisfação da demanda), é fundamental para esses problemas. Por conseguinte, os modelos são classificados de acordo com a consideração da distância. Os quatro primeiros modelos são baseados em distância máxima e os quatro seguintes são baseados em distância total (ou média).

Smith *et al.* (2009) apresentam um vigoroso artigo no qual classificam os modelos, no âmbito dos três estágios de evolução da teoria da localização por eles considerados, como mostrado a seguir:

- 1º período - Contribuições Iniciais: Modelos seminais geométricos e geográficos;
- 2º período - Novos tempos: Modelos de cobertura, Modelos das medianas, Modelos de rede;
- 3º período - Novas aplicações: Modelos competitivos, Modelos estocásticos, Modelos de localização e rota, Modelos de fluxo interceptado, Modelos de emergência e Modelos de localização de Hub, entre outros.

Verifica-se que a maioria dos estudos envolve algum tipo de método de otimização discreta (a instalação só pode ser localizada em uma das posições geográficas disponíveis), ou no plano contínuo (problemas de otimização convexa envolvendo distâncias normalizadas), problemas de localização utilizando grafos, problemas de localização-alocação e estudos de casos. Contudo, as categorias citadas não são exclusivas.

São abundantes as abordagens envolvendo métodos heurísticos para a solução de problemas de otimização discreta envolvendo localização-alocação de instalações. Aparentemente, os problemas de otimização discreta representam melhor a situação real do que problemas de otimização contínua, mas, geralmente, não oferecem a melhor solução. Ademais, a natureza discreta do espaço de soluções de um problema de programação linear mista complica a questão da análise de sensibilidade (Geoffrion & Naus, 1977; Naus, 1979). Embora técnicas específicas de análise utilizadas em problemas de programação linear contínua também possam ser aplicadas a este tipo de problema (Giddings *et al.*, 2000).

O Problema de localização é fartamente descrito na literatura de pesquisa operacional propiciando a aplicação dos métodos científicos a situações reais encontradas nos sistemas de

produção de bens e serviços, de modo a prover ferramentas auxiliares para a tomada de decisão nos mais diversos setores e níveis da economia.

No contexto da natureza do sistema de produção em que predominam as operações da instalação em apreço, os modelos são classificados neste trabalho, de acordo com as metodologias e teorias empregadas na formulação de seus modelos subjacentes.

3.2.2. Localização de Instalações em Sistemas de Produção de Bens

Decisões sobre localização de instalações são elementos críticos no planejamento estratégico de empresas públicas e privadas. Altos custos associados à aquisição de propriedades e à construção da instalação caracterizam o problema como de investimento a longo prazo (Owen & Daskin, 1998).

É sabido que a localização de uma instalação tem importantes implicações estratégicas para as operações do sistema envolvido, porque uma decisão de localização normalmente implica num compromisso de longo prazo dos recursos e tem natureza irreversível. Especificamente, a localização escolhida para uma fábrica pode ter um impacto significativo sobre a posição competitiva e a estratégia da empresa em termos de custo operacional, performance na velocidade de entrega, e flexibilidade para competir no mercado. Por exemplo, selecionar um local de instalação para o sistema de produção que propicie à empresa estar próxima dos fornecedores tem se tornado uma vantagem estratégica fundamental no recente mercado, uma vez que a proximidade dos fornecedores é importante para sistemas de produção JIT (*Just-In-Time*) e sistemas de distribuição flexíveis, de modo a reduzir estoques e melhorar o desempenho na entrega. Por isso, a seleção final do local de uma instalação deve contribuir para o sucesso dos planos estratégicos das empresas nos segmentos financeiro, de marketing, de recursos humanos e nos objetivos da produção (Monte, 1990).

Figueiredo (2007) ressalta que a localização de uma determinada fábrica ou armazém determina qual será a distância a percorrer para se chegar ao cliente, e conseqüentemente quais serão os custos de transporte. Nos casos em que há milhares de clientes não é simples minimizar as distâncias dos armazéns a todos eles, e ao mesmo tempo, minimizar também a distância dos armazéns à fábrica.

O objetivo primordial na localização dessas instalações consiste na identificação da configuração de armazéns/fábricas que resulte no menor custo total relevante para a cadeia de suprimentos, sujeito a restrições de serviço ou qualquer outro fator considerado importante.

De maneira geral, as informações relevantes a um estudo de localização, não havendo a pretensão da exaustão, envolvem os seguintes tópicos:

- Localização de clientes, de varejistas, de armazéns existentes, de centros de distribuição, de fábricas e de fornecedores;
- Produtos movimentados com respectivos volumes/pesos e características especiais;
- Demanda anual por cada produto em cada localidade;
- Fretes por cada opção de transporte relevante;
- Custos de estocagem, incluindo mão-de-obra, gastos fixos com instalações e impostos;
- Tamanho e frequência dos carregamentos de uma instalação à outra;
- Custos de processamento de pedidos;
- Metas e exigências de serviço.

Por não se tratar do sistema de produção focalizado neste estudo, a abordagem de Ferreira (2007) é conveniente pela sua atualidade e capacidade de síntese. A classificação abrange uma extensa gama de modelos empregados para localização de armazéns e centros de distribuição e contempla as seguintes categorias:

3.2.2.1. Modelos Exatos

São amplamente empregados para a solução dos problemas mais comuns na seleção da localização ótima de um armazém ou um centro de distribuição de bens. Nessa categoria, formula-se uma função objetivo para a qual se deseja obter soluções ótimas de forma analítica ou recorrendo-se a um procedimento iterativo para a busca de soluções em um conjunto convexo; encontram destaque as seguintes abordagens:

- Múltiplos centros de gravidade

Calcula-se um centro de gravidade para cada grupo de pontos de demanda, realocam-se os pontos aos centros e recalculam-se estes, sendo o processo repetido até estabilizar.

- Abordagens matemáticas otimizantes

Nesta categoria, pode ser citada como principal exemplo, a Programação Linear Inteira Mista, incluída em várias aplicações comerciais.

Eventualmente o problema da localização surge com um tratamento de natureza qualitativa, cujo interesse precípua é o de conhecer melhor a sua dimensão e suas peculiaridades, ao invés de tentar solucioná-lo. Métodos com abordagem multicritério aparecem como uma alternativa, podendo ensejar um tratamento quantitativo, mediante uma

escala de valores que é baseada na estrutura de preferência racional do decisor. Esses métodos buscam essencialmente clarificar o processo de tomada de decisão.

Brown *et al.* (1996, *apud* Lopes, 2000), utilizando modelo de programação linear, determinam o número ótimo, bem como os locais para a indústria de tabaco na região da Virginia (EUA), baseando-se nos atuais mercados e nas produções vigentes. Os autores apresentam conclusões sobre quais mercados deveriam ser fechados e quais deveriam ser consolidados.

Thai & Grewal (2005) discutem o quadro conceitual para a localização de um centro de distribuição, num contexto em que as operações logísticas para os fluxos de carga, nos portos marítimos e aeroportos, deverão também ser integradas no processo de seleção. O estudo proporciona uma abordagem sistemática e combina perspectivas e aspectos tanto quantitativos como qualitativos. O modelo é desenvolvido em três etapas de um processo de seleção, a primeira envolve o princípio do centro de gravidade para a identificação da área geográfica, a segunda envolve a identificação de localizações alternativas e a terceira se concentra na seleção do local específico entre as alternativas identificadas para o centro de distribuição, baseada na abordagem quantitativa. Isto implica na adoção de um modelo matemático que visa otimizar a soma dos custos de distribuição ou a integração na distância total de transporte com os relevantes volumes de carga.

Pao & Chuang (2002) propõem uma abordagem de Desdobramento da Função Qualidade (QFD) para a construção de um modelo de localização de instalações do ponto de vista dos clientes, fornecedores e empregados da empresa. No estudo, os critérios de avaliação da localização são derivados dos requisitos de localização e uma matriz de relacionamento é estabelecida para mostrar o grau de relacionamento entre cada par (requisito e critério). O procedimento QFD fornece o grau de importância normalizado que é usado como peso para cada critério. O modelo é aplicado para a localização de um centro de distribuição em Taiwan.

3.2.2.2. Modelos Heurísticos

Os métodos exatos têm o grande problema de serem por vezes muitos pesados e extremamente vagarosos na resolução de um problema com elevado nível de complexidade. Foi no sentido de se aumentar a velocidade da resolução de certos problemas que se criaram os métodos heurísticos. Os métodos heurísticos apóiam-se em regras que, em geral, produzem boas soluções (equilíbrio entre os custos e o serviço ao cliente), recorrendo frequentemente ao uso guiado da Programação Linear (por exemplo, o problema de transporte). Não obstante, pela sua natureza, estes métodos de busca não garantem o ótimo. Além disso, os métodos

heurísticos são concebidos especificamente para uma determinada situação. Dificilmente se pode aplicar um desses algoritmos noutro problema.

O problema conhecido como SPLP (*Simple Plant Location Problem*), foi formulado por Kuehn & Hamburger (1963, *apud* Figueiredo 2007). Esse modelo utiliza uma heurística que tem como *inputs* a localização dos clientes e os diversos locais possíveis para a implantação da fábrica. Busca-se minimizar os custos de transporte entre a fábrica e os clientes e o custo de construção. Assim a construção de uma nova fábrica fica condicionada aos casos em que o transporte para um determinado conjunto de clientes seja tão caro, que se justifique construir uma fábrica junto desses clientes. Como restrições o modelo apresenta o fato de obrigar que todos os clientes sejam satisfeitos e que cada cliente recorra apenas a uma fábrica.

O algoritmo *local search* (busca local) é introduzido pelos autores como uma ferramenta para a localização de armazéns. A idéia desse algoritmo é partir de uma solução possível e depois ir avançando consecutivamente para a melhor solução vizinha, somando ou subtraindo um armazém, ou mudando a sua localização. Esse algoritmo foi testado e demonstrou ter uma boa performance em experiências empíricas.

Perl & Daskins (1985) apresentam um método de solução heurístico para o problema de localização e roteamento de armazéns baseado na decomposição do problema original em três subproblemas. O método proposto resolve os subproblemas em uma forma seqüencial, levando em conta a dependência entre eles. Os autores discutem uma aplicação do método proposto para uma empresa nacional de distribuição de grande porte.

Esses mesmos autores (1994, *apud* Figueiredo, 2007) discutem o problema de localização de armazéns propondo uma metodologia que integra uma resolução exata e uma heurística. Essa metodologia divide o problema em três partes e resolve-os utilizando um método exato e heurístico de uma maneira seqüencial.

Dupont (2006, *apud* Figueiredo, 2007) analisa a localização de armazéns admitindo que os custos do transporte e do armazenamento seguem uma função côncava que os relaciona com a quantidade transportada. Para isso, Dupont desenvolve uma heurística aproveitando algumas propriedades dos métodos exatos.

3.2.2.3. Modelos com Metaheurísticas

Permite modelar o problema de forma mais realista, mas condicionam a solução à aptidão do analista em conceber alternativas interessantes. Nesta categoria, os métodos tratados na literatura são muito exigentes em termos de dados e necessitam de software especializado. A qualidade dos resultados obtidos depende diretamente da capacidade de síntese

do decisor na seleção das alternativas a serem avaliadas. Uma característica importante nos modelos de simulação é sua capacidade de relacionar aspectos temporais de políticas de estoque com aspectos geográficos da localização.

Os métodos metaheurísticos são algoritmos que foram desenvolvidos para uso em diversos problemas, qualquer que seja a estrutura dos mesmos. A sua aplicação necessita apenas de uma adaptação do algoritmo ao problema. As metaheurísticas mais utilizadas nos problemas de localização são: *tabu search* (Tuzun & Burke, 1999), algoritmos genéticos (Dijin *et al.*, 1997), *simulated annealing* (Syam, 2002) e GRASP (Gomes & Silva, 1999).

No estudo de Kratica *et al.* (2001), o problema de localização de planta simples (SPLP) é considerado e um algoritmo genético é proposto para a sua resolução. O algoritmo desenvolvido possibilita resolver SPLP com mais de 1000 instalações e sites de clientes. Resultados computacionais são apresentados e o recurso é comparado com algoritmos baseados no dual. Segundo os autores, apesar de alguns casos especiais do SPLP serem solucionáveis em tempo polinomial, em geral, as soluções ótimas podem não ser obtidas em um tempo computacional razoável (problemas *NP-hard*). Algoritmos genéticos são utilizados para resolver alguns problemas desta natureza. Os autores fazem referências às pesquisas em que a combinação de algoritmos genéticos e de busca local é empregada na resolução de problemas dessa natureza.

Em geral, os problemas de localização de facilidades não capacitadas são modelados como problemas de programação inteira mista, que são conhecidos como problemas *NP-hard*. Nos últimos anos, algumas publicações sobre metaheurísticas para resolver problemas desse tipo (Chaudhry *et al.*, 2003; Correa *et al.*, 2004; García & Pérez, 2007) têm discutido as performances das implementações dessas metaheurísticas, em especial para os problemas de pequeno e médio porte. Os problemas de grande porte oferecem maiores dificuldades.

Michel & Van (2004) apresentam uma abordagem que utiliza o algoritmo *tabu search* para resolução do problema de localização do tipo não capacitado. O algoritmo aplica-se aos casos cujas abordagens de programação matemática proporcionam exaustivas operações, uma vez que incluem matrizes de tamanho 2000 x 2000. Apesar da sua simplicidade conceitual e de programação, o algoritmo encontra soluções ótimas para todos os parâmetros muito rapidamente. Também se comporta favoravelmente quando comparado com o estado-da-arte em algoritmos genéticos e se mostra um valioso complemento para o repertório de ferramentas para os problemas de localização de armazém tipo *uncapacitated* (ULP) por sua simplicidade e eficácia.

A abordagem apresentada por Yigit *et al.*(2006) trata esses problemas por meio da combinação de duas metaheurísticas conhecidas. A idéia é dispor de um algoritmo de busca, através do espaço de soluções, tirando partido de ambas as técnicas subjacentes, a fim de evitar os ótimos locais. O poder do *Simulated Annealing* (SA) na busca local e a eficácia da Abordagem Evolutiva na busca global foram reunidos para obter a qualidade desejada da solução dentro de um tempo mais curto.

3.2.3. Localização de Instalações em Sistemas de Produção de Serviços

Ao contrário das operações de manufatura, nas quais os custos de produção constituem a mais importante consideração na seleção de uma locação, os serviços devem focar primordialmente fatores relacionados ao cliente (Davis *et al.*, 2001).

O setor de serviços tem importância fundamental na economia mundial, envolvendo grande parte da mão de obra e do Produto Interno Bruto (PIB) de vários países. No Brasil, o setor de serviços vem mantendo a sua participação no PIB nacional acima de 50% e empregando mais de 80% da força de trabalho do país (Santos, 2006).

Definir a localização de instalações de serviço e varejo é uma decisão de longo prazo que tem grande influência na capacidade de serviço prestado pela organização (Corrêa, 2006).

Por se tratar do sistema de produção abordado neste estudo, os modelos de localização para instalações de serviço são apresentados em mais detalhe, conforme mostrado a seguir:

3.2.3.1. Modelos Para Localização de Serviços de Emergência

Na localização de serviços de emergência, busca-se em geral a minimização da maior distância (tempo) entre o usuário do serviço e o servidor mais próximo e/ou a maximização da população atendida pelo conjunto de servidores disponível.

Pelas suas características, este tipo de problema pode ser tratado por meio de modelos p-centro e modelos de localização de máxima cobertura com ou sem hierarquia entre os servidores, entre outros. A localização de reservas técnicas se enquadra nessa categoria.

Uma prodigiosa quantidade de pesquisas tem sido realizada no estudo de localização de veículos para serviços de emergência: Marianov & Reville (1995) destacam a faixa de modelos de otimização nessa área, determinísticos e estocásticos, assim como descritivos e modelos de filas; e Rosing & Hodson (1996) classificam 43 estudos de localização-alocação de serviços de emergência médica entre 1971 e 1991 na América do norte.

Serra & Marianov (1998) abordam um estudo de localização de unidades de emergência, por otimização discreta, no qual o modelo da p-mediana é reformulado para

resolver o problema de localização de novas estações de combate a incêndio em Barcelona, quando há incerteza na demanda, nos tempos de deslocamento ou na distância. Atendendo vários cenários possíveis, o planejador gostaria de escolher um conjunto de locais viáveis, considerando todos os cenários futuros.

Galvani (2003) apresenta um estudo no contexto do setor elétrico com o objetivo de propor uma metodologia para a otimização da distribuição dos recursos de manutenção com foco na mínima penalização por indisponibilidade do sistema de transmissão. O autor adota uma aplicação do método do vértice mediano em um estudo de caso na área de otimização discreta. Utilizando uma abordagem algorítmica da teoria dos grafos em um modelo de rede, busca a obtenção de localidades ótimas, como uma extensão do problema das p medianas.

3.2.3.2. Modelos de Localização-Alocação

Problemas de localização tratam de decisões sobre onde localizar facilidades, considerando clientes que devem ser servidos, de forma a otimizar um certo critério. O termo "facilidades" pode ser substituído por fábricas, depósitos, escolas, hospitais, postos de atendimento etc., enquanto que clientes se referem a depósitos, unidades de vendas, estudantes, pacientes, público etc. Em geral, os vários centros selecionados que podem ser localizados, podem também ser alocados ao subconjunto de centros que serão abertos. Dessa forma, também são conhecidos como problemas de localização-alocação, devido ao processo de alocação dos outros centros aos centros abertos.

Correia & Captivo (2003) apresentam um estudo para localização de instalações de serviços de saúde em Portugal, considerando um problema de localização e capacidade modular (MCLP) para o qual foram utilizados três modelos de programação linear mista, e desenvolvem um procedimento heurístico Lagrangeano baseado em cada modelo proposto. O modelo contempla as possibilidades de instalações com capacidades flexíveis e dos clientes serem parcialmente atendidos por mais de uma instalação.

Ainda nessa linha, Lashine *et al.* (2006) fazem uma tentativa de integrar decisões quanto à localização, alocação e rotas na concepção da cadeia de uma rede de abastecimento, mediante um modelo integrado para a localização do armazém, alocação dos varejistas para entrepostos, dimensionamento do número de veículos para atender à demanda e o apropriado encaminhamento do veículo, a fim de minimizar os custos totais de transporte, custos fixos e de exploração da instalação. Técnicas de otimização foram utilizadas para demonstrar o

modelo em problemas de tamanho pequeno a moderado e também para testar o desempenho das heurísticas desenvolvidas.

3.2.3.3. Modelos de Localização Hierárquicos

Segundo Pastor *et al.* (1998), a maior parte da pesquisa tem se concentrado na localização de instalações que são supostas iguais. No entanto, é amplamente aceito que muitos sistemas são hierárquicos por natureza, oferecendo vários níveis de serviço. Uma consideração importante na concepção de localização hierárquica de sistemas específicos é que os serviços oferecidos pelas instalações são escalonados, ou seja, uma instalação de serviços do tipo nível k oferece serviços do tipo k ; $k - 1$; ... e 1. Este trabalho adota esse conceito na formulação do modelo de localização para múltiplas reservas técnicas.

Pastor *et al.* (1998) propõem um modelo hierárquico de localização que faz uso de uma heurística que combina a geração de pontos, por meio de um processo de “ramificação dirigida”, cuja seleção final dos pontos utiliza a técnica FDH (*Free Disposable Hull*). Ainda comparam a nova heurística proposta com as duas mais relevantes heurísticas que foram propostas por Serra & ReVelle (1993, 1994).

Narula (1984) propõe um esquema de classificação que considera a hierarquia das facilidades e a disciplina dos fluxos nos arcos e nos vértices da rede. Narula define dois tipos de hierarquia entre facilidades: sucessivamente inclusiva e sucessivamente exclusiva. Em relação à primeira, uma facilidade oferece serviço a seu nível e todos os serviços oferecidos por facilidades de hierarquia inferior à sua; em relação à segunda, uma facilidade de um dado tipo oferece apenas serviços a seu nível (como por exemplo, em sistemas telefônicos e de distribuição de energia) (*apud Galvão et al.*, 1999).

Moore & ReVelle (1982) propõem um modelo hierárquico sucessivamente inclusivo de dois níveis, que é uma extensão do PLMC, e o aplicam à localização de facilidades para serviços de saúde em Honduras. Nesse modelo, as facilidades de hierarquia inferior (clínicas) oferecem apenas serviços de nível 1, enquanto as facilidades de hierarquia superior oferecem tanto serviços de nível 2 quanto serviços de nível 1 oferecido pelas clínicas. Os autores definem distâncias críticas diferentes para os serviços de nível 1 e 2; além disso, a distância crítica para o serviço de nível 1 foi definida com valores diferentes para clínicas e hospitais.

Modelos hierárquicos sucessivamente inclusivos foram também estudados por Calvo (1973) e Schultz (1970), entre outros.

Galvão *et al.* (1999) discorrem sobre os modelos de localização com aplicação em saúde pública e apresentam um modelo hierárquico de quatro níveis (localização de unidades

ambulatoriais, maternidades, centros de neonatologia e hospitais gerais), analisando o impacto que a adoção da metodologia teria em comparação com o sistema atual. Foi adotado um modelo de rede para a abordagem do problema das p-medianas, com vistas à localização das unidades de saúde.

Espelo & Galvão (2004), em seu artigo, consideram uma extensão de um problema hierárquico de localização de máxima cobertura, na qual as coberturas para os dois níveis de serviço oferecidos são maximizadas independentemente. O modelo matemático apresentado busca obter uma aproximação para a fronteira eficiente do problema bi-objetivo correspondente. O modelo bi-objetivo é resolvido através do método das ponderações, utilizando-se uma heurística lagrangeana. Os resultados mostram que as soluções geradas pela mesma fornecem uma aproximação da fronteira eficiente, incluindo soluções eficientes "suportadas" e "não-suportadas".

3.2.3.4. Modelos com Competição e Interceptação de Fluxo

Localização de facilidades concorrentes tem o seu início no trabalho de Hotelling (1929) envolvendo considerações sobre o comportamento do produtor e do consumidor. O campo de estudos de localização em ambiente competitivo permaneceu restrito aos economistas por muito tempo. Slater (1975) parece ter sido o primeiro a estudar a localização de facilidades concorrentes em uma rede. Haikimi (1983) introduz definitivamente modelos de competição no escopo da teoria da localização. A taxonomia e bibliografia nessa área é fornecida em Eiselt *et al.* (1993), Eiselt & Laporte (1996); a maioria dos resultados nesta área assume um espaço de localidades discreto ou uma rede. Modelos de localização competitiva no espaço contínuo são recentemente propostos por Dasci & Laporte (2005). (*apud* Smith *et al.*, 2009).

Em muitos problemas de localização assume-se que a demanda só possa ocorrer nos nós da rede. Uma interessante variação é apresentada nos problemas em que fluxos de veículos ou pedestres são os responsáveis pela demanda. Algumas aplicações práticas podem incluir caixas eletrônicos, postos de combustíveis, restaurante, lanchonetes etc. O principal propósito do deslocamento raramente é a obtenção do serviço. Contudo, mudanças de rotas podem ocorrer para o acesso a algum tipo de serviço. O objetivo dessa categoria de problema é capturar o máximo fluxo de potenciais clientes, ao invés de minimizar as distâncias de deslocamento. A concepção desses modelos não se aplica ao estudo contemplado nesta tese.

Berman *et al.* (1995) apresentam problemas de interceptação de fluxo com abordagem determinística tendo diferentes suposições sobre fluxo e capacidade. Modelos de fluxo

probabilísticos também são considerados, utilizando probabilidades para as origens dos fluxos e probabilidades de mudanças de movimentos. (Smith *et al.*, 2009).

Berman & Krass (1998) apresentam um modelo flexível para a localização das instalações para uma rede de transportes a varejo baseado numa combinação das características de interação espacial e modelos de interceptação de fluxo que incorpora elementos de concorrência e a captura por clientes, mediante um procedimento de heurística.

Drezner & Drezner (1998) também abordam a localização de instalações em um ambiente competitivo. No modelo é considerado que a melhor localização para uma instalação de uma nova empresa é aquela em que a quota de mercado capturado na sequência da entrada do novo concorrente é maximizada. O problema é formulado usando o modelo do centro de gravidade para a estimativa da quota de mercado. Três processos heurísticos de solução são propostos.

Boccia *et al.* (2009) fornecem uma vasta descrição de problemas, modelos matemáticos e heurísticas, apresentadas na literatura ou propostas pelos autores, para a interceptação de fluxo em um cenário determinístico. Além disso, uma extensa experimentação computacional das diferentes abordagens é fornecida para diversas topologias de rede, comparando os resultados em termos de qualidade das soluções e tempo de processamento.

Gendreau *et al.* (2000) apresentam uma visão diferenciada dos problemas de interceptação de fluxo definidos, fora do ambiente competitivo, com objetivos punitivos ou preventivos. Considerando o exemplo de localização de policiais em uma rede para interceptar motoristas bêbados, um objetivo punitivo se aplica, neste caso, quando se quer interceptar tantos motoristas alcoolizados quanto possível; Numa outra concepção, um objetivo preventivo consiste em interceptar o quanto antes os motoristas para, por meio de ações educativas, maximizar a redução de risco na rede. O autor mostra que o caso punitivo é um caso especial do preventivo.

3.2.3.5. Modelos Multicritério

Problemas de localização de facilidades de serviço, devido à própria natureza do produto, sugerem a incorporação de elementos subjetivos na formulação do modelo, tais elementos podem aparecer na forma de uma escala de preferências, por meio da qual são medidos os desempenhos das conseqüências de cada alternativa em relação a um conjunto de critérios ou atributos que devem ser suficientes para representar todos os objetivos envolvidos. Nesta tese, é adotada uma modelagem multicritério na concepção da estrutura metodológica que dá suporte a cada um dos modelos propostos.

Para Fernandes *et al.* (2007), tradicionalmente os métodos de otimização multicritério classificam-se em três categorias, de acordo com o processo utilizado para agregar/articular as preferências do decisor, com vista a selecionar uma solução de compromisso, a saber:

- Métodos em que não há agregação ou articulação de preferências (geradores de todas as soluções eficientes);
- Métodos em que é feita uma agregação *a priori* de preferências (de quem se destacam os que usam uma função utilidade);
- Métodos em que é feita uma articulação progressiva de preferências (iterativos).

Os autores apresentam uma proposta de sistema de apoio à decisão para análise de problemas de localização bicritério que se utiliza de um método iterativo orientado para a aprendizagem (melhorando o conhecimento sobre o problema).

Ashayeri & Rongen (1997) apresentam uma abordagem multicritério para a seleção do local de instalação de um centro de distribuição. No modelo, é proposto um ajuste num procedimento de heurística empregado na localização de armazéns para identificação das alternativas de localização e, em seguida, um refino nestas saídas por meio de um método de sobreclassificação da família ELECTRE. O modelo é utilizado para a localização de instalações de uma companhia de telecomunicações.

Jayaraman (1999) considera o contexto do problema de localização de máxima cobertura para tratar a localização de instalações de serviço em 30 (trinta) cidades do Estado de Nova York e Massachusetts, por meio de um modelo multiobjetivo de programação inteira mista (zero - um), no qual são estabelecidos três objetivos: custo fixo e custo variável da instalação e tempo (distância) de resposta que devem ser minimizados. Busca-se uma solução de compromisso, não dominada por nenhuma outra, que estabeleça um adequado *trade-off* entre os objetivos.

Zambon *et al.* (2005), apresentam um interessante artigo abordando o contexto do planejamento da expansão do setor elétrico, no qual o problema de localização de uma usina termoelétrica (UTE), a ser instalada, é tratado por meio da combinação da ferramenta sistema de informação geográfica (SIG) com métodos de decisão multicritério. O trabalho se propõe a avaliar as alternativas geradas em um ambiente SIG, e fazer o ordenamento destas alternativas para localização de UTEs, aplicando técnicas de análise multicritério. O método multicritério utilizado no modelo é o de comparação par a par, no contexto do processo de tomada de decisão AHP (*Analytic Hierarchy Process*). No tratamento dos critérios é observado que os mesmos são, em sua maioria, considerados conflitantes, como os de ordem econômica e

ambiental. Além disso, são fornecidos por diferentes setores e em geral, não são padronizados para efeito de comparação entre si. Os cenários de risco são avaliados por meio do método da média ponderada ordenada.

Campos & Almeida (2006) também apresentam um problema de localização, num cenário de forte impacto ambiental, que diz respeito à escolha da nova localização para a cidade de Nova Jaguaribara e para reassentamento de sua população, em virtude da inundação ocasionada pela construção da Barragem. Na definição do modelo multicritério foram evidenciados os principais atores do processo de decisão, os critérios de avaliação do problema, o tipo de problemática, e escolhido o método multicritério de decisão de agregação aditiva *VIP analysis* por ter se mostrado adequado, tendo em vista a existência de informações imprecisas. Deve ser observada a peculiaridade relacionada à natureza do processo de tomada decisão, pois nesse tipo de contexto é difícil atribuir pesos aos critérios de avaliação na escolha de localização.

Lopes & Almeida (2008) abordam o processo de tomada de decisão para a localização de unidades de serviço com um enfoque multicritério, bem como descrevem o problema em apreço segundo as diferentes visões encontradas na literatura. Conforme os autores, a maioria dos modelos empregados no problema de localização de empreendimento apresenta problemas metodológicos em seus procedimentos de análise e cálculo, fato que é mais evidenciado na estruturação de preferências do decisor e nas etapas de agregação multiobjetivo. O método SMARTER é utilizado para solucionar um problema hipotético.

Badri (1999) propõe o uso combinado das metodologias AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e programação multi-objetivo como suportes para a tomada de decisão em problemas de localização-alocação. A metodologia apresentada visa ajudar as autoridades do planejamento de instalações a formular estratégias de localização viáveis num ambiente de decisão global volátil e complexo. É apresentada uma demonstração da aplicação destas metodologias combinadas em um problema real.

3.2.3.6. Modelos de Teoria das Filas

Em alguns problemas de localização de facilidades, verifica-se o congestionamento da demanda a ser atendida pelos servidores e a conseqüente formação de filas de espera. Para esse tipo de problema, os modelos baseados na teoria das filas são empregados na obtenção das localidades recomendadas para as facilidades, considerando o número de servidores por facilidade e os tempos de atendimento dos servidores e de deslocamento dos clientes, como

principais fatores do problema. Neste estudo, não se verificam as premissas desses modelos, uma vez que o sistema abordado não apresenta congestionamento de demanda.

Mandell (1998) apresenta um estudo que abrange um tipo de modelo no qual são considerados sistemas com dois níveis de atendimento. O modelo, que maximiza o número esperado de chamadas para serviços que são adequadamente atendidos, leva em conta a disponibilidade de servidores através de um modelo de filas bidimensional.

O modelo hipercubo de Larson (1974) possibilita a utilização da teoria das filas em modelos de localização probabilísticos. O modelo hipercubo é um modelo descritivo, que permite o cálculo de medidas de desempenho que caracterizam um dado sistema com base em filas espacialmente distribuídas. Aplicado de forma isolada não assegura a solução direta de problemas de localização, sendo no máximo uma ferramenta que pode ser aplicada ao estudo de diversos cenários. Este modelo tem sido, no entanto, embutido por alguns autores em métodos heurísticos desenvolvidos para resolver problemas de localização probabilísticos. (*apud* Chiyoshi *et al.*, 2000).

3.2.3.7. Modelos com Incerteza

Modelos estocásticos são empregados em problemas de localização quando surgem situações em que os dados são conhecidos apenas em uma forma probabilística. Os modelos estocásticos aplicados no contexto de facilidades de serviço podem ser classificados em duas grandes famílias de acordo com a natureza dos servidores: fixos e móveis (Smith *et al.*, 2009). Neste trabalho, a incerteza é inserida sobre a demanda e os servidores ou reservas técnicas são móveis, ainda que apresentem uma baixa mobilidade para o caso em estudo.

Segundo Chiyoshi *et al.* (2000), problemas de localização probabilísticos se ocupam, de uma maneira geral, da natureza estocástica de sistemas do mundo real. Nesses sistemas um dado número de parâmetros, tais como, por exemplo, tempos de viagem, custos de construção, localização de clientes, quantidades demandadas e disponibilidade de servidores, são variáveis aleatórias. O objetivo é localizar facilidades/servidores que otimizem a medida de utilidade escolhida de forma robusta, para uma gama de valores dos parâmetros considerados. Os problemas estocásticos consideram explicitamente as distribuições probabilísticas das variáveis aleatórias modeladas. Uma revisão bibliográfica detalhada de problemas de localização probabilísticos é apresentada por Owen & Daskin (1998).

Drezner & Guize (1999) abordam o problema de localização sob condições de incerteza acerca os dados considerados no horizonte do tempo. Existem vários cenários possíveis no futuro que afetam diretamente os parâmetros utilizados no modelo de localização industrial de

Weber. Além disso, não se tem informações sobre como esses cenários irão acontecer. Os autores propõem um modelo para prover a localização que melhor atenderá aos possíveis cenários. São examinadas quatro regras utilizadas na teoria da decisão: A regra do valor esperado, a regra otimista, a regra pessimista e a regra do arrependimento minimáx. A solução para a distância euclidiana é obtida explicitamente. Algoritmos são sugeridos para métricas de distâncias convexas gerais. Considera-se uma aplicação do modelo, na qual se deseja determinar a melhor localização de uma facilidade para atender a 28 (vinte oito) cidades em Orange County, California, num horizonte de tempo de 10 (dez) anos. Admitem-se três cenários possíveis para representar a variação das demandas no tempo, em função da migração da população entre as regiões da Califórnia nesse período.

Snyder & Daskins (2005) abordam a questão da confiabilidade das facilidades como um fator normalmente negligenciado na problemática da localização. Os autores relacionam a dependência da confiabilidade de uma facilidade com dois fatores: a proximidade de outras facilidades, que atuam como *back-up* e a demanda a ser atendida pela facilidade. Essa abordagem é relativamente nova na literatura de logística e difere das abordagens tradicionais de otimização sob condições de incerteza, em que o objetivo é escolher a solução que resulta melhor sob condições de futuro incerto (demandas ou custos aleatórios). O modelo busca soluções que apresentem um desempenho satisfatório quando partes do sistema falham. Na visão dos autores, está se tentando preservar o sistema contra a incerteza na solução em si. Outra maneira de ver esse modelo é que, ao contrário dos modelos de localização estocásticos que visam a robustez do lado da demanda (robustez para mudanças na demanda ou custos), o modelo proposto busca robustez pelo lado da oferta (robustez nas alterações na rede de alimentação propriamente dita). Os autores formulam um modelo de confiabilidade baseado no problema das *p*-medianas, resolvem este modelo utilizando relaxação Lagrangeana e mostram como gerar curva de *trade-off* entre o custo de operação e o custo esperado da falha, usando o método de ponderação de programação multiobjetivo. Em seguida, o modelo é estendido para confiabilidade na versão do UFLP, e apresentam os resultados computacionais.

Khor *et al.* (2003) apresentam um método probabilístico concebido para ajudar o planejamento do sistema elétrico na seleção de locais para as subestações de distribuição, tendo em conta as alterações de carga horária ou o ciclo diário de carga. Não obstante, os centros de carga horários para cada um dos cenários de carga horária, são calculados deterministicamente. Estes pontos de localização, que são ponderados de acordo com a correspondente magnitude de carga, são utilizados para calcular o melhor ajuste da

distribuição de probabilidade. Esta distribuição é utilizada para calcular o perímetro de máxima verossimilhança da área onde a subestação deve preferencialmente ser localizada, tendo em conta, por exemplo, a disponibilidade e o custo dos lotes de terreno e outros obstáculos que possam estar presentes na seleção final do local para a instalação. Os resultados são apresentados e discutidos para um caso real em que foi aplicada a metodologia, assumindo três diferentes distribuições de probabilidade bivariadas: a distribuição gaussiana, uma versão bivariada da distribuição exponencial de Freund e a distribuição de probabilidade de Weibull.

O modelo hipercubo é revisitado por Chiyoshi *et al.* (2000), tendo em vista sua utilização em métodos de solução para problemas de localização probabilísticos. Esse uso do modelo é de bastante relevância em situações em que a aleatoriedade na disponibilidade dos servidores é um fator importante a ser considerado; em algumas circunstâncias, essa aleatoriedade só pode ser representada pela modelagem de filas espacialmente distribuídas. O modelo é apresentado com o auxílio de um exemplo ilustrativo, para o qual são derivadas as equações de equilíbrio; medidas de desempenho do modelo são também definidas. Em seguida, faz-se a descrição de um método exato e de outro aproximado para o cálculo dessas medidas. Diversos modelos de localização probabilísticos são então estudados, o que é seguido pela análise de métodos de solução disponíveis para esses modelos, com ênfase especial nos métodos que incluem o uso do modelo hipercubo.

Snyder (2006) apresenta uma importante revisão da literatura referente aos modelos de localização de facilidades com enfoque estocástico, na qual são contempladas uma variedade de abordagens para otimização sob condição de incerteza.

3.2.3.8. Modelos de Localização e Rota com Descarga (ou transbordo)

Existem situações em que o problema de localização aparece vinculado ao do roteamento de veículos para o transporte de algum tipo de material ou recurso, sua descarga e o retorno ao ponto de origem, onde deve ser situada a facilidade. Nesses casos, o problema de localização é dito conjugado ao problema do transbordo (transporte e alocação). No estudo objeto deste trabalho não foi considerada a questão do roteamento, posto que os percursos e distâncias são prefixados.

Drezner & Welosowsky (2001) formulam um modelo para tratar problemas em que uma facilidade de serviço deve ser localizada, de modo a minimizar o custo de transporte envolvido no deslocamento entre a facilidade, o ponto de demanda onde seria coletado algum

tipo de material, o ponto de descarga do material e o retorno final à facilidade. Este tipo de problema se assemelha ao problema do caixeiro viajante com a necessidade de alocação de um depósito de descarga mais próximo do percurso de retorno. No estudo, as propriedades da solução são formuladas e provadas. Não obstante, são apresentados apenas resultados de problemas simulados computacionalmente.

Wang *et al* (2004) descrevem um modelo de localização que é aplicado para gerenciar os recursos necessários a restauração de um sistema de energia elétrica, após uma interrupção. O problema é estudado em dois níveis: primeiro, o problema geral de localizar depósitos e, simultaneamente, determinar a quantidade de recursos a ser enviada do depósito para cada ponto de demanda, de modo a minimizar o custo total do transporte. O segundo problema consiste em adicionar novos depósitos para uma área onde já existem depósitos. Esta decisão envolve um *trade-off* entre a necessidade ou não de novos depósitos. Os modelos matemáticos para ambos os casos são desenvolvidos numa base incremental, à medida que os problemas tornam-se mais complexos e novos cenários são visualizados. Neste estudo, os depósitos representam as bases onde os recursos para restauração do sistema são guardados. Os autores preconizam que uma estratégia de solução ótima seja apresentada, de acordo com cada problema. Para problemas de grande porte, é sugerido o uso de um método heurístico para ajudar analistas/planejadores a obterem uma solução ótima aproximada. No estudo apresentado, uma heurística de duas fases é desenvolvida para a localização de depósitos e os resultados computacionais são discutidos para as soluções: ótima e aproximada.

3.2.3.9. Modelos de Otimização com Novos Algoritmos e Heurísticas

Uma alternativa aos modelos de localização que permite avaliar problemas com formulação menos rígida, tem sido os modelos com heurísticas. Não adotado neste estudo.

Nessa variação dos modelos de localização, a escolha da função objetivo a ser otimizada geralmente está relacionada com os seguintes fatores: distância mínima, distância mínima e máxima, distribuição equitativa, limitação da distância e limitação da capacidade. Um dos métodos mais eficientes para solucionar esse tipo de problema é o algoritmo heurístico alternado desenvolvido por Cooper (1963; 1967 *apud* Yeh & Chow, 1996; Santos, 2005). Ele alterna suas funções para alocar pessoas em centros e para localizar centros no meio dos seus raios de abrangência até que o sistema convirja (Yeh & Chow, 1996 *apud* Santos, 2005).

Andersson *et al.* (1998) apresentam procedimentos de agregação do ponto de demanda para os modelos de localização p-mediana e p-centro em uma rede de grande porte. Inicialmente, é obtida uma estrutura de agregação grosseira a partir da separação dos pontos

de demanda, por meio de uma grade sobreposta à região de demanda. O algoritmo de agregação "linha-coluna" é utilizado para determinar o espaçamento das linhas e colunas da grade, a fim de explorar a estrutura do problema. Um segundo passo envolve a localização de pontos de demanda agregada sobre as sub-redes, induzida pelas células da rede de particionamento. O conjunto de pontos de demanda agregada assim obtidos define, então, um modelo de aproximação local; alternativamente, pode-se iniciar um procedimento iterativo de localização-alocação em rede para encontrar os pontos da demanda agregada. Os procedimentos são testados em conjuntos de dados com base em mapas do TIGER / Linha base de dados do Censo dos Estados Unidos, e relatórios sobre a experimentação computacional.

Berman *et al.* (2009) apresentam um problema de máxima cobertura em uma rede quando alguns dos pesos podem ser negativos. Formulações de programação linear inteira são propostas e testadas com ILOG CPLEX. Algoritmos heurísticos, um algoritmo de avanço e procedimento de simulação são propostos e testados. A abordagem por meio do procedimento simulado provê os melhores resultados para um conjunto de dados compreendendo 40 (quarenta) problemas.

(Tong & Murray, 2007) abordam o problema de localização de máxima cobertura com um foco particular na representação da cobertura de demanda. Os autores afirmam que as abordagens de modelos existentes apresentam limitações para examinar a cobertura do espaço, existem discrepâncias entre o que é modelado e a cobertura geográfica real. A fim de refletir com precisão o mecanismo de máxima cobertura para os objetos espaciais (pontos, linhas ou polígonos), introduzem um novo modelo calculado explicitamente para serviços conjuntos fornecidos por multifacilidades. O novo modelo pode ser visto como uma extensão das abordagens existentes e também como uma generalização. Uma aplicação do modelo para localização de sirenes de alarme é exibida para demonstrar os méritos dessa nova abordagem.

Correa *et al.* (2009) apresentam um procedimento para solução de um modelo probabilístico para a localização-alocação de máxima cobertura com restrições de tempo de espera ou comprimento de fila para sistemas congestionados, considerando um servidor por centro, usando uma heurística híbrida conhecida como *Clustering Search* (CS), que consiste em detectar áreas promissoras baseada em clusters. Os testes computacionais apresentados fornecem resultados para redes com até 818 (oitocentos e dezoito) vértices.

3.3. Localização de Transformadores Reservas

A localização de transformadores reservas é um problema muito específico sendo raramente encontrado na literatura no contexto do setor elétrico. Não obstante, o problema pode ser interpretado como uma combinação de dois outros problemas de localização: a localização de facilidades de *backup* e a localização de facilidades para serviços de emergência com incerteza sobre a demanda, no caso em que se assumem os transformadores em operação como os clientes do sistema, devendo-se ainda levar em conta a mobilidade do transformador reserva (facilidade) até o ponto de demanda (transformador avariado).

Ademais, dependendo da configuração do sistema elétrico, com relação às potências dos transformadores envolvidos: reservas e operantes (sujeitos a avarias), a estrutura do problema de localização dos transformadores reservas pode propiciar a adoção do modelo de localização hierárquico sucessivamente inclusivo, uma vez que algumas reservas de menor potência apresentam hierarquia inferior e podem oferecer apenas um nível de serviço limitado, enquanto outras reservas de maior potência, com hierarquia superior, oferecerem um nível de serviço que permite atender a uma quantidade maior de pontos de demanda, inclusive aos pontos das reservas de hierarquia inferior.

No estudo de Kogan *et al.* (1996) é destacada a importância de se manter um número adequado de reserva técnica de transformadores em subestações de distribuição de energia, para a eventual substituição dos transformadores que venham a falhar. O trabalho enfatiza que a reserva técnica pode minimizar a duração do problema na interrupção do fornecimento de energia, interrupção esta que pode ser inaceitável para os clientes com maiores níveis de exigência para este serviço. Neste sentido, o autor destaca também a importância dos dados sobre falhas dos equipamentos para estabelecer o comportamento probabilístico da demanda que é representada pelas falhas dos transformadores.

O artigo descreve o processo que geralmente ocorre após a falha em um transformador, para onde a equipe de manutenção desloca um transformador móvel e efetua uma substituição temporária, até que o equipamento em pane venha a ser reparado. Saliencia que uma substituição, na falta de uma reserva técnica poderia demorar até 18 meses, envolvendo o processo de aquisição. Direcionado ao contexto de dimensionamento de reserva técnica, a ênfase do trabalho se concentra sobre o problema de previsão de futuras falhas, adotando o modelo de processo homogêneo de Poisson.

O estudo de Li (1999) apresenta uma abordagem probabilística para determinar o número de transformadores compartilhados por um grupo de subestações. Toma por base a

idade dos equipamentos, a função confiabilidade e o modelo probabilístico de custo de danos. O estudo menciona a prática de utilização de reserva técnica em paralelo com um transformador em operação, destacando os custos elevados com esta prática. Assim, o estudo se preocupa com o dimensionamento de reserva para um grupo de subestações com o propósito de reduzir custos, mantendo o nível requerido de confiabilidade. O estudo destaca dois tipos de falhas em transformadores: reparáveis e não-reparáveis, observando que a reserva tem um papel muito mais relevante no caso de falha não-reparável, devido ao tempo de restabelecimento mais longo. A modelagem probabilística de falhas é efetuada através da distribuição normal. Embora esta hipótese não seja usualmente adotada em estudos de confiabilidade, conforme se observa na literatura desta área (O'Connor, 1989; Kapur & Lamberson, 1977; Barlow & Proschan, 1967; Almeida & Souza, 2001), pode ser visto como uma aproximação razoável. O modelo de custo de danos proposto pode ser aplicado a outros estudos envolvendo a questão de modelagem de falhas em transformadores de subestações.

O trabalho desenvolvido por Leung & Khator (1995) trata da questão de aquisição e relocação de transformadores de subestação em sistemas de potência. O estudo é desenvolvido para um contexto específico da *Florida Power and Light* (FPL) dentro do processo geral de planejamento de transformadores. Este processo envolve três decisões: planejamento de capacidade, aquisição de transformadores e programação de execução do plano. Destaca que o objeto do estudo se concentra na segunda atividade que inclui o estudo de re-locação. O modelo adotado para resolver o problema é baseado em programação linear mista 1-0. Para atender ao planejamento geral de aquisição de transformadores no sistema, além da aquisição propriamente dita, tendo em vista os prazos para expansão do sistema, o processo de planejamento recorre ao recurso de reserva técnica. Aparentemente, esta proposta não deve ser facilmente aceita pela área de manutenção, uma vez que a disponibilidade do sistema em operação pode ser afetada, ou mesmo ficar fora de controle. Talvez esse aspecto explique o fato registrado no artigo de que não foi encontrado na literatura o estudo combinado de aquisição e relocação de transformadores. A literatura citada no artigo está relacionada à área de projeto de sistemas de distribuição de energia. Observa-se também que o modelo não registra incorporação de tratamento relevante para a modelagem da confiabilidade do sistema em operação.

O artigo de Costa & Silva (2009) apresenta uma metodologia probabilística baseada na teoria dos processos estocásticos para o dimensionamento ótimo de transformadores reservas destinados às subestações de distribuição de energia elétrica. A idéia básica consiste em três

fases: (i) representação de uma cadeia de Markov para avaliar a confiabilidade de um sistema de transformadores provido de um estoque de reservas; (ii) avaliação dos custos de investimento e operação do sistema para diversas possibilidades de composição do estoque e (iii) identificação do estoque ótimo, i.e. que resulte na menor soma entre os custos de investimento e operação do sistema. A metodologia proposta pelos autores visa estimar indicadores de desempenho do sistema como probabilidades de funcionamento e falha, frequência e duração média das falhas, bem como valores médios de potência e energia não supridas. Com base nesses indicadores de confiabilidade e parâmetros econômicos, são estimados os custos de interrupção de consumidores e os prejuízos decorrentes do não faturamento de energia em casos de falhas de equipamentos que não possam ser cobertas pelo estoque de reservas. A metodologia, implementada em um programa computacional em linguagem Matlab, é aplicada a um sistema teste e os resultados obtidos são discutidos. Realizam-se também algumas análises de sensibilidade, visando identificar o comportamento dos resultados frente a situações previamente estabelecidas. Entretanto, não é tratada a questão de como deve ser feita a alocação das reservas entre as subestações demandantes.

3.4. Conclusão

Diante do exposto nesta pesquisa bibliográfica, observa-se a existência de uma lacuna referente a estudos sobre modelos de alocação de reservas técnicas para equipamentos de baixa mobilidade em sistemas de produção de serviço. Nesse sentido, o presente trabalho busca suprir essa carência, apresentando uma série de modelos de suporte à decisão na localização das reservas técnicas de transformadores em subestações para uma concessionária do serviço de distribuição de energia elétrica. Uma metodologia multicritério fundamentada na Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) é empregada no tratamento do problema em apreço. Partindo do modelo de Almeida *et al.*, (2006), os modelos diferem entre si pela progressiva inserção de elementos que conferem mais precisão na representação do sistema. Esses elementos contemplam desde a incerteza sobre a incidência de falhas nas instalações, a diversidade das instalações e das reservas técnicas disponíveis, até limites críticos associados ao tempo de atendimento por ocasião das ocorrências. A logística subjacente à alocação das reservas visa fornecer o suporte necessário para assegurar um nível de mantabilidade global compatível com a natureza do sistema de produção considerado. Por conseguinte, tem-se como premissa atender a aspectos relevantes no que concerne à continuidade do serviço de energia para os principais envolvidos: a concessionária e o cliente ou a sociedade em geral.

4. MODELOS PROPOSTOS PARA RESERVA ÚNICA

Neste capítulo são apresentados modelos de localização para um equipamento reserva em um sistema de produção com enfoque na área de serviços, sob uma perspectiva multicritério. Consideram-se como melhores localidades aquelas que conduzem à maximização da função utilidade total, a qual agrega atributos importantes para a organização em particular e para a comunidade em geral. Destarte, busca-se uma solução de compromisso, interpretada como a melhor alternativa de localização do equipamento reserva, em um conjunto de instalações que viabilize os benefícios para todas as instalações, mediante um enfoque de utilidade aditiva.

Decidir quanto à localização de uma reserva técnica não é uma tarefa trivial, uma vez que devem ser envolvidos fatores comumente negligenciados em uma abordagem pouco minuciosa, por serem considerados irrelevantes ou de pouca influência para a tomada de decisão. Não obstante, um estudo mais cuidadoso pode mostrar que estes fatores são de extrema importância e imprescindíveis para assegurar a escolha mais adequada em um processo de localização. Diante do exposto, um procedimento adequado para esse tipo de problema deve contemplar critérios muito bem definidos e consolidados, bem como envolver estudos acurados acerca das alternativas mais apropriadas para abrigar o equipamento reserva.

Nesse contexto, o presente trabalho oferece uma contribuição, sob uma perspectiva multicritério, capaz de inserir atributos importantes para a escolha apropriada do local onde deve ser alocada uma reserva técnica. Esses atributos estão diretamente relacionados ao cliente final que é atendido pelo equipamento demandante da reserva técnica e à configuração espacial da rede que contempla todas as instalações envolvidas. Além disso, é inserida a incerteza sobre a demanda pela unidade reserva para cada uma das instalações.

O primeiro modelo, proposto por Almeida *et al.* (2006), aborda a problemática de escolha sem incorporar a incerteza sobre a demanda pela reserva única, uma vez que se assume a hipótese de que os equipamentos demandantes encontram-se no período de vida útil com taxas de falha praticamente iguais para todos. Esse modelo possui as características de um modelo p-centro para localização de serviços emergenciais que, no contexto do problema específico, se referem aos transformadores reservas em subestações de uma concessionária de serviço de energia elétrica, atendendo aos objetivos de custo e disponibilidade do serviço.

No modelo, esses objetivos são tratados de uma forma indireta, por meio de critérios que denotam as diferentes componentes da demanda, com o caráter de força locacional. Esses

critérios são ponderados por um critério de distância, expressa na métrica euclidiana, e agregados em uma função utilidade multiatributo, resultando no modelo de utilidade multiatributo para localização de reserva técnica de transformador.

4.1. Modelo de Utilidade Multiatributo para Localização de Reserva Técnica de Transformador

4.1.1. Visão geral do problema

Este modelo é originário de estudos desenvolvidos pelo Grupo de Estudos em Sistemas de Informação e Decisão (GPSID), por ocasião do programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Companhia Energética de Pernambuco – CELPE em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, finalizado em 2003.

Neste estudo em particular, um equipamento reserva é acionado por ocasião da falha de outro similar que estava em funcionamento e conectado a um sistema elétrico de potência. Existem algumas alternativas de instalações possíveis para a alocação desse equipamento reserva que deve suprir todas as localidades demandantes.

Quanto ao equipamento reserva, existem duas observações a considerar:

- 1- O equipamento reserva é compatível com o equipamento avariado;
- 2- O equipamento reserva está disponível para operar sempre que solicitado.

O termo alocação é, por vezes, empregado no contexto deste problema, uma vez que a reserva técnica é tratada como um recurso a ser alocado para atendimento a uma demanda não prevista que pode se manifestar no local onde se encontra a reserva ou em qualquer outra instalação do sistema elétrico, que doravante passa a ser denominada de subestação ou, simplesmente, SE.

Portanto, na localização da reserva técnica observa-se um contexto no qual o mercado é representado pela demanda por transformadores reservas, que ocorre em virtude das eventuais falhas nos equipamentos em operação; os insumos estão relacionados aos meios e condições necessários para se deslocar (remover e/ou transportar) a reserva técnica desde a subestação (SE) sede para a subestação (SE) onde há demanda.

Deve-se ressaltar que por remover deve ser entendida a operação mais simples que consiste em deslocar, quando necessário, a reserva técnica no interior da SE demandante, que coincide com a SE sede, e posicioná-lo numa base para substituir o equipamento em pane (em algumas situações, o equipamento em pane precisa ser removido de sua base).

Transportar é uma operação bem mais complexa, pois significa deslocar a reserva técnica da SE sede para a SE onde se deu o sinistro. Antes que seja efetuado o transporte, o trafo reserva deve ser parcialmente desmontado na SE de origem. Após a sua chegada na SE destino, o equipamento é remontado, testado e removido para a base, como no caso anterior.

Para fins práticos, o tempo de remoção foi desconsiderado do modelo, uma vez que predominam os tempos despendidos com as diversas etapas já discutidas para a operação de transporte; alternativamente, a remoção pode ser incorporada como mais uma etapa da operação de transporte e seu tempo de execução (quando necessário) ser contemplado no tempo total de transporte.

O transformador de potência é um dos componentes mais importantes e caros do sistema de potência. A sua falha repentina pode causar uma longa interrupção no fornecimento de energia elétrica, com a conseqüente perda de confiabilidade e geração de custos para os clientes (Assunção, 2007).

Considerando a questão da demanda, o estudo abordou a modelagem de falhas no equipamento, a ser representada pela taxa de falhas. Porém, a taxa de falhas do transformador é apresentada em nível muito baixo, cerca de 2,5% ao ano para transformadores com tensão máxima de operação menor ou igual a 550kV, incluindo as falhas em acessórios, para as quais não se faz necessária a substituição do equipamento (CIGRÉ, 1983). Como uma aproximação razoável, foi assumida uma taxa de falhas igual para todos os transformadores do sistema.

Embora possa ser admitido que haja variações na incidência de falhas por motivos externos ao equipamento, ainda assim a baixa freqüência dessas ocorrências não compromete a hipótese da aproximação de taxas de falhas iguais para todos os transformadores em operação. Ademais, considera-se igual o número de transformadores em todas as SE's.

Em decorrência dessa suposição, a característica de confiabilidade correlata não foi considerada relevante no modelo de localização, tendo em vista que o maior interesse está na recomposição do sistema no menor tempo possível (mantenabilidade); ou seja, o que importa é o tempo de restabelecimento do sistema e as conseqüências da interrupção após a falha, que dependem de vários fatores e não das freqüências desses eventos. Em última análise, o que se está tentando mostrar é que, para a suposição considerada, não interessa quantas falhas irão ocorrer e sim o quão próximo vai estar localizada a reserva técnica. A freqüência de falhas é importante para definir a quantidade de reservas técnicas a serem mantidas. Nesse sentido, algumas contribuições foram encontradas na literatura (Ferreira, 2001; Melo, 1998; Kogan *et al.*, 1996, por exemplo).

O estudo considera uma situação, como ilustrada na figura 4.1, em que se tem uma reserva técnica de transformador, cuja localização se deve decidir entre aquelas subestações onde se encontram transformadores de tipo compatível. Assim, se houver falha na subestação agraciada, a reserva estará disponível e, no máximo, precisará ser removida. Caso a falha ocorra em outra subestação, a reserva será transportada para outra localidade, onde se encontra a subestação que contem o transformador em pane.

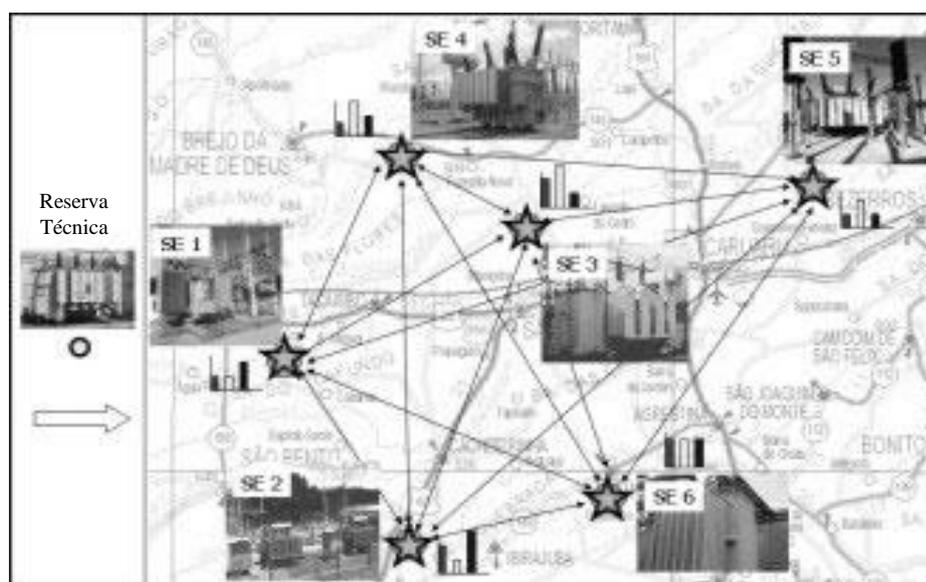


Figura 4.1 - Localização de reserva para 6 SE's (Adaptado de Ferreira et al, 2005.)

Na sua concepção, basicamente, o problema assume a mesma estrutura metodológica do problema do p -centro que é apropriado para localização de unidades de serviços emergenciais. No modelo proposto, devem ser atendidas as seguintes condições, fazendo-se a analogia com o problema do p -centro:

1. Um conjunto de transformadores de reserva técnica a serem alocados em algumas localidades disponíveis, nas quais existem subestações dotadas de transformadores similares (p pontos de facilidades devem ser alocados em p vértices de uma rede constituída de m posições possíveis);
2. A demanda pelos equipamentos reservas se deve às falhas nos equipamentos em operação e está distribuída nas diversas subestações para as quais o tipo de reserva é compatível (a demanda pelas facilidades está distribuída por todos os m vértices existentes na rede);
3. A esta demanda deve ser atribuída uma ponderação que corresponde à natureza da carga na localidade atendida por cada subestação, mediante a composição de fatores

que dizem respeito aos interesses da comunidade local (a demanda da rede é ponderada para cada vértice pelos pesos w_i , onde $i = 1, 2, \dots, m$).

O modelo busca uma solução de compromisso conjuntural, de modo que, uma solução é considerada eficiente quando propicia benefícios para todas as localidades e não apenas para aquelas contempladas. No caso específico desta problemática de escolha, toma-se $p=1$ e, para o modelo proposto, considera-se um número igual de transformadores operando por SE.

Na modelagem do problema de localização de reserva técnica, é considerado que a alocação dos transformadores reservas deve ser feita de modo a atender aos critérios estabelecidos e maximizar a utilidade total para a comunidade atendida pelas subestações candidatas.

4.1.2. Modelagem do problema

A maior parte dos modelos de localização de serviços é caracterizada pela existência de uma função objetivo empregada para impor eficiência ao sistema. Essa função visa minimizar alguma medida de “*desutilidade*” na condição mais desfavorável, tomando por base o princípio da eficiência e irá variar de acordo com as necessidades e anseios do usuário do modelo (Bertuglia *et al.*, 1987 *apud* Santos, 2005).

Neste estudo, o problema consiste em definir a melhor localização para o transformador reserva que corresponde a uma posição estratégica, dentre as localidades disponíveis, com o objetivo de minimizar o prejuízo global, levando-se em conta os seguintes critérios associados à topologia da rede e às características do cliente:

- Distância entre as subestações (representa o tempo para o atendimento);
- Grau de industrialização da área atendida pela subestação;
- Indicador de população atendida pela subestação;
- Índice de atendimento a serviços coletivos de saúde na área atendida pela subestação.

Este problema se enquadra bem no âmbito de modelagem de decisão multicritério, considerando os aspectos de múltiplos objetivos envolvidos.

Dentre os objetivos, é possível relacionar o custo com o critério distância entre a subestação sede da reserva técnica e a subestação demandante. Outros aspectos relacionados a custo poderiam ser considerados, tais como lucros cessantes. No entanto, ficou evidenciado que esse fator é pouco relevante se for comparado ao custo da interrupção do fornecimento de energia para o sistema produtivo e para a população como um todo.

O segundo objetivo diz respeito à disponibilidade do serviço que significa a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Este último objetivo tem um caráter importante para a própria concessionária fornecedora do serviço de energia e para o ambiente externo à Empresa, uma vez que a indisponibilidade do serviço de energia pode afetar negócios em todos os setores da economia, além da comunidade em geral que está habituada a viver com esse bem. Portanto, a esse objetivo são vinculados os outros critérios.

A introdução da teoria da utilidade multiatributo, comumente referida por MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), na alocação das reservas propicia ao decisor o conhecimento da estrutura de risco dos critérios ou atributos estabelecidos, e possibilita o tratamento dos múltiplos objetivos existentes. A MAUT preconiza uma função de utilidade que visa representar analiticamente as preferências do decisor, cujo comportamento é assumido como racional, em termos de múltiplos atributos (Keeney e Raiffa, 1976).

A teoria da utilidade permite avaliar as conseqüências de cada alternativa, mediante um procedimento de elicitación de preferências na tentativa de incorporar ao problema o comportamento do decisor em relação ao risco. Esse processo conduz à formulação de uma nova escala denominada de escala de utilidade, a qual estabelece para cada conseqüência um valor de utilidade, segundo as preferências do decisor. O processo de escolha será então realizado a partir dessa nova escala que permite, quando necessário, agregar os aspectos de incerteza inerente ao problema de decisão. GOMES *et al.* (2009).

A seguir, são justificadas as razões pelas quais foram escolhidos os critérios para serem inseridos na formulação da função utilidade multiatributo.

4.1.3. Os critérios

No modelo multicritério proposto para a alocação do transformador reserva, foram estabelecidos quatro critérios relevantes:

1. População: o tamanho da população atendida por cada subestação exerce um poder de atração para a localização da reserva, tendo em vista o impacto que a interrupção deste serviço causa à comunidade em geral que está acostumada a conviver com este tipo de bem e ao nível de conforto por ele proporcionado.
2. Grau de industrialização: o nível de industrialização da localidade tem influência direta na demanda de energia elétrica que deve ser atendida pela subestação e define a capacidade e/ou o número de transformadores que precisam ser alocados para este atendimento; exerce um poder de atração sobre a localização da reserva técnica, em

função dos grandes prejuízos que a interrupção do serviço de energia pode causar ao setor produtivo.

3. Índice de atendimento a serviços coletivos de saúde: as unidades de prestação de serviços de saúde têm um papel social de extrema relevância para a sociedade em geral e também exercem um poder de atração sobre a localização da reserva técnica, tendo em vista os riscos que a interrupção do serviço de energia pode proporcionar para a saúde e o bem estar da população, cuja repercussão negativa para a imagem da concessionária teria um forte apelo popular.
4. Distância: a distância entre as subestações que são os pontos de demanda para as reservas técnicas afeta simultaneamente os custos envolvidos, que são o primeiro objetivo do modelo a serem minimizados, e os tempos de atendimento que impactam diretamente no segundo objetivo no modelo que é a disponibilidade do serviço, a ser maximizada. A subestação que representa a menor distância relativa em relação às demais exerce um poder de atração sobre a localização da reserva técnica.

Na formulação do modelo, três dos critérios apresentados foram identificados com características similares, no que diz respeito à forma de apresentação, uma vez que todos estão referidos a cada subestação SE; e ao comportamento em relação à escala de utilidade: os indicadores relacionados à população (ip), grau de industrialização (gi) e o indicador de atendimento a serviços coletivos de saúde (is) apresentam valores que são atribuídos numa escala direta do quanto atraem a reserva técnica.

Destarte, consideram-se os j vetores com os elementos: ip_j , gi_j , is_j , representados por: $\langle ip, gi, is \rangle_j$, onde: $1 \leq j \leq n$, sendo n o número de subestações existentes (potenciais sedes).

Assim como, para cada critério são designados os vetores de interesse por subestação demandante:

- $|ip_k|$ vetor do critério indicador de população para a SE k ($1 \leq k \leq n$)
- $|gi_k|$ vetor do critério grau de industrialização para a SE k ($1 \leq k \leq n$)
- $|is_k|$ vetor do critério índice de serviços coletivos de saúde para a SE k ($1 \leq k \leq n$)

O quarto critério, que é a distância entre as subestações, apresenta tanto a forma de apresentação quanto o comportamento em termos de utilidade distintos dos critérios anteriores. A distância é apresentada na forma de uma matriz SE x SE, na qual o elemento d_{ij} da matriz $|d_{kj}|$ é interpretado como a distância da subestação k para a subestação j . Desse modo, a matriz contempla as distâncias de cada subestação para todas as outras. No que se

refere ao comportamento em relação à utilidade, será mais atrativa, para localização da reserva, a subestação que apresentar a menor distância média para as outras subestações.

O modelo proposto agrega o critério da distância (d) aos demais critérios exercendo um papel de ponderação, mediante a sua modelagem como um fator multiplicativo. Este procedimento tem sido muito adotado em estudos de localização com o foco em sistemas de produção na área de serviços (Chase e Aquilano, 1989; Davis *et al.*, 2001). Trata-se do modelo de Ardalan em que se considera um peso para cada população, assumindo-se que populações de cidades diferentes tenham importâncias distintas. Para o modelo proposto, as populações de todas as localidades apresentam o mesmo grau de importância.

4.1.4. Vetor Critério Ponderado

A partir deste ponto, são obtidas os vetores de critérios ponderados: $|p_{kj}|$, $|i_{kj}|$, $|s_{kj}|$, respectivamente relacionadas à ponderação dos critérios: indicador de população (ip), grau de industrialização (gi) e índice de atendimento a serviços coletivos de saúde (is) pela distância (d), por meio das expressões a seguir:

$$|p_{kj}| = |d_{kj}| \cdot |ip_k| \quad (4.1)$$

$$|i_{kj}| = |d_{kj}| \cdot |gi_k| \quad (4.2)$$

$$|s_{kj}| = |d_{kj}| \cdot |is_k| \quad (4.3)$$

Deve ser observado que cada vetor denota um fator ao qual está associado o grau de desvantagem de localização da reserva numa subestação j para atender uma subestação k , segundo o critério ao qual a distância foi agregada.

Para entender o que foi dito, toma-se como exemplo o caso do vetor critério ponderado relativo ao critério população:

- Se a população atendida pela subestação k é maior, então a desvantagem ao localizar a reserva técnica na subestação j será cada vez maior com a distância entre estas SEs;
- Se a reserva for localizada na mesma subestação k , onde está sendo atendida a população ($k=j$), então o elemento p_{kk} e a desvantagem para esta SE serão nulos.

Como visto, o critério distância atua como um peso para o critério população.

4.1.5. A Estrutura de Preferências do Decisor

Na formulação da estrutura de preferência, um modelo de função valor (utilidade) é adotado para cada critério estabelecido com vistas a avaliar o conjunto de ações em análise. A partir daí, se faz necessário empregar um procedimento de elicitación de preferências do

decisor, de modo a obter os parâmetros da função utilidade que fornece valores naturais para mensurar os desempenhos das alternativas, sob um dado critério.

Os estudos de preferência desenvolvidos na formulação do modelo constataam que os três critérios considerados apresentam um comportamento similar em utilidade que sugere uma aproximação pela função utilidade exponencial negativa. Podendo ser representada pelas seguintes expressões:

$$U_{p_{kj}} = \exp(-A_1 p_{kj}) \quad (4.4)$$

$$U_{i_{kj}} = \exp(-A_2 i_{kj}) \quad (4.5)$$

$$U_{s_{kj}} = \exp(-A_3 s_{kj}) \quad (4.6)$$

Os parâmetros A_1 , A_2 e A_3 devem ser estabelecidos pelo decisor, em função de suas estruturas de preferências para estes atributos, mediante um processo de elicitacão.

A escolha do modelo de função utilidade exponencial negativa significa que à medida que o produto do critério ponderador distância pelo critério contemplado pelo modelo cresce, a desvantagem cai de forma não linear e assintótica. Esse comportamento para a função utilidade pode ser entendido da seguinte forma: à medida que o tempo de interrupção ou a magnitude do indicador correspondente ao critério aumenta, os efeitos sobre a utilidade da consequência se tornam cada vez menores, independente do critério.

Assim, as primeiras horas após a interrupção do serviço de energia são mais críticas e, a partir de certo nível de clientes afetados, a utilidade da consequência quase não varia. Essa assertiva encontra apoio no senso comum e nos estudos de utilidade, no contexto da microeconomia, em que se considera que a falta de um produto tende a ser assimilada ou compensada com o decorrer do tempo, mediante opção por produtos substitutos.

Foram desenvolvidos estudos em relação às preferências com gestores de manutenção da concessionária de serviços de energia elétrica local. Dentre as conclusões obtidas da estrutura de preferências para esses executivos, constataram-se algumas generalizações que podem ser adotadas para estabelecimento da função utilidade.

1. A primeira generalização corresponde à função analítica que, como já foi comentado anteriormente, implica no modelo exponencial;
2. A segunda generalização permite a parametrização da função utilidade exponencial. Considera-se que se o valor de φ (p , i ou s) = 0, $U(\varphi) = 1$. Ou seja, a utilidade é máxima para uma perda nula; e para o maior valor de φ encontrado, deve-se adotar $U(\varphi) \approx 0$.

A partir da escolha do modelo de função utilidade e das condições de contorno, é obtido um procedimento de calibração dos parâmetros A_1 , A_2 e A_3 das funções de utilidade elicítadas no processo de análise (Keeney e Raiffa, 1976).

Considerando os aspectos relevantes envolvidos no contexto do problema, quais sejam:

- a problemática de escolha;
- a estrutura básica de preferências subjacente;

Um modelo de agregação multicritério foi desenvolvido com base em uma função utilidade multiatributo (MAUT).

4.1.6. A Função Utilidade Multiatributo

O modelo de agregação dos três atributos, função utilidade multiatributo, considera a independência aditiva (Keeney & Raiffa, 1976) entre o critério grau de industrialização e os demais critérios. Não obstante, entre os critérios relacionados a saúde e população o mesmo não se pode afirmar. Uma vez que as preferências em relação à saúde e população são mutuamente independentes em utilidade (Keeney & Raiffa, 1976).

O modelo que representa estas condições corresponde ao modelo multilinear na forma:

$$U_{kj} = K_1 U_{p_{kj}} + K_2 U_{i_{kj}} + K_3 U_{s_{kj}} + K U_{p_{kj}} \cdot U_{s_{kj}} \quad (4.7)$$

Onde os parâmetros: K_1 , K_2 , K_3 , e K são constantes de escala, de modo que:

$$\sum_{m=1}^3 K_m + K = 1 \quad (4.8)$$

O parâmetro K da função utilidade multilinear representa a interação de preferência entre os atributos população e serviços coletivos de saúde para o decisor. Isto significa que, apesar desses atributos serem independentes em utilidade, o decisor pode preferir conseqüências iguais dos dois atributos ($K > 0$), conseqüências distintas dos dois atributos ($K < 0$) ou ser indiferente entre determinadas combinações de conseqüências desses atributos. (Gomes *et al.*, 2009). No caso em apreço, os atributos são ditos complementares ($K > 0$).

O valor U_{kj} representa a utilidade para a comunidade atendida pela subestação k , se a reserva for localizada na subestação j . A obtenção de um indicador geral de utilidade $(U_t)_j$, relativo à localização da reserva na subestação j , se dá pela soma das utilidades fixando a reserva na subestação j , em relação a todas as subestações k , como se vê na equação a seguir:

$$U_{t_j} = \sum_{k=1}^n U_{kj} \quad (4.9)$$

Após aplicar esta equação a todas as subestações disponíveis para receber a reserva técnica, aquela que apresentar o maior valor de U_t será a localidade escolhida para a reserva técnica.

4.1.7. O Sistema de Apoio a Decisão

Considerando a diversidade de parâmetros e de dados envolvidos no problema de alocação das reservas de transformadores tratado pelo modelo proposto, torna-se evidente a necessidade da obtenção de respostas rápidas, devido às constantes mudanças que o ambiente proporciona. Deve-se considerar que, enquanto se está buscando uma solução para o problema em questão, uma série de variáveis, que não são diretamente incorporadas no modelo, pode interagir no negócio, modificando os parâmetros e dados iniciais, gerando novas expectativas e propiciando um novo ambiente com ameaças e oportunidades que repercutem diretamente nos objetivos estratégicos da empresa. A análise de sensibilidade das respostas, o adequado armazenamento dos dados, o tratamento adequado do aspecto cognitivo do decisor, a visualização de gráficos e a forma com que o usuário interage com o sistema são fatores imprescindíveis para justificar a construção de um Sistema de Apoio à Decisão.

Os Sistemas de Apoio à Decisão são uma das principais categorias de sistemas de apoio gerencial. São sistemas de informação computadorizados que fornecem aos gerentes apoio interativo de informações durante o processo de tomada de decisão. Os SAD's utilizam dados analíticos, bancos de dados especializados, os próprios insights e apreciações dos tomadores de decisão e um processo de moldagem computadorizada para apoiar a tomada de decisão estruturada, semi-estruturadas e não-estruturadas por parte de cada gerente (O'Brien, 2002).

Todos os SAD's consistem pelo menos em componentes de gestão de dados, interface de usuário e gestão de modelos e, é claro, de usuários. (Turban, 2004)

O Aplicativo ALOCA desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Sistemas de Informação e Decisão (GPSID) oferece uma estrutura de SAD que permite ao usuário, mediante uma combinação de software, hardware e ser humano, acessar todas as funcionalidades do sistema através de uma interface simples e amigável.

O banco de dados do SAD desenvolvido é composto por dados relacionados com as subestações: indicadores associados à população, grau de industrialização, atendimento a serviços coletivos de saúde; distâncias; parâmetros do cenário referentes aos critérios (importância relativa dos critérios) e as funções de utilidade. O armazenamento de dados consistentes com o exposto, em um local físico, é o papel deste elemento.

A base de modelos matemáticos deste SAD é o elemento responsável pela formulação matemática do problema, por meio do modelo de decisão multicritério fundamentado na teoria da utilidade multiatributo (MAUT) para a resolução da problemática de escolha da localidade para a alocação da reserva técnica dentre as subestações candidatas por meio de um algoritmo exato.

A análise de sensibilidade propiciada pelo SAD permite introduzir mudanças hipotéticas nos dados de entrada e observar o impacto dessas mudanças nos resultados. Dessa forma, é permitido que o gestor planeje a decisão que tomará, pois ela permite modificar os dados que definem uma circunstância franqueando uma visão de como a organização se comporta sob diferentes situações de decisões

O aplicativo ALOCA é uma ferramenta de apoio á decisão na localização de transformadores reservas, baseada na estrutura de preferência do decisor, a qual é modelada a partir das curvas de utilidade. No caso específico deste estudo, busca-se minimizar as perdas decorrentes do deslocamento do transformador reserva entre as subestações demandantes, em função do prejuízo que isso representa para a empresa e, principalmente, para a comunidade atendida. Ou seja, escolher a alternativa mais apropriada de localização, dentre as subestações disponíveis, onde a reserva esteja situada a uma distância ótima das subestações que possuem maior nível de atratividade, caracterizado pelos critérios discutidos anteriormente. A interface inicial é mostrada na figura 4.2, seguinte:

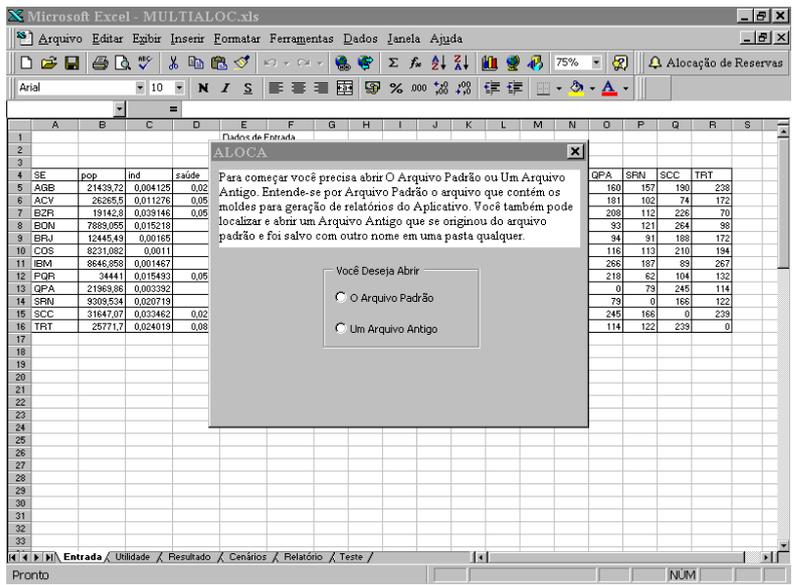


Figura 4.2 - Tela inicial (escolha do tipo de arquivo)

Inicialmente, o usuário deve optar entre abrir o arquivo padrão ou um arquivo antigo. Por arquivo padrão entende-se o arquivo que contém os moldes para geração de relatórios do aplicativo. Um arquivo antigo é aquele que se originou do arquivo padrão e foi salvo com outro nome em uma pasta qualquer. Faz-se necessário que o arquivo aberto contenha os dados de entrada: Lista com os nomes das subestações, Matriz quadrada das distâncias entre as subestações e Listas das populações, dos graus de industrialização e dos serviços de saúde.

O Aplicativo apresenta uma tela na qual devem ser selecionados os Dados de Entrada no arquivo aberto. Vide próxima figura 4.3.

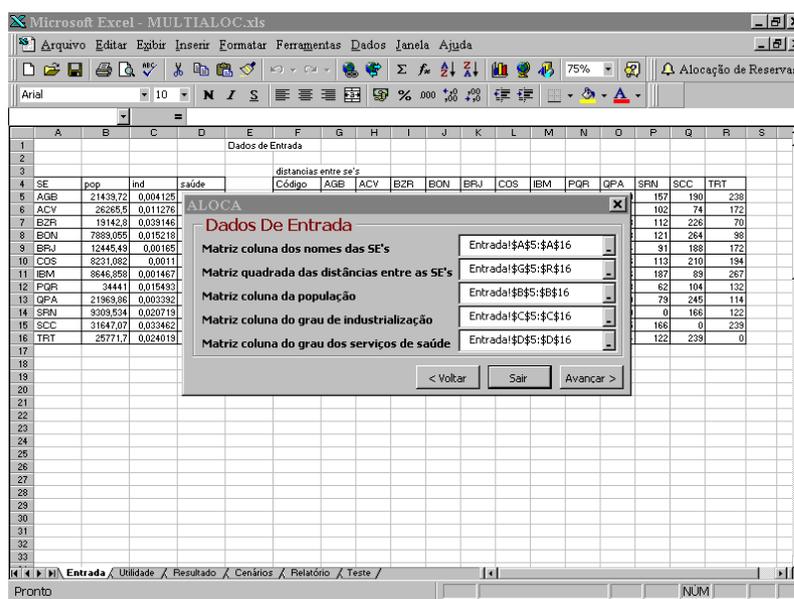


Figura 4.3 - Dados de entrada

Ao avançar, é apresentada a tela Parâmetros do Cenário que visa modelar as curvas de utilidade dos atributos população, grau de industrialização e serviços coletivos de saúde, as quais o usuário pode calibrar, ajustando os valores dos parâmetros das funções de utilidade dos atributos, até obter a curva desejada. Após os ajustes, devem ser atribuídos os valores das constantes de escala K_1 , K_2 , K_3 e K (os valores das constantes devem somar um), de acordo com a importância relativa dos critérios.

Caso o usuário deseje acessar dados de simulações anteriores, deve recorrer à opção “Consulta” para escolher o cenário desejado ou pode acrescentar a análise realizada aos cenários anteriores para ser consultada oportunamente, bastando fornecer o nome deste cenário na legenda e selecionar o botão "Armazenar" para guardar todos os parâmetros fornecidos naquele cenário e os valores das utilidades totais de cada subestação na planilha "Cenários". Esse procedimento aparece ilustrado na figura 4.4.

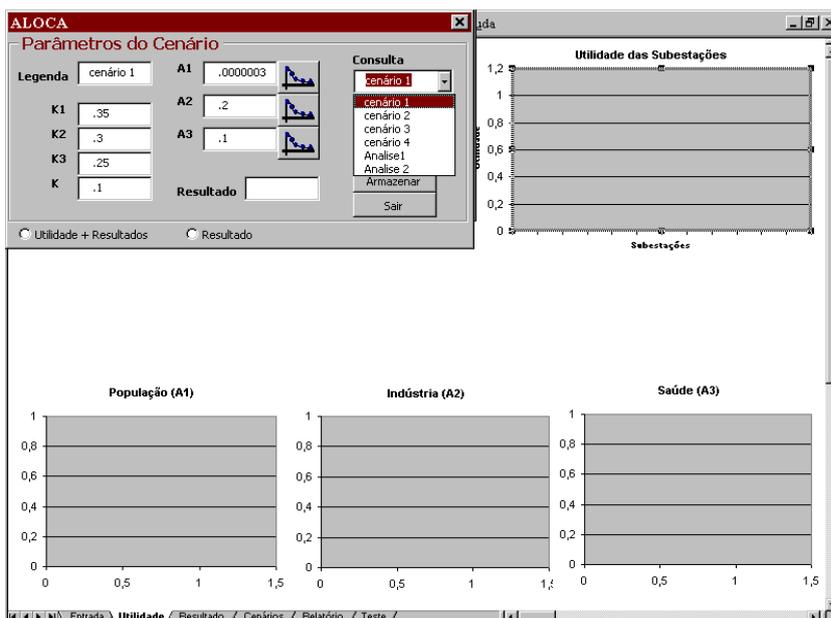


Figura 4.4 - Cenários

Com os valores fornecidos dos parâmetros das funções de utilidade dos atributos, que representam o comportamento das preferências do decisor, podem ser obtidas as respectivas curvas de utilidade dos atributos. Essas curvas, ao serem exibidas, permitem a compreensão da influência do parâmetro sobre a forma da curva da função utilidade. A figura 4.5 mostrada a seguir, representa a interface das curvas de utilidade dos atributos.

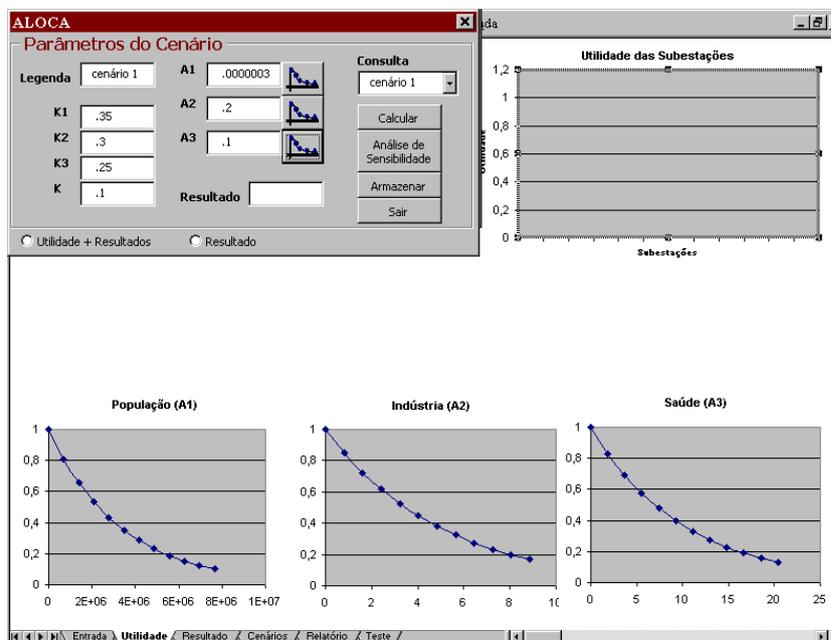


Figura 4.5 - Curvas de utilidade dos atributos

Após terem sido fornecidos também os valores das constantes de escalas, que representam a importância relativa dos atributos, a interface da utilidade total das subestações é obtida. Esta etapa fornece a indicação da subestação de maior utilidade, ou seja, a subestação escolhida para alocar a reserva. Uma vez que todos os parâmetros exigidos na modelagem tenham sido fornecidos, é possível fazer modificações em cada um destes parâmetros, a fim de visualizar sua influência no resultado final. Vide figura 4.6 que é exibida a seguir.

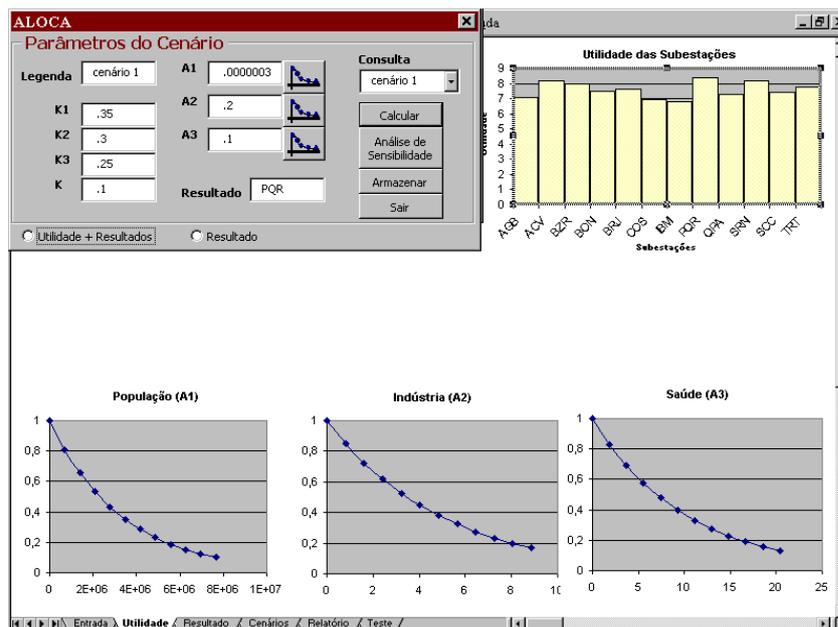


Figura 4.6 - Resultados e utilidades

A fim de avaliar a robustez do resultado obtido (localização da reserva), o usuário pode proceder a uma análise de sensibilidade, na qual o valor de cada parâmetro (um por vez) é submetido a uma variação. O processo inicia adotando uma variação de +20% sobre o parâmetro, para verificar se há variação no resultado. Caso o resultado se altere, procede-se da mesma forma com +15%, +10% e +5%. A transição entre um percentual de variação maior para o seguinte menor só é feita no caso de haver divergência de resultados. Se não houver divergências ou após realizar as variações até +5%, deve-se repetir o procedimento para uma variação de - 20% sobre o parâmetro, e assim por diante, até que se identifique para quais faixas de valores do parâmetro em análise (limites de insensibilidade) o modelo preserva o resultado original. A figura 4.8 a seguir representa a interface da análise de sensibilidade.

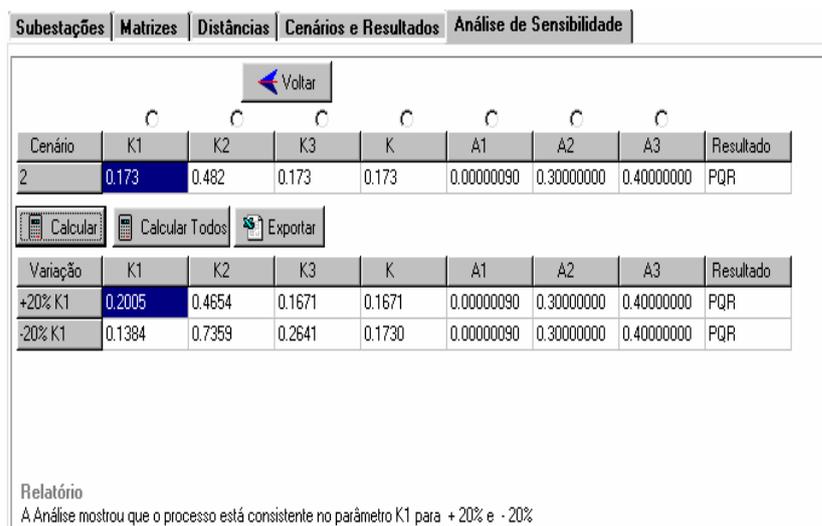


Figura 4.7 - Análise de sensibilidade

Desse modo, pode ser avaliado se a escolha dos parâmetros se mostrou sensível ou robusta e para quais faixas de variação.

4.1.8. Conclusão

O modelo original desenvolvido por Almeida *et al.* (2006) trata o problema da localização das reservas técnicas por meio de uma abordagem multicritério apropriada ao suporte à decisão, face a natureza do problema em apreço, e serve de base para os demais modelos subsequentes. Nesse modelo, é enfatizada a questão da sustentabilidade global do sistema, mediante a obtenção da solução eficiente que expressa uma recomendação para a localidade (subestação) onde deve ser alocada a única reserva técnica disponível.

A ferramenta desenvolvida (ALOCA) permite um suporte à decisão para o problema de localização das reservas técnicas de transformadores, fundamentado em um modelo estruturado que agrega os conhecimentos disponíveis sobre as características do cliente (tamanho da população, grau de industrialização e nível de atendimento a serviços coletivos de saúde) e aspectos logísticos relacionados à topologia do sistema elétrico (distâncias que representam tempos de deslocamento entre as subestações), constituindo um sistema de apoio à decisão dedicado ao problema específico, muito embora o modelo e a estrutura subjacentes possam ser estendidos para contemplar a localização das reservas técnicas de outros ativos do sistema elétrico.

4.2. Modelo Alternativo de Utilidade Multiatributo para Localização de Reserva Técnica de Transformador

4.2.1. Visão geral do problema

De um modo geral, a disponibilidade de uma instalação está relacionada aos aspectos de confiabilidade e manutenibilidade de seus equipamentos que são afetados pela ausência de redundâncias e de reservas técnicas. O planejamento de um sistema de distribuição de energia elétrica prevê a utilização de transformadores reservas em subestações, uma vez que a falha de um desses equipamentos provoca a interrupção do serviço para um grande número de consumidores.

O número de transformadores instalados em uma subestação é usualmente estabelecido seguindo o critério N-1, no qual dois ou mais transformadores são ligados em paralelo para que a subestação seja capaz de atender à carga de pico ainda que haja a falha em um desses equipamentos. Apesar de seguro, esse critério onera os custos das instalações do ponto de vista de arranjo das subestações (Chowdhury & Koval), de modo que tem sido preferido optar por localizar a reserva técnica disponível em uma subestação para ser compartilhada por um grupo de subestações.

A melhor localização desse recurso consiste no problema básico a ser modelado, considerando a existência de quantidades diferentes de transformadores nas diversas subestações a serem assistidas pela reserva técnica.

4.2.2. Formulação do Modelo

No modelo alternativo é considerada a situação mais realística em que existem diversos transformadores operando em cada subestação, o que resulta em diferentes propensões à falha nessas instalações. Desse modo, a probabilidade de falha de cada subestação influencia na demanda pelas unidades reservas como um fator de atratividade para a localização destas.

Não obstante seja bastante razoável, para fins práticos, admitir taxas de falhas aproximadamente iguais para os transformadores em operação, a existência de diferentes quantidades desses equipamentos nas instalações requer que este parâmetro seja acrescido ao modelo anterior atuando como um ponderador da demanda de cada localidade.

Por essa razão, adota-se esse parâmetro como um fator de ponderação para a demanda em cada subestação; isto é, subestações com taxas de falhas maiores exercem maior poder de atratividade sobre a localização das reservas.

4.2.2.1.A Propensão à Falha por Subestação

No modelo, considera-se que os transformadores, embora conectados em paralelo do ponto de vista elétrico, configuram um sistema série do ponto de vista de confiabilidade, uma vez que, para qualquer um dos transformadores que venha a falhar, ocorre a demanda por uma reserva para aquela subestação.

$$\lambda_k = \lambda_{1k} + \lambda_{2k} + \dots + \lambda_{mk} \quad (4.10)$$

A modelagem de falhas é feita procedendo a análise do comportamento da função taxa de falha correspondente aos diversos conjuntos de transformadores por subestação, mediante uma abordagem Bayesiana, admitindo que os transformadores das subestações estejam operando no período de vida útil.

Assim, tem-se que $\pi(\lambda_k)$ é o valor obtido por meio de um procedimento de elicitación junto a especialistas sobre a probabilidade equivalente de falha *a priori* para os “m” transformadores instalados na subestação de ordem k.

Como é assumida a hipótese de que o sistema se encontra no período de vida útil, com relação aos transformadores em operação, o comportamento das falhas segue um processo homogêneo de Poisson, no qual a chance de haver duas falhas coincidentes no tempo em equipamentos diferentes é considerada desprezível.

Ademais, a probabilidade de falha de cada instalação é assumida como a taxa de transição entre os estados operacional e em pane, conforme o modelo markoviano. A figura 4.9 ajuda no entendimento desta probabilidade.

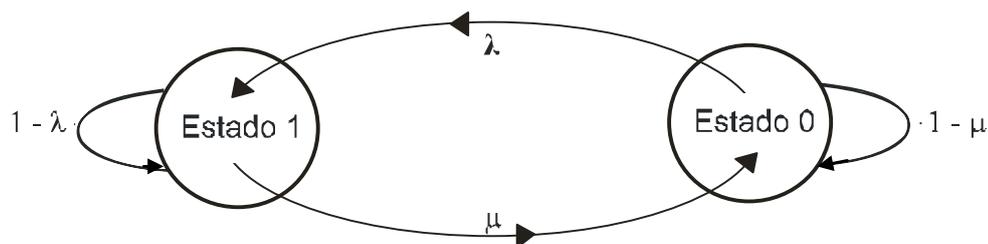


Figura 4.8 - Representação da transição de estados

Onde:

Estado 1 corresponde ao estado operacional (em funcionamento);

Estado 0 corresponde ao estado não operacional (em pane);

λ representa a probabilidade do equipamento migrar do estado operacional para o estado não operacional (probabilidade instantânea de falha);

μ representa a manutenibilidade ou a probabilidade do equipamento migrar do estado não operacional (pane) para o estado operacional.

Desse modo, a probabilidade correspondente à taxa de transição λ_k do conjuntos de transformadores da subestação k é inserida no modelo, mediante uma abordagem Bayesiana, para representar a probabilidade de falha da subestação.

4.2.2.2.A Formulação da Função Utilidade

O modelo anterior é considerado como a base do modelo alternativo, de modo que a estrutura da função utilidade é a mesma, porém os critérios, antes ponderados pela distância, devem ser ponderados também pela propensão à falha da instalação demandante.

Sabe-se que incerteza quanto à ocorrência de um estado da natureza é mensurada pela probabilidade da ocorrência do mesmo. A falha da subestação k , cuja probabilidade é λ_k , é o evento gerador das conseqüências para cada uma das dimensões do objetivo disponibilidade do serviço.

Logo, cada um dos estados da natureza de interesse ocorre com a probabilidade λ_k :

$$P(p_{kj}) = \lambda_k \quad (4.11)$$

$$P(i_{kj}) = \lambda_k \quad (4.12)$$

$$P(s_{kj}) = \lambda_k \quad (4.13)$$

Onde:

$P(p_{kj})$ é a probabilidade do estado da natureza, cuja utilidade da conseqüência para cada ação escolhida é medida segundo o critério ponderado de população (p_{kj})

$P(i_{kj})$ é a probabilidade do estado da natureza, cuja utilidade da conseqüência para cada ação escolhida é medida segundo o critério ponderado de industrialização (i_{kj})

$P(s_{kj})$ é a probabilidade do estado da natureza, cuja utilidade da conseqüência para cada ação escolhida é medida segundo o critério ponderado de serviços de saúde (s_{kj})

Ou seja, a falha da subestação conduz à interrupção do serviço e afeta cada uma das dimensões do objetivo disponibilidade consideradas: população, indústrias e serviços de atendimento coletivo de saúde.

As utilidades das conseqüências quando da falha na subestação k tendo a subestação j como a sede da reserva técnica, poderiam ser obtidas pelo cálculo do valor esperado da utilidade, segundo cada critério, se as probabilidades de falha fossem conhecidas:

$$E(U(p_{kj})) = P(p_{kj}) \cdot U(p_{kj}) = \lambda_k \cdot U(p_{kj}) \quad (4.14)$$

$$E(U(i_{kj})) = P(i_{kj}) \cdot U(i_{kj}) = \lambda_k \cdot U(i_{kj}) \quad (4.15)$$

$$E(U(s_{kj})) = P(s_{kj}) \cdot U(s_{kj}) = \lambda_k \cdot U(s_{kj}) \quad (4.16)$$

A gravidade da consequência da falha depende de dois fatores: a demanda afetada e o tempo de recomposição do sistema. O primeiro fator está associado à quantidade de transformadores da subestação, enquanto que o segundo resulta da localização da reserva.

No que diz respeito ao primeiro fator, o modelo alternativo incorpora um fator de carga, visando atenuar as consequências da falha nas subestações com dois ou mais transformadores operando, uma vez que o(s) transformador(es) remanescentes podem atender parcialmente a carga daquela instalação. Esse fator de carga é obtido como segue:

$$Fc_k = \frac{1}{m_k} \quad (4.17)$$

Onde:

Fc_k = fator de carga para a subestação k

m_k = número de transformadores da subestação k

O fator de carga é aplicado sobre os indicadores dos critérios, de modo a atenuar a consequência da falha em cada subestação que disponha de mais de um transformador:

$$ip_k = |Fc_k| \cdot |ip_k| \text{ indicador de população corrigido pelo fator de carga da SE k} \quad (4.18)$$

$$gi_k = |Fc_k| \cdot |gi_k| \text{ indicador de indústria corrigido pelo fator de carga da SE k} \quad (4.19)$$

$$is_k = |Fc_k| \cdot |is_k| \text{ indicador de saúde corrigido pelo fator de carga da SE k} \quad (4.20)$$

Considerando os vetores correspondentes aos indicadores de cada critério estabelecido no modelo original: $|ip_k|$, $|gi_k|$ e $|is_k|$ com $1 < k < n$, onde n representa o número de subestações. Os critérios ponderados: $|p_{kj}|$, $|i_{kj}|$ e $|s_{kj}|$, com $1 < j < n$, obtidos pelo produto da matriz distância $|d_{ij}|$ por esses vetores, ficam também corrigidos. A idéia é ajustar os indicadores para que a consequência, cuja utilidade é mensurada segundo cada critério, corresponda à parcela da demanda efetivamente afetada pela falha da subestação.

O segundo fator, que corresponde à localização da reserva, é contemplado no cálculo da utilidade, mediante o uso dos critérios ponderados pela distância entre a subestação afetada e aquela onde é alocada a reserva técnica.

Como existe incerteza sobre a probabilidade de falha, o valor esperado da utilidade da alocação da reserva na subestação j para atender a demanda da subestação k, para cada um dos atributos considerados no modelo, é calculado pelas seguintes expressões:

$$E_{\lambda_k} (U(p_{kj})) = \int_{\lambda_k} \pi(\lambda_k) E(U(p_{kj})) d\lambda_k = \int_{\lambda_k} \pi(\lambda_k) \lambda_k U(p_{kj}) d\lambda_k \quad (4.21)$$

$$E_{\lambda_k} (U(i_{kj})) = \int_{\lambda_k} \pi(\lambda_k) E(U(i_{kj})) d\lambda_k = \int_{\lambda_k} \pi(\lambda_k) \lambda_k U(i_{kj}) d\lambda_k \quad (4.22)$$

$$E_{\lambda_k} (U(s_{kj})) = \int_{\lambda_k} \pi(\lambda_k) E(U(s_{kj})) d\lambda_k = \int_{\lambda_k} \pi(\lambda_k) \lambda_k U(s_{kj}) d\lambda_k \quad (4.23)$$

4.2.3. A Função Utilidade Multiatributo

O modelo alternativo retorna a função U_{kj} que representa a utilidade para a comunidade atendida pela subestação k , se a reserva for localizada na subestação j , na forma a seguir:

$$U_{kj} = K_1 E_{\lambda_k} (U(p_{kj})) + K_2 E_{\lambda_k} (U(i_{kj})) + K_3 E_{\lambda_k} (U(s_{kj})) + K_{13} E_{\lambda_k} (U(p_{kj})) E_{\lambda_k} (U(s_{kj})) \quad (4.24)$$

Onde os parâmetros: K_1 , K_2 , K_3 , e K_{13} são constantes de escala relacionadas aos respectivos atributos, de modo que:

$$\sum_{m=1}^3 K_m + K_{13} = 1 \quad (4.25)$$

Assim como no modelo original, o parâmetro K_{13} da função utilidade multilinear representa a interação de preferência entre os atributos população e serviços coletivos de saúde para o decisor. Por se tratarem de atributos complementares, tem-se $K_{13} > 0$.

A obtenção de um indicador geral de utilidade $(U_t)_j$, relativo à localização da reserva na subestação j , se dá pela soma das utilidades fixando a localização da reserva nesta subestação j , em relação a todas as subestações k , como é mostrado na equação a seguir:

$$U_{tj} = \sum_{k=1}^n U_{kj} \quad (4.26)$$

4.2.4. Conclusão

A alocação de unidades de transformadores reservas é uma questão que se reveste de suma importância, uma vez que a escassez de recursos restringe a possibilidade de se dispor de uma provisão “confortável” de estoques de reserva técnica. A localização adequada das reservas existentes contribui de forma significativa para a manutenção dos níveis de qualidade do produto pelo seu impacto sobre a disponibilidade das instalações e, conseqüentemente, sobre a continuidade do serviço, aspectos cada vez mais exigidos pela sociedade em geral e, em particular, pelos órgãos reguladores do serviço de distribuição de energia elétrica.

A abordagem de problemas de natureza estratégica requer um tratamento metodológico apropriado que permita combinar os diversos objetivos envolvidos a aspectos subjetivos inerentes ao processo de tomada de decisão, com suficiente versatilidade, de modo a se adequar às mudanças de cenário no ambiente onde o problema se acha inserido. O modelo de utilidade multiatributo adotado na proposta tem se mostrado adequado para atender a estes requisitos, por permitir incorporar a estrutura de preferência do decisor e agregar os objetivos em uma função utilidade cujo valor se deseja maximizar.

A inserção da propensão à falha das subestações, mediante uma abordagem Bayesiana sobre o parâmetro taxa de falha dos transformadores, constitui uma tentativa de representar a incerteza sobre a demanda pelas reservas técnicas, considerando a natureza estocástica do processo de falhas dos equipamentos demandantes. Além disso, o modelo alternativo permite considerar as situações em que as falhas afetam apenas parcialmente a demanda devido à existência de mais de um transformador na subestação afetada.

Naturalmente, algumas hipóteses são assumidas na formulação do modelo alternativo sem comprometer a estrutura do modelo original. Essas hipóteses são discutidas no capítulo de conclusão.

O modelo 2 pode ser aplicado repetidas vezes para a obtenção das localidades (subestações) recomendadas para as reservas técnicas, no caso de se dispor de mais de uma reserva. Essa condição é particularmente interessante quando as subestações demandantes apresentam configurações de transformadores distintos e possam ser classificadas em grupos. Desse modo, é possível considerar a localização de reservas de capacidades diferentes para atender grupos de subestações distintos.

Essa proposta é apresentada no modelo seguinte que contempla o problema da escolha das sedes das múltiplas reservas técnicas disponíveis de uma única vez e estabelece uma hierarquia para essas reservas em função de suas capacidades de atendimento (quantidade de subestações que podem atender).

5. MODELO PROPOSTO PARA MÚLTIPLAS RESERVAS

Neste capítulo é considerada a problemática de localização em que são consideradas as melhores localidades, ou seja, aquelas que conduzem à maximização da nova função objetivo considerada, que agrega atributos importantes para a organização em particular ou para a comunidade em geral. Destarte, busca-se uma solução de compromisso, interpretada como a melhor alternativa de localização dos equipamentos reservas, em um conjunto de instalações que viabilize os benefícios para todas as instalações, mediante um enfoque de utilidade.

5.1. Modelo Para Localização de Múltiplas Reservas de Transformadores

Considera-se agora que o problema adquire novos contornos que são representados pela introdução de duas condições adicionais em relação ao modelo original do capítulo anterior:

- a. O sistema dispõe de várias reservas técnicas com capacidades diferentes para serem alocadas entre as instalações;
- b. As demandas das instalações são ponderadas pelo parâmetro de confiabilidade (taxa de falha) dos equipamentos em operação.

O problema de localização de máxima cobertura se caracteriza por determinar, dado um número p máximo de facilidades a localizar e valores de demanda a_i , localizados em cada vértice i , quais as localizações das facilidades de modo a maximizar a demanda atendida (Church & Re velle, 1974).

Um problema de localização hierárquico consiste em determinar simultaneamente a combinação apropriada de níveis (ou tipos) de serviços e o local onde esses conjuntos de serviços devem ser instalados (formando uma facilidade), e realizar a atribuição dos pontos de demanda às facilidades ou vice-versa.

Moore & ReVelle (1982) consideram um sistema que fornece k níveis de serviços e que possui k níveis de facilidades. Um nível de serviço s está disponível somente em uma facilidade de nível igual ou maior que s . O problema a ser resolvido é o de localizar o quantitativo de facilidades existentes, para cada um dos k níveis definidos, de maneira a maximizar o número de clientes com acesso a todos os k níveis de serviço. Desse modo, é descrito um sistema com localização hierárquica.

Assim, para o contexto do problema em apreço, o modelo proposto é fundamentado em três premissas básicas, a saber:

1. Um modelo hierárquico de localização de máxima cobertura apresenta uma estrutura metodológica conveniente para ser cogitada na alocação das reservas técnicas;
2. A demanda pelas reservas técnicas se dá quando os transformadores das subestações falham, logo a propensão à falha de cada subestação é incorporada ao modelo como foi feito no modelo alternativo do capítulo precedente;
3. A relevância dos atributos e a estrutura de preferência decisor, destacados nos modelos apresentados no capítulo anterior, devem ser conservados no novo modelo.

5.1.1. A Formulação do Modelo

Visando atender a essas premissas básicas na modelagem, busca-se atacar o problema de localização das reservas pela concepção de uma função objetivo, cuja formulação seja aderente ao modelo de localização hierárquico de máxima cobertura e permita a agregação desses objetivos em uma função utilidade multiatributo, bem como incorpore o parâmetro de confiabilidade como elemento ponderador da demanda pelas reservas.

Partindo da função objetivo vista no modelo de localização hierárquico de máxima cobertura, dada por:

$$v = M \max \left\{ \sum_{j \in \mathcal{I}} f_j x_j \right\} \quad (5.1)$$

Onde:

f_j representa a população (demanda) a ser atendida pela localidade j ;

x_j é uma variável binária que representa a condição de cobertura de uma localidade j ;

$x_j = 0$ se a localidade j não é coberta por nenhuma facilidade;

$x_j = 1$ se existe pelo menos uma facilidade capaz de atender à localidade.

A população atendida (f_j), cuja formulação deste tipo de problema visa maximizar, compreende os mesmos atributos dos modelos precedentes, uma vez que esses critérios contemplam as diferentes naturezas de ordem econômica e social dos clientes atendidos pelas subestações demandantes.

Por conseguinte, tem-se os vetores designativos dos critérios para um conjunto de n subestações, como segue:

$|ip_j|$ vetor indicador populacional, $1 \leq j \leq n$

$|g_j|$ vetor do grau de industrialização, $1 \leq j \leq n$

$|ip_j|$ vetor índice de serviços de atendimento coletivo de saúde, $1 \leq j \leq n$

$|D_{ij}|$ Matriz quadrada da distância SE_xSE de ordem n

Onde “ n ” representa o número de subestações demandantes das reservas técnicas.

No modelo em pauta, a matriz distância não representa um critério nem atua como fator ponderador sobre os demais critérios, sendo utilizada apenas para verificações de cobertura.

5.1.1.1. A Propensão à Falha por Subestação

Também neste modelo, considera-se que o conjunto de m transformadores em operação na subestação j configuram um sistema série do ponto de vista de confiabilidade, De onde pode ser considerado que:

$$\lambda_j = \lambda_{1j} + \lambda_{2j} + \dots + \lambda_{mj} \quad (5.2)$$

Ainda é assumida a hipótese de que o sistema se encontra no período de vida útil, com relação aos transformadores em operação, de modo que o comportamento das falhas segue um processo homogêneo de Poisson, no qual a chance de haver duas falhas coincidentes no tempo em equipamentos diferentes é considerada desprezível.

A probabilidade de falha do equipamento é inserida ao modelo, mediante uma análise de função de estado, segundo uma abordagem markoviana, conforme representado a seguir:

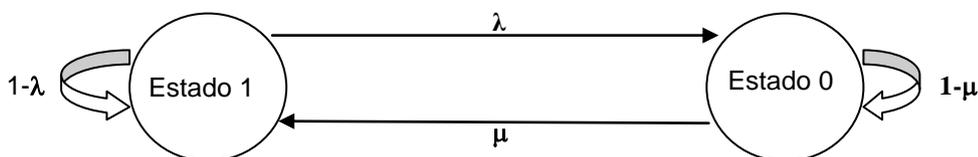


Figura 5.1 - Representação da transição de estados

Onde:

Estado 1 corresponde ao estado operacional (em funcionamento);

Estado 0 corresponde ao estado não operacional (em pane);

λ representa a probabilidade do equipamento migrar do estado operacional para o estado não operacional (probabilidade instantânea de falha);

μ representa a manutenibilidade ou a probabilidade do equipamento migrar do estado não operacional (pane) para o estado operacional.

Do mesmo modo que no modelo precedente, o parâmetros de interesse λ_j , que é assumido como a probabilidade equivalente de falha do conjunto de transformadores da

subestação j , é inserido no modelo, mediante uma abordagem Bayesiana, admitindo que os transformadores das subestações estejam operando no período de vida útil.

Assim, tem-se que $\pi(\lambda_j)$ é a distribuição de probabilidade *a priori* obtida por meio de um procedimento de elicitação junto a especialistas sobre a probabilidade equivalente de falha λ_j para os m transformadores instalados na subestação de ordem j .

Por essa razão, adota-se esse parâmetro como um fator de ponderação para a demanda; isto é, subestações com probabilidades de falhas maiores, em princípio, exercem maior poder de atratividade sobre a localização das reservas. Assim, a probabilidade equivalente de falha atua como um fator de demanda por reserva para cada subestação.

$$f_j^c = \lambda_j (f_j) \quad (5.3)$$

Onde:

f_j^c = demanda ponderada da subestação j ;

λ_j = probabilidade equivalente de falha da subestação j .

O modelo também permite que seja aplicado um fator de carga para atenuar a consequência da falha em subestações com mais de um transformador. Esse fator é mais elaborado que o apresentado no modelo precedente, por levar em conta as diferenças de capacidades desses equipamentos, quando estas existirem.

$$Fc_j = \frac{S_x^j}{\sum_{k=1}^{m_j} S_k^j} \quad (5.4)$$

Onde:

Fc_j representa o fator de carga para a subestação j

S_x^j representa a capacidade do transformador avariado na subestação j (em MVA)

S_k^j representa a capacidade do transformador k situado na subestação j (em MVA)

O fator de carga é aplicado sobre o indicador de cada critério, de modo a corrigir a demanda afetada pela falha do transformador daquela subestação.

$$\mathbf{ip}_j = |Fc_j| \cdot |ip_j| \text{ indicador de população corrigido da SE } j \quad (5.5)$$

$$\mathbf{gi}_j = |Fc_j| \cdot |gi_j| \text{ indicador de industrialização corrigido da SE } j \quad (5.6)$$

$$\mathbf{is}_j = |Fc_j| \cdot |is_j| \text{ indicador de serviços de saúde corrigido da SE } j \quad (5.7)$$

Por razões de simplicidade de notação, foi mantida a representação (sem negrito) para esses indicadores corrigidos nas expressões subseqüentes.

5.1.1.2. A Formulação da Função Perda

Na formulação da função objetivo, é introduzida uma função perda que avalia a consequência da falta do serviço para a população, a qual é representada pelos múltiplos atributos ou pelas dimensões do objetivo disponibilidade que foram eleitos no modelo original proposto.

Como no modelo anterior, observa-se que a incerteza sobre o bem ou consequência f_j , segundo cada critério, está associada à ocorrência do estado da natureza θ_j , que corresponde à falha do transformador na subestação demandante j , cuja probabilidade é λ_j . Ou seja:

$$P(\varphi_j) = P(\theta_j) = \lambda_j \quad (5.8)$$

De modo que, para cada um dos critérios, tem-se:

$$P(ip_j) = \lambda_j \quad (5.9)$$

$$P(gi_j) = \lambda_j \quad (5.10)$$

$$P(is_j) = \lambda_j \quad (5.11)$$

Como já fora discutido anteriormente, a falha na instalação conduz à perda do serviço e impacta no objetivo disponibilidade, modulando a demanda em cada uma de suas dimensões. De modo que:

$P(ip_j)$ é a probabilidade do estado da natureza na subestação j , cuja utilidade da consequência, para cada ação escolhida, é medida segundo o critério de população;

$P(ik_j)$ é a probabilidade do estado da natureza na subestação j , cuja utilidade da consequência, para cada ação escolhida, é medida segundo o critério de industrialização;

$P(sk_j)$ é a probabilidade do estado da natureza na subestação j , cuja utilidade da consequência, para cada ação escolhida, é medida segundo o critério de serviços de saúde.

A Função perda representa a desvantagem que decorre quando a natureza assume o estado θ , dado que fora adotada a decisão $d(x)$. Em síntese, a perda é simplesmente o negativo da utilidade (Campello de Souza, 2001) relativa à probabilidade de se obter o bem p nessas mesmas condições. É aquilo que se deixou de ganhar. Ou seja:

$$L(\theta, d(x)) = -u(P(p/\theta, d(x))) \quad (5.12)$$

Portanto, a perda decorrente da falha do transformador na subestação j , quando se decide alocar as reservas em posições pelas quais a subestação j não é coberta, é dada por:

$$L(\theta_j, d(x=0)) = -u(P(\varphi_j/\theta_j, d(x=1))) \quad (5.13)$$

A utilidade representa a vantagem que se obtém em alocar as reservas, de tal modo que a subestação j é coberta quando da falha do transformador. É aquilo que se deixou de perder.

Do exposto na equação 5.8, e considerando a independência entre os eventos, tem-se a seguinte expressão:

$$u(P(\varphi_j/\theta_j, d(x=1))) = E_{\lambda_j}(U(\varphi_j)) \quad (5.14)$$

Simplificando a notação para a representação da função perda, pode-se considerar que $E(L(\varphi_j))$ é a perda, segundo o critério φ , decorrente da decisão de localizar as reservas em subestações pelas quais a subestação j não é coberta, se ocorrer a falha de um transformador nesta subestação.

Dessa forma, o valor esperado da perda para cada um dos atributos considerados no modelo, caso a probabilidade de falha fosse conhecida, pode ser obtido a partir das seguintes equações:

$$E(L(ip_j)) = -E(U(ip_j)) = -P(ip_j)U(ip_j) = -\lambda_j U(ip_j) \quad (5.15)$$

$$E(L(gi_j)) = -E(U(gi_j)) = -P(gi_j)U(gi_j) = -\lambda_j U(gi_j) \quad (5.16)$$

$$E(L(is_j)) = -E(U(is_j)) = -P(is_j)U(is_j) = -\lambda_j U(is_j) \quad (5.17)$$

Onde:

$E(L(ip_j))$ é a esperança da perda, segundo o critério de população atendida pela subestação j ;

$E(L(gi_j))$ é a esperança da perda, segundo o critério de indústrias atendidas pela subestação j ;

$E(L(is_j))$ é a esperança da perda, segundo o critério de serviços de saúde atendidos pela subestação j .

Como existe incerteza sobre a probabilidade de falha, o valor esperado da perda é obtido por meio das equações que seguem:

$$E_{\lambda_j}(L(ip_j)) = -\int_{\lambda_j} \pi(\lambda_j) \lambda_j U(ip_j) d\lambda_j \quad (5.18)$$

$$E_{\lambda_j}(L(gi_j)) = -\int_{\lambda_j} \pi(\lambda_j) \lambda_j U(gi_j) d\lambda_j \quad (5.19)$$

$$E_{\lambda_j}(L(is_j)) = -\int_{\lambda_j} \pi(\lambda_j) \lambda_j U(is_j) d\lambda_j \quad (5.20)$$

Assim, a função perda para a subestação j é representada como segue:

$$L(f_j^c) = \left\{ K_1 E_{\lambda_j}(L(ip_j)) + K_2 E_{\lambda_j}(L(gi_j)) + K_3 E_{\lambda_j}(L(is_j)) + K_{13} E_{\lambda_j}(L(ip_j)) E_{\lambda_j}(L(gi_j)) \right\} \quad (5.21)$$

Onde:

$L(f_j^c)$ é a função perda referente à demanda ponderada na subestação j ;

$E_{\lambda_j}(L(ip_j))$ é a esperança da perda, segundo o critério população atendida pela subestação j , sob incerteza na probabilidade equivalente de falha;

$E_{\lambda_j}(L(gi_j))$ é a esperança da perda, segundo o critério indústrias atendidas pela subestação j , sob incerteza na probabilidade equivalente de falha;

$E_{\lambda_j}(L(is_j))$ é a esperança da perda para o critério serviços de saúde atendidos pela subestação j , sob incerteza na probabilidade equivalente de falha;

K_1 , K_2 , K_3 e K_{13} são as constantes de escala atribuídas de acordo com o processo de elicitación de preferências e somam a unidade (Keeney & Raiffa, 1976).

5.1.1.3. A Estrutura de Preferências do Decisor

Para a modelagem multicritério de apoio à decisão, é considerada a estrutura de preferência do decisor para valorar as conseqüências de cada curso de ação e, assim, uma função perda é adotada para cada critério estabelecido. A partir daí, emprega-se um procedimento de elicitación de preferências do decisor, a fim de se obter os parâmetros da função perda que deve mensurar os desempenhos das alternativas sob um dado critério.

Na formulação das funções perda para cada um dos atributos assume-se um modelo de exponencial negativa pelas razões já expostas no capítulo anterior, de modo que:

$$L(ip_j) = 1 - \exp(-A_1 ip_j) \quad (5.22)$$

$$L(gi_j) = 1 - \exp(-A_2 gi_j) \quad (5.23)$$

$$L(is_j) = 1 - \exp(-A_3 is_j) \quad (5.24)$$

Os parâmetros A_1 , A_2 e A_3 são obtidos do processo de elicitación e são consideradas as seguintes condições de contorno para a função utilidade:

1. A perda é nula quando o atributo se anula, i.e.: $L(\varphi_j) = 0$ se $\varphi_j = 0$;
2. A perda máxima ocorre nos casos em que o atributo assume seu maior valor dentro das alternativas de localidades $L(\varphi_j) = \text{máx}$, se φ_j é máximo.

Observa-se da elicitación de preferências dos decisores que, de uma maneira geral, a função perda é monotonicamente crescente e tende a estabilizar a partir de um determinado valor do atributo, uma vez que a maioria dos gestores afirma não haver diferença entre as conseqüências da indisponibilidade do serviço para uma população de 250.000 ou 300.000 pessoas, por exemplo. Esse entendimento se deve ao fato de que, para as populações citadas, as conseqüências da interrupção do serviço são praticamente idênticas, em termos de prejuízo

para a imagem do concessionário do serviço perante a sociedade em geral ou quanto às sanções e penalidades decorrentes junto ao órgão regulador.

Diante do exposto, a forma da função perda para cada atributo apresenta um crescimento, enquanto os valores do atributo não atingem certo limiar de indiferença, a partir do qual o crescimento da função é pouco significativo, como é mostrado na figura 5.3.

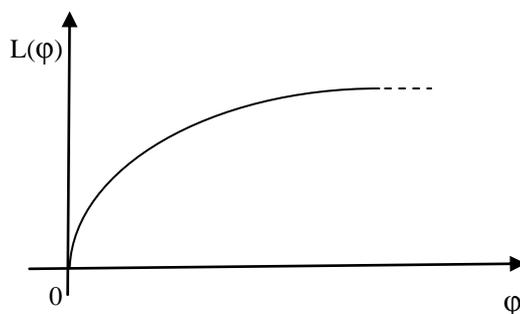


Figura 5.2 - Função perda para os atributos

Como no caso dos modelos anteriores, esses atributos são agregados na forma multilinear, tendo em vista não haver independência entre os atributos população e serviços coletivos de saúde.

5.1.2. A Função Utilidade Multiatributo

Na formulação da função objetivo, foram incorporadas as premissas discutidas nos itens anteriores, tomando por base o Modelo de Localização Hierárquico de Máxima Cobertura, cujo objetivo precípuo é o de maximizar a “população” a ser atendida, levando-se em conta as restrições estabelecidas pelos raios de cobertura das reservas de níveis diferentes.

O problema de localização hierárquico em dois níveis, tratado na literatura, foi adaptado para o contexto da alocação das reservas técnicas de transformadores de potência nas subestações do sistema elétrico de um concessionário de serviços de energia elétrica, sendo reformulado como segue.

Sejam:

$J = \{1, \dots, m\}$ conjunto de subestações demandantes;

$I = \{1, \dots, n\}$ conjunto de subestações onde as reservas podem ser instaladas;

f_j^c = demanda ponderada atendida pela subestação $j \in J$;

R_{11} = distância crítica para o serviço de nível 1 oferecido pela reserva de nível 1;

R_{21} = distância crítica para o serviço de nível 1 oferecido pela reserva de nível 2;

R_{22} = distância crítica para o serviço de nível 2 (oferecido apenas pela reserva de nível 2);

$a_{ij} = 1$ se a subestação $j \in J$ puder ser coberta pelo nível de serviço 1 (dentro da distância crítica R_{11}), oferecido pela reserva de nível 1 localizada em $i \in I$ ($a_{ij} = 0$ caso contrário);

$b_{ij} = 1$ se a subestação $j \in J$ puder ser coberta pelo nível de serviço 1 (dentro da distância crítica R_{21}), oferecido pela reserva de nível 2 localizada em $i \in I$ ($b_{ij} = 0$ caso contrário);

$c_{ij} = 1$ se a subestação $j \in J$ puder ser coberta pelo nível de serviço 2 (dentro da distância crítica R_{22}), oferecido apenas pela reserva de nível 2 localizada em $i \in I$ ($c_{ij} = 0$ caso contrário);

p = número de reservas de nível 1 a serem localizadas;

q = número de reservas de nível 2 a serem localizadas;

$x_j = 1$ se a subestação $j \in J$ é coberta ($x_j = 0$ caso contrário);

$y_i = 1$ se uma reserva de nível 1 é localizada em $i \in I$ ($y_i = 0$ caso contrário);

$z_i = 1$ se uma reserva de nível 2 é localizada em $i \in I$ ($z_i = 0$ caso contrário).

Nível de serviço é a capacidade ou a potência do transformador para atender à demanda.

Neste ponto, deve-se ter em vista que a abordagem encontrada na literatura para o problema de localização hierárquico de máxima cobertura considera que os servidores ou facilidades são fixos e os clientes se deslocam até eles.

No caso em estudo, tem-se um contexto diferente no qual as reservas técnicas de transformadores se deslocam para atender às subestações demandantes por ocasião das falhas nos transformadores daquelas instalações.

Assim, duas hipóteses devem ser estabelecidas para a adaptação do modelo ao contexto do problema sob estudo:

Como primeira hipótese, as reservas de nível superior são as mais atraentes por serem as únicas capazes de atender aos equipamentos de maior porte. Destarte, busca-se evitar o uso das reservas de maior nível para suprir as demandas de falhas em equipamentos de nível inferior; além disso, as reservas de menor capacidade podem ser alocadas mais distantes das SE's demandantes, uma vez que falhas em equipamentos de menor porte acarretam perdas menores. Adicionalmente, o transporte desse tipo de reserva é menos oneroso. Desse modo, assume-se que: $R_{11} > R_{22} > R_{21}$.

A segunda hipótese a ser considerada na formulação do problema, no contexto específico deste estudo, é a de que duas reservas de mesmo nível não podem ser alocadas numa mesma instalação, fato que confere um caráter binário ao quantitativo de reservas de mesmo nível por instalação. As razões para a adoção dessa hipótese são expostas a seguir:

1. A restrição orçamentária impõe uma limitação na quantidade de reservas disponíveis para suprir todo o conjunto de subestações em caráter emergencial, fato que sugere uma maior aproximação das reservas adicionais em relação às outras subestações demandantes, visando reduzir o tempo de atendimento;
2. A ocorrência de falhas em mais de um equipamento em operação, numa mesma subestação, é assumida como um evento pouco provável. Por conseguinte, a distribuição das reservas em subestações diferentes contribui para ampliar a área de cobertura global da reserva técnica.

As hipóteses consideradas são incorporadas à estrutura do modelo e exercem um poder restritivo sobre a localização das reservas técnicas disponíveis.

Introduzindo todas as hipóteses e premissas no modelo de localização hierárquico, e considerando a função perda, como o negativo da utilidade, expressa por:

$$L(f_j^c) = -E_{\lambda_j} U(f_j) = -\left[K_1 E_{\lambda_j} (U(ip_j)) + K_2 E_{\lambda_j} (U(gi_j)) + K_3 E_{\lambda_j} (U(is_j)) + K_{13} E_{\lambda_j} (U(ip_j)) E_{\lambda_j} (U(is_j)) \right] \quad (5.25)$$

Na qual, a esperança da função utilidade multiatributo é calculada considerando a demanda ponderada pela função probabilidade *a priori* $\pi(\lambda_j)$ na subestação j .

Nesse ponto, pode-se dizer que o problema se resume em minimizar a perda global associada à falha, identificando o melhor conjunto de subestações para a localização das reservas. Em outras palavras, deseja-se definir a alocação apropriada para as reservas técnicas, de modo a minimizar a perda total decorrente da falha de um equipamento em qualquer das instalações.

Destarte, chega-se à expressão 5.26 para a função objetivo v , cuja otimização consiste em minimizar a perda total associada à alocação das reservas técnicas entre as subestações contempladas, segundo os critérios previamente estabelecidos e as regras de hierarquia definidas no modelo:

$$v = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \left[K_1 \sum_{j \in J} E_{\lambda_j} (U(ip_j)) \cdot x_j + K_2 \sum_{j \in J} E_{\lambda_j} (U(gi_j)) \cdot x_j + K_3 \sum_{j \in J} E_{\lambda_j} (U(is_j)) \cdot x_j \right] \\ \left[+ K_{13} \sum_{j \in J} E_{\lambda_j} (U(ip_j)) E_{\lambda_j} (U(is_j)) \cdot x_j \right] \end{array} \right\} \quad (5.26)$$

Onde os parâmetros: K_1 , K_2 , K_3 , e K_{13} são constantes de escala relacionadas aos respectivos atributos, de modo que:

$$\sum_{m=1}^3 K_m + K_{13} = 1 \quad (5.27)$$

Assim como nos modelos precedentes, o parâmetro K_{13} da função utilidade multilinear representa a interação de preferência entre os atributos população e serviços coletivos de saúde para o decisor. Como esses atributos são admitidos complementares, tem-se $K_{13} > 0$.

Sujeito a:

$$\sum_{i \in I} a_{ij} \cdot y_i + \sum_{i \in I} b_{ij} \cdot z_i - x_j \geq 0; j \in J \quad (5.28)$$

$$\sum_{i \in I} c_{ij} \cdot z_i - x_j \geq 0; j \in J \quad (5.29)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p; \quad (5.30)$$

$$\sum_{i \in I} z_i = q; \quad (5.31)$$

$$x_j \in \{0,1\}; \quad (5.32)$$

$$y_i, z_i \in \{0,1\}; \quad (5.33)$$

Em síntese, equação 5.26 apresenta a formulação de um problema de localização hierárquico multiobjetivo de máxima cobertura, cuja agregação desses objetivos é feita mediante a adoção da MAUT na sua estrutura multilinear, e que incorpora a incerteza sobre a demanda de cada instalação, mediante a elicitacão do conhecimento *a priori* sobre a probabilidade equivalente de falhas dessas subestações.

Nas inequações 5.28 e 5.29 observa-se que, para $x_j = 0$ (localidades não cobertas), os somatórios $\sum a_{ij}$, $\sum b_{ij}$ e $\sum c_{ij}$ são todos nulos, a fim de manter a coerência no que torna as desigualdades em igualdades.

As equações 5.30 e 5.31 fixam os quantitativos de reservas do tipo 1 e do tipo 2, respectivamente e contemplam a impossibilidade de alocar mais de uma reserva de mesmo nível hierárquico numa mesma subestação.

As equações 5.32 a 5.33 estabelecem a natureza binária das variáveis de cobertura (x_j) e de alocação (y_i e z_i). A alocação espacial ótima das reservas técnicas fica estabelecida pelos vetores de localidades y_i e z_i que conferem o valor máximo à função objetivo 5.18, na qual o vetor x_j representa as localidades cobertas por esta solução, as quais correspondem aos elementos não nulos desse vetor.

5.2. Conclusão

O modelo de localização hierárquico de máxima cobertura encontra-se bastante difundido na literatura específica sobre localização de instalações, em particular na localização de instalações de serviços de emergência que apresentam um contexto semelhante àquele das reservas técnicas de equipamentos.

Na localização de serviços de emergência, busca-se cobrir a área de demanda, situando os servidores a uma distância na qual a área de demanda fica compreendida pelo raio crítico de atendimento. De modo que essa área seja considerada coberta por pelo menos um dos servidores, supondo que ele esteja disponível quando o serviço é solicitado.

Nos modelos de máxima cobertura, o objetivo é localizar um número pré-especificado de p serviços, de tal forma que a máxima população possível da região em questão esteja coberta a menos de uma distância crítica S também pré-definida.

O problema em estudo consiste em localizar reservas com dois diferentes níveis de serviço, nas quantidades disponíveis (p e q), de modo a maximizar o atendimento à demanda de uma população de equipamentos sujeitos a falhas que operam em subestações dispersas geograficamente, no menor tempo possível pelo estabelecimento de distâncias críticas.

Portanto, a inserção do modelo de localização hierárquico de máxima cobertura (MLHMC), sob a égide da teoria da utilidade multiatributo (MAUT), na formulação da função objetivo, resulta nos seguintes ganhos para o modelo resultante:

- a) A MAUT agrega os critérios que exercem o papel de forças locacionais sobre as reservas técnicas disponíveis, segundo a estrutura de preferências do decisor;
- b) O MLHMC permite considerar os diferentes níveis de serviço dessas reservas e confere o caráter emergencial adequado à natureza do problema.

Assim como no modelo precedente, é considerada a perda parcial de clientes nos três segmentos abrangidos pelos atributos: população, indústrias e serviços de saúde, permitindo uma análise mais equilibrada para a questão aparentemente conflituosa entre:

- Considerar que as SE's com maior número de transformadores apresentam maior propensão à falha e, por isso, exercem maior atratividade pelas reservas;
- Considerar que estas mesmas SE's detêm uma maior capacidade remanescente, no caso da falha de um dos equipamentos; por isso, têm menos força atrativa sobre as reservas.

Além disso, o modelo permite considerar cada transformador individualmente dentro da instalação, de modo que é possível tratar de forma adequada os casos em que se observem transformadores com diferentes capacidades (níveis de serviço) operando em paralelo em uma determinada subestação e as diferentes conseqüências decorrentes das falhas em cada um deles.

6. APLICAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS

Neste capítulo é feita uma aplicação dos modelos propostos em um estudo de caso, baseado em dados reais de um concessionário de serviços públicos de distribuição de energia elétrica, para o qual se deseja obter a alocação espacial ótima das reservas de transformadores de potência visando atender às subestações de uma determinada área geográfica.

6.1. Contextualização do Problema

Ao longo dos anos, a energia elétrica tem se tornado um dos principais propulsores de desenvolvimento econômico e social em todo o mundo. No Brasil, o acesso a esse recurso tem sido uma das metas mais importantes do governo federal. A universalização e qualidade dos serviços relacionados à energia elétrica são consideradas premissas do planejamento do sistema elétrico

Após a reestruturação do setor elétrico brasileiro, com a responsabilidade pela legislação e fiscalização e tendo o objetivo de induzir os agentes do mercado de energia elétrica neste sentido, foi criada, pela Lei 9.427 de 26 de dezembro de 1996, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), autarquia em regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME.

Atualmente, o novo cenário do setor elétrico estabelece índices de qualidade de atendimento cada vez mais severos, os quais estão sendo exigidos em todos os níveis do setor. Além disso, existem regras, que regem a transmissão da energia elétrica, nas quais a remuneração de cada ativo é avaliada com base na disponibilidade.

Os mecanismos regulatórios produzidos pela ANEEL garantem que o mercado possa operar com eficiência e competitividade. Trata-se de um órgão independente que tem como atribuições mediar os conflitos de interesse entre os novos agentes, a regulação e fiscalização do setor (Vance, 2000).

Este novo panorama trouxe novos desafios para os mais diversos segmentos da área. Aspectos relacionados à logística e à gestão dos ativos são integrados na busca de uma maior eficiência do sistema de produção e têm sido fundamentais para assegurar o equilíbrio financeiro num novo ambiente competitivo (e aberto para a entrada de novos agentes), atendendo à premissa da modicidade tarifária para os consumidores cativos.

Neste ambiente em que aspectos de mercado e compromissos sociais têm que ser atendidos ao menor custo e a preços competitivos, a busca contínua da otimização de

processos e recursos faz com que as empresas do setor avaliem seus métodos, desenvolvendo um ambiente de mudança permanente. (Guimarães, 2007).

6.2. Metodologia

O problema de alocação apresentado neste estudo está inserido nesse contexto de otimização de recursos para o atendimento à disponibilidade do serviço de energia elétrica. O problema consiste em determinar os postos mais apropriados a instalação das reservas técnicas dos transformadores de potência, a fim de minimizar a duração da interrupção do serviço decorrente de eventuais falhas nos transformadores que se encontram operando nas subestações do sistema elétrico da concessionária.

Desse modo, busca-se a otimização da manutenibilidade global do sistema de produção em apreço orientada por critérios aderentes à natureza do cliente que é atendido por esse tipo de serviço. Nesse contexto, a alocação das reservas disponíveis é feita de maneira a propiciar a escolha adequada do subconjunto de alternativas mais eficientes, dentre aquelas consideradas viáveis com respeito às restrições impostas por cada modelo adotado.

Cada critério é avaliado, conforme a estrutura de preferência do decisor a ser elicitada por meio de uma função valor que, a depender da formulação de cada modelo, pode representar tanto a função utilidade como a função perda. Não obstante, em todos os modelos apresentados, uma função de agregação dos critérios é adotada para suporte à decisão na forma de uma função multiobjetivo.

No modelo 1, busca-se maximizar a utilidade total que representa a vantagem relativa global que se obtém ao alocar a reserva única disponível numa subestação “j” para atender à demanda estocástica e equiprovável de todas as subestações;

No modelo 2, consideram-se diferentes propensões à falha nas subestações demandantes, devido à existência de quantidades diversas de transformadores nessas instalações, introduzindo a probabilidade instantânea de falha como um fator ponderador da demanda de cada subestação para cada um dos critérios da função utilidade total a ser maximizada. Ou seja, é uma extensão do modelo 1.

No modelo 3, são alocadas múltiplas reservas de diferentes níveis de atendimento, em função de suas capacidades, por meio de um modelo de hierarquização de máxima cobertura que é incorporado numa função perda total que representa a desvantagem relativa de cada subestação quando da perda de um de seus transformadores. Nesse modelo, busca-se minimizar a função perda.

6.3. Abordagem do Problema

O problema consiste na localização das reservas técnicas para atender a um conjunto de subestações, cujas características dos clientes atendidos são traduzidas, conforme ilustrado no quadro a seguir:

Tabela 6.1 - Dados das subestações demandantes

Subestação	Arranjo de transformadores	População atendida	Grau de industrialização (gi)*	Índice de serviços coletivos de saúde (is)
1. Águas Belas (AGB)	2 Trafos de 5MVA	39.421	0,003	0,09
2. Arcoverde (ACV)	2 Trafos de 5MVA	67.458	0,068	0,560
3. Belo Jardim (BLJ)	2 Trafos de 10 MVA	71.000	0,054	0,260
4. Bezerros (BZR)	1 Trafo de 10MVA	58.310	0,040	0,240
5. Bom Conselho (BCO)	1 Trafo de 10MVA	44.991	0,014	0,160
6. Brejo da Madre de Deus (BMD)	1 Trafo de 5MVA	41.898	0,003	0,190
7. Catende (CTD)	2 Trafos de 5MVA	34.907	0,011	0,120
8. Caruarú (CRR)	4 Trafos de 10MVA	297.349	0,629	1,370
9. Garanhuns (GAN)	2 Trafos de 10MVA	130.154	0,135	0,660
10. Ibimirim (IBI)	1 Trafo de 5MVA	21.560	0,001	0,140
11. Pesqueira (PQR)	2 Trafos de 5MVA	63.878	0,065	0,330
12. Santa Cruz do Capibaribe (STC)	2 Trafos de 10MVA	78.410	0,239	0,180
13. Sertânia (SRN)	1 Trafo de 5MVA	34.646	0,017	0,220
14. Toritama (TRT)	1 Trafo de 10MVA 1 Trafo de 5MVA	32.169	0,099	0,090

Fonte: IBGE 2007 e FIEPE 2007/2008*

Obs: Os dados sobre as populações foram baseados em estimativa do IBGE para julho de 2007. Porém, esses dados devem ser normalizados com base no total para obter o indicador populacional (ip). Os dados referentes aos demais atributos (número de indústrias e serviços de saúde) foram divididos por 100 para a obtenção dos valores de gi e is.

As distâncias entre as SE's são compiladas e representadas por meio da matriz distância $|d_{ij}|$ exibida a seguir:

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 126 & 202 & 228 & 133 & 268 & 220 & 198 & 90 & 215 & 166 & 261 & 190 & 238 \\ 126 & 0 & 76 & 162 & 143 & 202 & 192 & 132 & 100 & 85 & 40 & 195 & 74 & 172 \\ 202 & 76 & 0 & 86 & 141 & 126 & 116 & 56 & 93 & 161 & 36 & 119 & 140 & 96 \\ 228 & 162 & 86 & 0 & 181 & 100 & 81 & 30 & 138 & 247 & 122 & 93 & 226 & 70 \\ 133 & 143 & 141 & 181 & 0 & 221 & 156 & 151 & 43 & 307 & 177 & 214 & 286 & 191 \\ 268 & 202 & 126 & 100 & 221 & 0 & 130 & 70 & 178 & 297 & 162 & 83 & 266 & 60 \\ 220 & 192 & 116 & 81 & 156 & 130 & 0 & 60 & 113 & 287 & 152 & 123 & 256 & 100 \\ 198 & 132 & 56 & 30 & 151 & 70 & 60 & 0 & 108 & 227 & 92 & 63 & 196 & 40 \\ 90 & 100 & 93 & 138 & 43 & 178 & 113 & 108 & 0 & 185 & 129 & 171 & 164 & 148 \\ 215 & 85 & 161 & 247 & 307 & 297 & 287 & 227 & 185 & 0 & 125 & 290 & 89 & 267 \\ 166 & 40 & 36 & 122 & 177 & 162 & 152 & 92 & 129 & 125 & 0 & 155 & 104 & 132 \\ 261 & 195 & 119 & 93 & 214 & 83 & 123 & 63 & 171 & 290 & 155 & 0 & 259 & 23 \\ 190 & 74 & 140 & 226 & 286 & 266 & 256 & 196 & 164 & 89 & 104 & 269 & 0 & 239 \\ 238 & 172 & 96 & 70 & 191 & 60 & 100 & 40 & 148 & 267 & 132 & 23 & 239 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

O índice “i” é adotado para identificar cada potencial subestação sede onde pode ser localizada a reserva técnica e o índice “j” para denotar a subestação demandante.

São designados equipamentos do tipo 1, aqueles transformadores de capacidade 5MVA e o tipo 2, contempla os transformadores de 10MVA.

Os vetores correspondentes aos atributos dos clientes atendidos pelas subestações consideradas e de designação dos equipamentos nelas instalados são apresentados a seguir:

$$SE's = | \text{AGB ACV BLJ BZR BCO BMD CTD CRR GAN IBM PQR STC SRN TRT} |$$

$$ip_j = [0.038; 0.066; 0.072; 0.057; 0.044; 0.041; 0.034; 0.293; 0.127; 0.028; 0.062; 0.075; 0.034; 0.030] \quad (6.2)$$

$$gi_j = [0.003; 0.068; 0.054; 0.040; 0.014; 0.003; 0.011; 0.629; 0.135; 0.001; 0.065; 0.239; 0.017; 0.099] \quad (6.3)$$

$$is_j = [0.090; 0.560; 0.260; 0.240; 0.160; 0.190; 0.120; 1.370; 0.660; 0.140; 0.330; 0.180; 0.220; 0.090] \quad (6.4)$$

Os vetores de designação da SE por tipo ou nível de serviço são representados a seguir:

$$\text{Tipo1} = [1; 1; 0; 0; 0; 1; 1; 0; 0; 1; 1; 0; 1; 1] \tag{6.5}$$

$$\text{Tipo2} = [0; 0; 1; 1; 1; 0; 0; 1; 1; 0; 0; 1; 0; 1] \tag{6.6}$$

A partir desse ponto, a metodologia é implementada com auxílio de um programa computacional desenvolvido em linguagem Matlab para a execução dos cálculos referentes a cada modelo, conforme explicitado a seguir:

Inicialmente, são estabelecidos os parâmetros das funções utilidade e as respectivas constantes de escala para a obtenção da função utilidade multiatributo. A fim de permitir uma posterior análise comparativa, os valores são idênticos para todos os modelos sob apreciação.

O procedimento para avaliação de preferências pela função utilidade é descrito por Keeney & Raiffa (1976). No qual, as constantes de escala representam a importâncias relativas entre os critérios; e a utilidade varia rapidamente para os incrementos iniciais no valor dos atributos até se atingir um determinado nível ou limiar, a partir do qual, o decisor começa a se comportar indiferente ao crescimento do atributo, uma vez que as conseqüências da interrupção do serviço são idênticas para grandes valores do atributo sob análise. Como já foi discutido no exemplo da população.

Desse modo, os valores obtidos para estas constantes e parâmetros, mediante elicitacão da utilidade das conseqüências para o decisor, são apresentados no quadro da tabela 6.2:

Tabela 6.2 - Constantes de escala e parâmetros das funções utilidade

K_1	K_2	K_3	K_{13}	A_1	A_2	A_3
0,35	0,3	0,25	0,1	20	25	3

Valores dos parâmetros obtidos por elicitacão de preferências do decisor

Em seguida, ainda como dados de entrada do problema, são elicitadas as probabilidades de falha em cada subestacão, através de um procedimento baseado no método dos intervalos equiprováveis de Raiffa (1970), apoiado pelo aplicativo QUESTPRI, do qual são obtidas as funções *a priori* convenientemente ajustadas pela distribuicão de Weibull, cujos parâmetros são exibidos no quadro da figura 6.3.

Deve ser ressaltado que a subestacão 14 (SE TRT) apresenta dois transformadores de capacidades diferentes operando em paralelo, com abordagens distintas para os modelos 2 e 3.

Tabela 6.3 - Parâmetros da função a priori sobre a propensão à falha das SE's

λ_{SE}	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	λ_{14}^*
η	0.08	0.05	0.06	0.04	0.03	0.03	0.06	0.09	0.06	0.03	0.06	0.05	0.03	0.035 0,025
β	3,000	3,167	3,208	4,000	3,354	3,396	3,723	3,646	3,271	3,021	3,980	3,188	3,542	3,110 3,333

* A subestação 14 (SE Toritama) possui um transformador do tipo 1 e um transformador do tipo 2

Na abordagem do problema, foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- No modelo 1, foi assumido um número igual de transformadores (1 transformador por subestação) operando nas 14 subestações e, por essa razão, não foi inserida a probabilidade de falha desses equipamentos como um fator diferenciador das demandas dessas instalações;

- No modelo 2, a carga está distribuída uniformemente entre os transformadores de cada subestação, independentemente de suas capacidades (impedâncias otimizadas) e se adotada uma probabilidade de falha equivalente para os dois transformadores da subestação 14, a qual é modelada por uma função densidade de probabilidade Weibull, cujos parâmetros de forma e escala, obtidos por elicitación do conhecimento *a priori* do especialista, são $\beta=3,333$ e $\eta=0,060$, respectivamente.

- No modelo 3, foram contemplados os diferentes arranjos das subestações como mostrado na tabela 6.1; bem como, o fato de que a carga está uniformemente distribuída entre os transformadores em operação por subestação, de acordo com suas capacidades (impedâncias otimizadas); foram consideradas as duas possíveis capacidades (níveis de serviço) dos transformadores reservas; e assumindo vetada a alocação de reservas de mesmo nível numa única subestação, pelas razões já expostas quando da formulação desse modelo. Com o objetivo de minimizar o tempo de atendimento, foram estabelecidos os raios de cobertura para cada nível de atendimento e para a subestação 14, os transformadores foram tratados individualmente.

A seguir, na figura 6.1 é apresentado um mapa contendo a distribuição espacial das subestações demandantes da reserva técnica que se encontram situadas na região agreste do estado de Pernambuco. Na parte superior do mapa, são apresentadas as coordenadas georeferenciadas para cada uma das subestações contempladas.

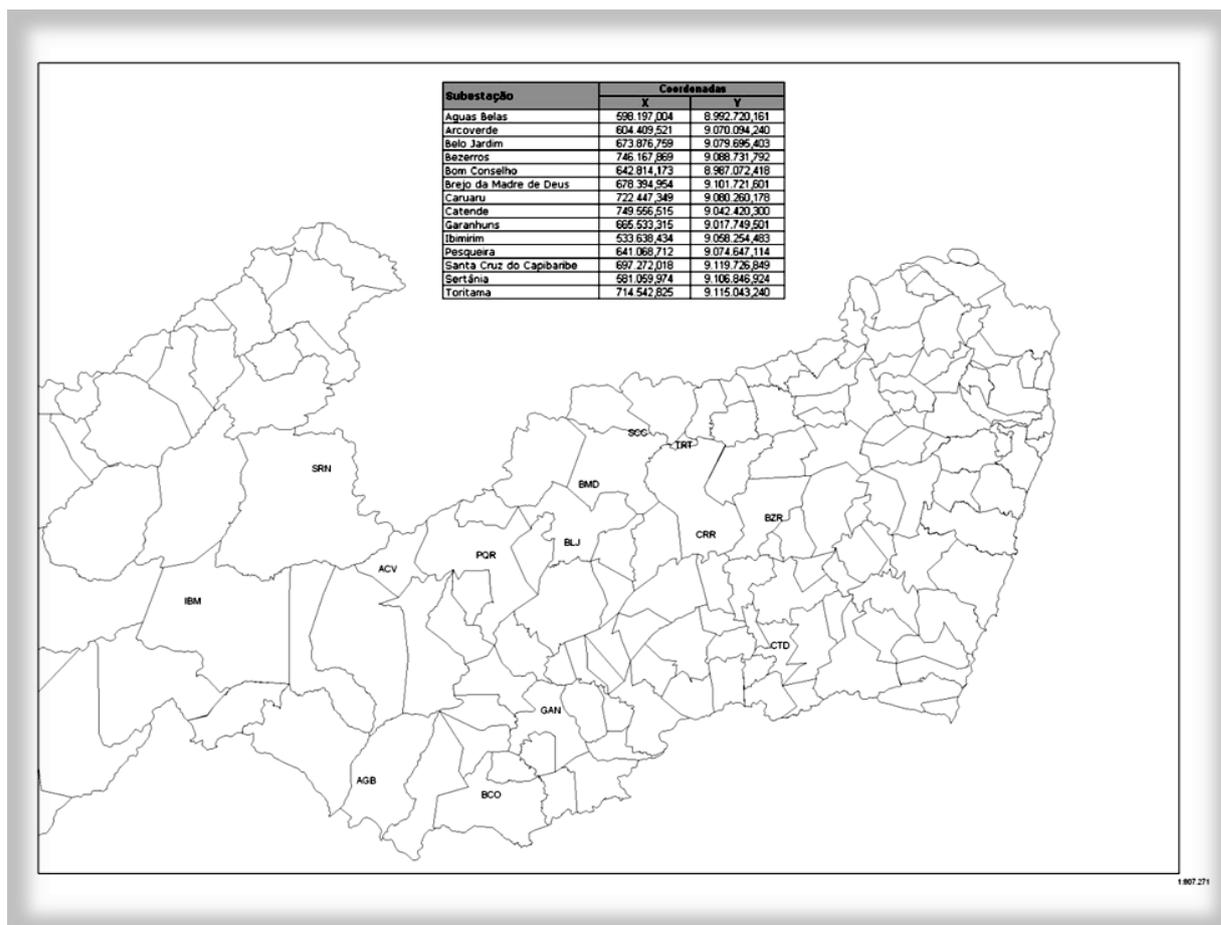


Figura 6.1 - Localização geográfica das subestações demandantes (Fonte:CELPE)

Por inspeção visual do mapa, observa-se que as SE's: BLJ, PQR e GAN ocupam posições geográficas estratégicas por se situarem próximas a todas as demais subestações demandantes, sendo, por essa razão, fortes candidatas a sedes das reservas técnicas.

Não obstante, a agregação dos critérios na função utilidade multiatributo, formulada como base para cada modelo, será decisiva na escolha das subestações (recomendadas) sedes das reservas técnicas, uma vez que existem outras subestações com forte poder de atratividade sobre essas reservas, em virtude dos desempenhos observados sobre os atributos em apreço.

6.4. Resultados obtidos

A seguir são apresentados os resultados numéricos correspondentes às soluções eficientes, que foram obtidos a partir da aplicação de cada um dos modelos apresentados para o conjunto de subestações contemplado. O anexo 1 apresenta as rotinas de cálculo em linguagem matlab para os modelos em apreço.

6.4.1. Aplicação do Modelo 1

Os valores da utilidade total correspondentes à alocação da reserva única em cada uma das 14 subestações são calculados por meio do *software* matlab e exibidos na tabela 6.4:

Tabela 6.4 - Tabulação dos Resultados do Modelo 1

	AGB	ACV	BLJ	BZR	BCO	BMD	CTD	CRR	GAN	IBI	PQR	STC	SRN	TRT	Ut _j
1	AGB	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,19
2	ACV	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,42
3	BLJ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,04
4	BZR	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,64
5	BCO	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9,49
6	BMD	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	9,85
7	CTD	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10,06
8	CRR	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	11,53
9	GAN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10,63
10	IBI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	8,93
11	PQR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	10,69
12	STC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	10,27
13	SRN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9,13
14	TRT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10,69

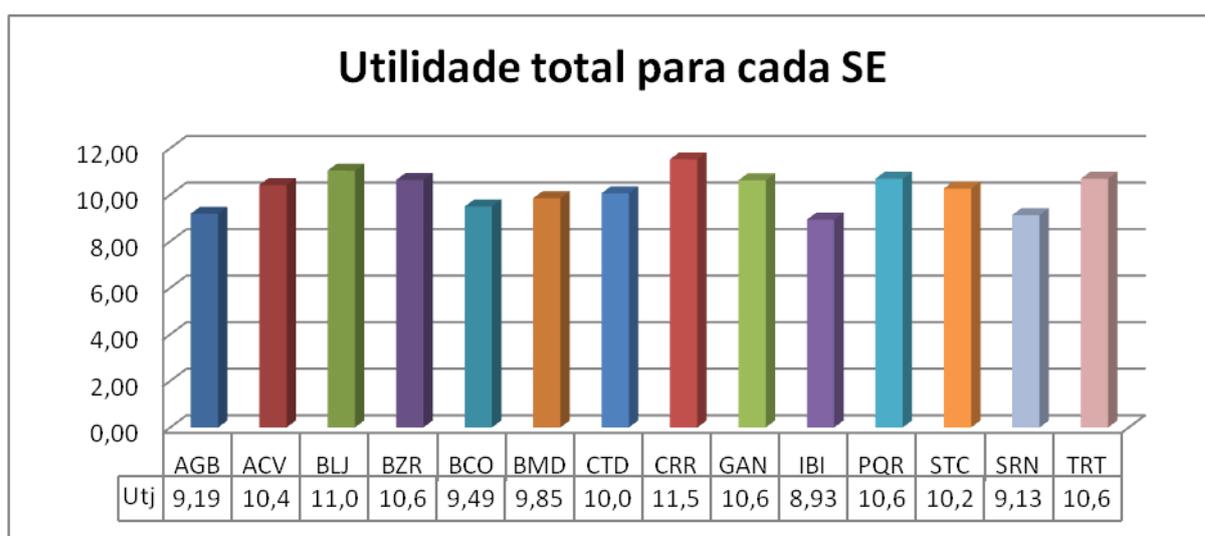


Figura 6.2 - Representação gráfica das soluções viáveis do Modelo 1

Alternativamente, aplicando-se o SAD ALOCA, desenvolvido para o mesmo modelo em pauta, chega-se aos seguintes resultados que são apresentados pela tela do aplicativo exibida na figura 6.3:

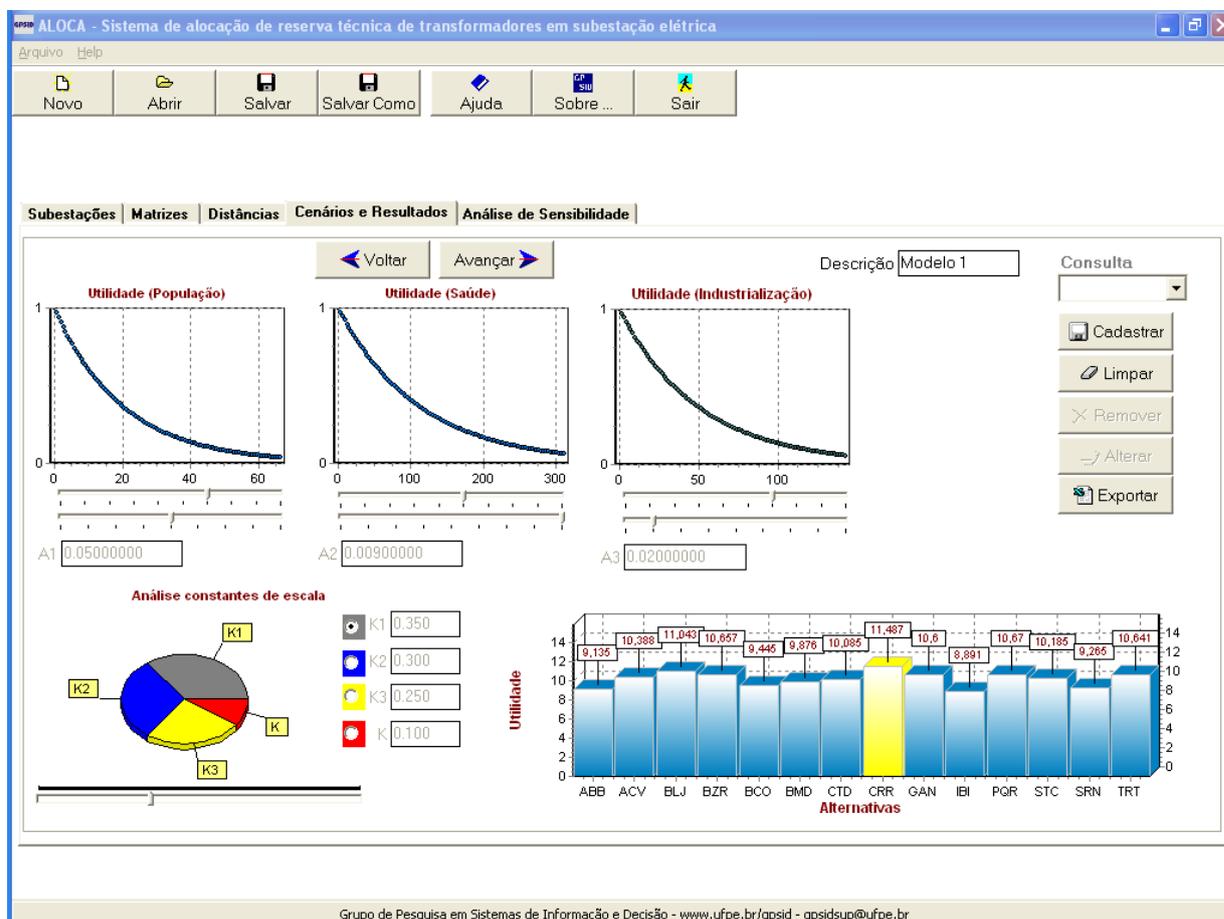


Figura 6.3 - Representação das soluções viáveis do Modelo 1 utilizando o ALOCA

O modelo 1 retorna a subestação Caruaru como a solução eficiente para a alocação da reserva única por esta apresentar a maior utilidade total dentre todas as SE's consideradas, seguida pela subestação de Belo Jardim (BLJ) que ocupa uma posição geográfica mais central.

Tal resultado já era esperado, uma vez que esta SE apresenta maior valor de utilidade para todos os critérios considerados no âmbito deste estudo, em que pese a sua localização não ser a mais adequada.

A repercussão de uma falha na subestação de Caruaru tem uma conotação bastante crítica e compromete a imagem da concessionária perante a opinião pública, além de suscitar sérias penalidades impostas pelo órgão regulador.

6.4.2. Aplicação do Modelo 2

A função utilidade total para o modelo alternativo 2 apresenta os seguintes valores mostrados no quadro e gráfico a seguir, para cada subestação considerada no estudo:

Tabela 6.5 - Tabulação dos Resultados do Modelo 2

	AGB	ACV	BLJ	BZR	BCO	BM	CTD	CRR	GA	IBI	PQR	STC	SRN	TRT	U _{tj}
1	AGB	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,347
2	ACV	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,394
3	BLJ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,426
4	BZR	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,418
5	BCO	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,359
6	BMD	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,375
7	CTD	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,389
8	CRR	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,447
9	GAN	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,404
10	IBI	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,333
11	PQR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,408
12	STC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,395
13	SRN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,346
14	TRT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,417

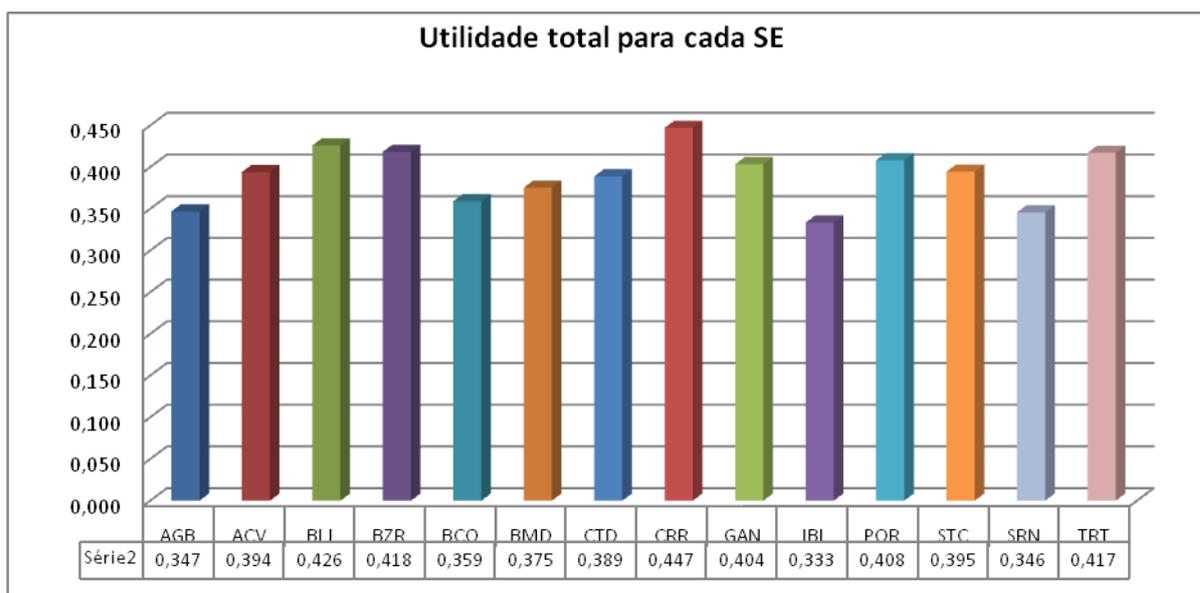


Figura 6.4 - Representação gráfica das soluções viáveis do Modelo 2

Como pode ser observado, a exemplo do Modelo 1, o Modelo 2 também retorna a subestação de Caruaru (CRR) como a solução eficiente do problema de localização da reserva única. Ainda neste caso, a subestação de Belo Jardim (BLJ) se mantém em segundo lugar, apresentando um valor de utilidade total próximo ao da primeira colocada. Esse fato que pode ser interpretado da seguinte forma:

A falha em uma dos transformadores da SE CRR não compromete o total de carga suprido por esta subestação, uma vez que os 3 (três) transformadores remanescentes podem atender a 75% da carga original; enquanto que a falha em um dos transformadores da SE BLJ reduz a capacidade de suprimento daquela subestação a 50% da carga total, em razão desta instalação dispor de apenas 1 (um) transformador remanescente.

De fato, a subestação de Belo Jardim apresenta uma posição estratégica mais apropriada para atender ao grupo de subestações demandantes, porém a importância relativa da SE CRR é amplamente superior a de qualquer outra em todos os critérios e, desse modo, atrai a reserva técnica com muita intensidade para o seu interior.

Nesse sentido, é intuitivamente evidente a necessidade de se dispor de outras unidades reservas para localização, uma vez que a SE CRR apresenta forte atratividade sobre a única reserva disponível e sua localização não beneficia o atendimento daquelas instalações situadas em posições mais distantes.

6.4.3. Aplicação do Modelo 3

Visando, em primeira instância, resolver a questão da proximidade da reserva em relação às subestações demandantes e, em segundo lugar, ampliar a cobertura dessas reservas mediante a restrição do uso de reservas de mesmo nível apenas em subestações distintas, o modelo 3 aborda o problema da alocação de múltiplas reservas com níveis (capacidades) diferentes para atender às 14 subestações do sistema abrangidas pelo estudo.

Para o estudo de caso, considera-se um transformador reserva Tipo 1 (5MVA), $p=1$, e dois transformadores reservas Tipo 2 (10MVA), $q=2$, para atender às demandas estocásticas de falhas nas 14 subestações com raios de cobertura: $R_{11}=150\text{km}$, $R_{21}=75\text{km}$ e $R_{22}=130\text{km}$.

O modelo de localização hierárquico de máxima cobertura apresenta uma grande variedade de soluções viáveis, N , que pode ser quantificado, para o caso específico em estudo, em que $n=14$, $p=1$ e $q=2$, pela expressão a seguir:

$$N = \binom{14}{2} \cdot \binom{14}{1} = 1274 \quad (6.7)$$

Onde N indica o número de soluções viáveis.

O modelo 3, com o auxílio do programa computacional, retorna 2 (duas) soluções eficientes que correspondem às combinações de ordem 140 e 162, as quais resultam num valor próximo de -2.4 para a função perda e cobrem todas as subestações demandantes:

Solução N. 140

Tipo 1: [0; 1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0] (SE ACV)

Tipo 2: [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 1; 1; 0; 0; 0; 0; 0] (SE CRR e SE GAN)

e

Solução N. 162

Tipo 1: [0; 1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0] (SE ACV)

Tipo 2: [0; 0; 0; 0; 0; 1; 0; 0; 0; 1; 0; 0; 0; 0; 0] (SE BCO e SE CRR)

De fato, a aplicação do modelo 3 retorna a nuvem de soluções viáveis representadas graficamente, conforme mostrado na figura 6.5 a seguir:

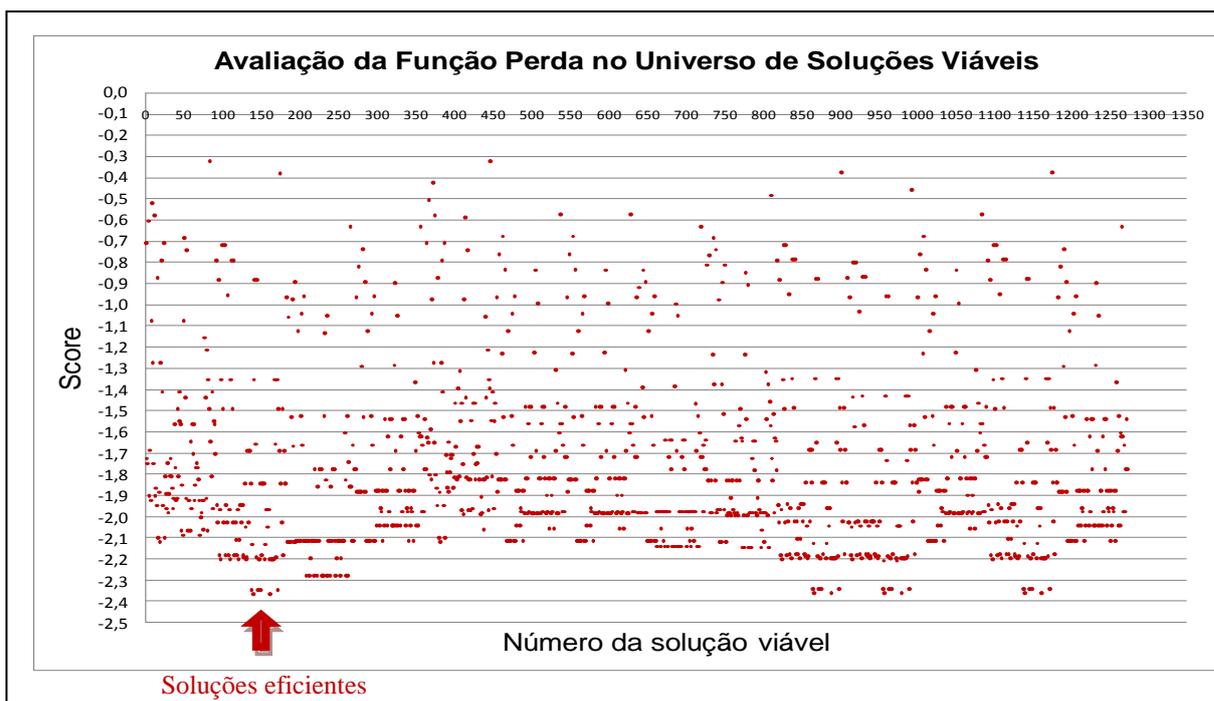


Figura 6.5 - Representação Gráfica das soluções viáveis do Modelo 3

Destarte, é confirmada a alocação de um transformador reserva do Tipo 2 na subestação de Caruaru, devido à já discutida importância relativa desta subestação, sendo as demais reservas alocadas nas seguintes subestações:

- As subestações de Garanhuns ou Bom Conselho são as opções para a alocação da segunda reserva do Tipo 2, de modo a propiciar aproximação com as demais subestações e, por conseguinte, ampliar o raio de cobertura dessa modalidade de reserva;
- Arcoverde é a subestação contemplada pela única reserva do Tipo 1, em virtude de sua posição geográfica estratégica e da sua maior importância dentre as SE's constituídas por transformadores com essa designação.

6.5. Análise de Sensibilidade dos Resultados

Para cada modelo considerado, deve ser analisada a sensibilidade dos resultados obtidos em relação aos parâmetros e constantes de escala adotados com vistas a avaliar a robustez desses modelos ou, por outro lado, identificar quais os elementos do modelo que conferem maior influência sobre os resultados.

6.5.1. Análise de Sensibilidade do Modelo 1

O modelo 1 apresenta 4 (quatro) constantes de escala (K_1 , K_2 , K_3 e K_{13}) e 3 (três) parâmetros de função utilidade exponencial negativa (A_1 , A_2 e A_3) para os quais se deve analisar a sensibilidade do modelo.

Isto posto, são realizadas um total de 7 (sete) análises de sensibilidade dos resultados para variações de até $\pm 20\%$ nos referidos elementos do modelo.

O modelo se mostra suficientemente robusto para as variações impostas aos seus elementos, conforme mostra a tabela 6.6 da análise de sensibilidade pelo programa matlab:

Tabela 6.6 - Análise de sensibilidade do Modelo 1

Constante de Escala Parâmetro	Não Sensível para variações de até (limitado a $\pm 20\%$)	
K_1	-20%	+20%
K_2	-20%	+20%
K_3	-20%	+20%
K_{13}	-20%	+20%
A_1	-20%	+20%
A_2	-20%	+20%
A_3	-20%	+20%

Faixa de variação admissível sem mudança na solução eficiente

A análise de sensibilidade do modelo 1 conduz a alterações de ordem entre as SE's apenas nas posições intermediárias sem afetar a escolha da solução eficiente, tendo em vista o perfil dos clientes da SE Caruaru ser amplamente superior em utilidade ao das demais subestações para todos os critérios considerados.

Resultados semelhantes são obtidos quando da utilização do aplicativo ALOCA para a análise de sensibilidade do modelo 1, conforme mostrado nas figuras a seguir:

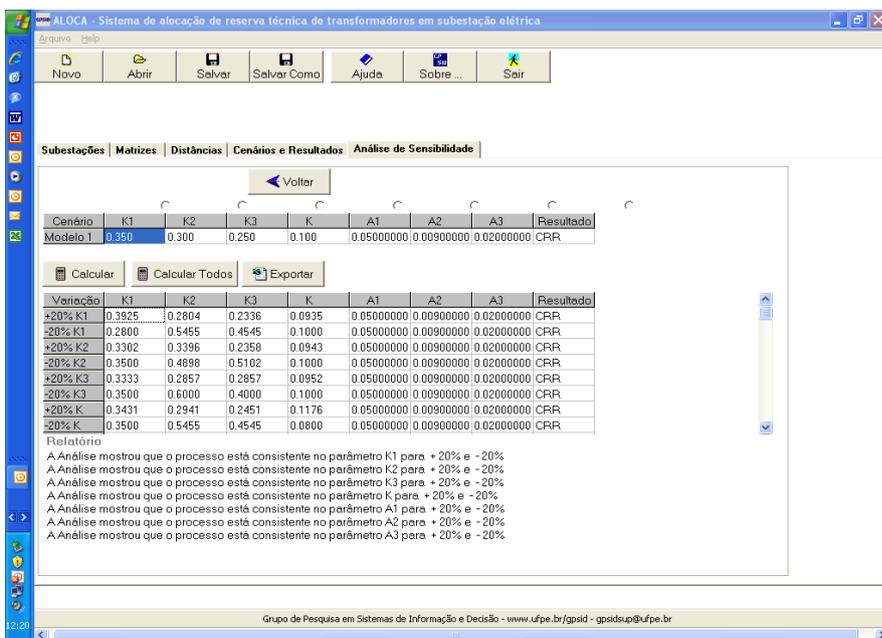


Figura 6.6 - Análise de sensibilidade do Modelo 1 pelo SAD ALOCA

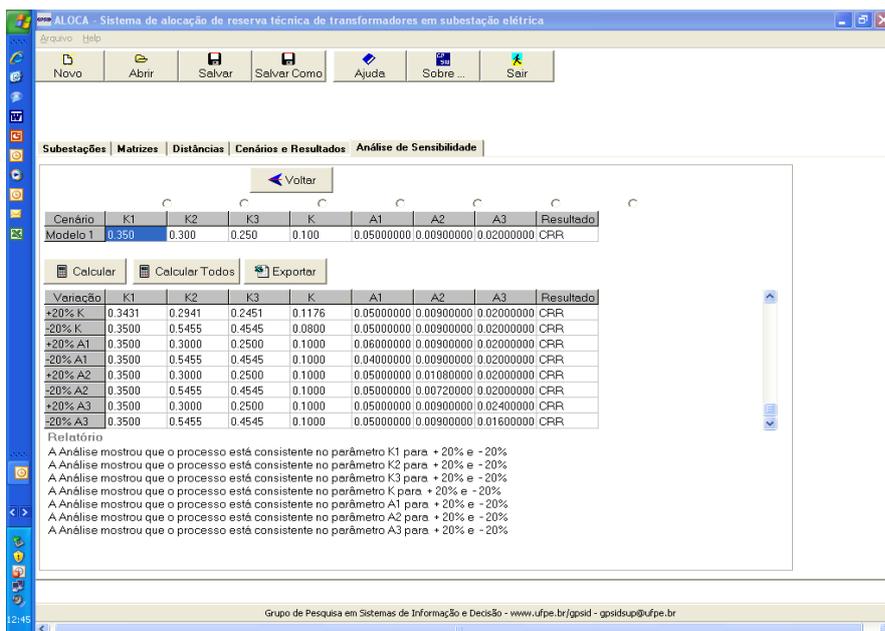


Figura 6.7 - Análise de sensibilidade do Modelo 1 pelo SAD ALOCA (continuação)

6.5.2. Análise de Sensibilidade do Modelo 2

O modelo alternativo 2 possui, além dos 7 (sete) elementos tratados no modelo anterior, 2 (dois) parâmetros referentes à cada uma das funções a priori sobre a probabilidade de falha para as 14 (quatorze) subestações demandantes, das quais são escolhidas aquelas que representam as potenciais candidatas à alocação da reserva, considerando as correspondentes localizações geográficas e importâncias relativas em relação aos critérios considerados.

Desse modo, são conduzidas as análises de sensibilidade sobre os parâmetros de forma (β) e de escala (η) das subestações de BLJ, CRR, GAN e PQR, perfazendo 8 (oito) elementos sujeitos a análise num total de 15 (quinze).

A tabela 6.7 apresenta os resultados obtidos da análise de sensibilidade sobre as constantes de escala e parâmetros envolvidos no modelo alternativo 2:

Tabela 6.7 - Análise de Sensibilidade do Modelo 2

K_1		K_2		K_3		K_{13}	
-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%
A_1		/	A_2		/	A_3	
-20%	+20%		-20%	+20%		-20%	+20%
λ_3				λ_8			
β_3		η_3		β_8		η_8	
-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%
λ_9				λ_{11}			
β_9		η_9		β_{11}		η_{11}	
-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%

Varição permissível nos parâmetros sem afetar o resultado

Diante do exposto no quadro em apreço, pode-se concluir que o modelo alternativo para alocação de reserva única mantém a robustez do modelo anterior, confirmando a supremacia da subestação de Caruaru sobre as demais instalações pelas razões expostas nas análises anteriores. Não obstante, durante as análises de sensibilidade as subestações de Bezerras, Pesqueira e Toritama aparecem como opções, assim como Belo Jardim, se alternando entre a segunda e a terceira colocações.

Deve ser observado que as SE's BLJ e BZR estão localizadas quase que equidistantes da SE CRR e detêm peculiaridades que as credenciam para assumir uma boa posição no *ranking* das candidatas, como mostra a análise de sensibilidade: a SE BLJ oferece a melhor situação do ponto de vista de localização geográfica e a SE BZR dispõe de apenas um transformador em operação, cuja falha compromete o atendimento a toda a clientela desta SE.

6.5.3. Análise de Sensibilidade do Modelo 3

O modelo hierárquico de máxima cobertura para alocação de transformadores reservas proposto neste trabalho possui 3 (três) raios de cobertura para os diferentes níveis de atendimento, além dos 7 (sete) elementos tratados no modelo 1 e dos 8 (oito) parâmetros adicionais referentes às funções a priori para as subestações escolhidas no modelo 2, perfazendo um total de 18 (dezoito) elementos sujeitos a análise.

A tabela 6.8 apresenta os resultados obtidos da análise de sensibilidade sobre as constantes de escala e aqueles parâmetros escolhidos do modelo de localização hierárquico de máxima cobertura:

Tabela 6.8 - Análise de Sensibilidade do Modelo 3

K_1		K_2		K_3		K_{13}	
-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%
A_1		/	A_2		/	A_3	
-20%	+20%		-20%	+20%		-20%	+20%
λ_3				λ_8			
β_3		η_3		β_8		η_8	
-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%
λ_9				λ_{11}			
β_9		η_9		β_{11}		η_{11}	
-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%
R_{11}		/	R_{21}		/	R_{22}	
+10%	-15%		+15%	-5%		+2%	-20%

Variação permissível nos parâmetros sem afetar o resultado

A análise de sensibilidade revela que, para os mesmos elementos do modelo alternativo de alocação de reserva única de transformadores, os quais foram obtidos da interação com

decisores e especialistas, os resultados se mantêm inalterados, ou seja, o modelo retorna sempre o mesmo conjunto de soluções eficientes para a faixa de variação considerada.

Quando da análise de sensibilidade sobre os raios de cobertura, os resultados se alteram conforme era de se esperar, uma vez que esses elementos têm a conotação de “capacidade de atendimento do conjunto de reservas”, posto que a variação dos mesmos implica numa mudança no conjunto de localizações capazes de atender à demanda.

Portanto, ao se variar um dos raios de cobertura, modificam-se as restrições do problema, refletindo diretamente na capacidade de atendimento do sistema, o que leva a obtenção de novos cenários para o conjunto de soluções eficientes. A rigor, na sua essência, trata-se de um modelo originado da abordagem do problema de localização de máxima cobertura, para o qual a solução ótima da função objetivo depende do raio de cobertura estabelecido.

6.6. Conclusão

Em conclusão, percebe-se que as reservas técnicas de transformadores foram alocadas em subestações que se apresentavam como potenciais candidatas, desde o início do estudo, comprovando que o modelo foi coerente com as premissas sob as quais fora concebido e a análise de sensibilidade reforça a sua aplicação em que pese as diferenças de estilo cognitivo e de propensão ao risco do decisor.

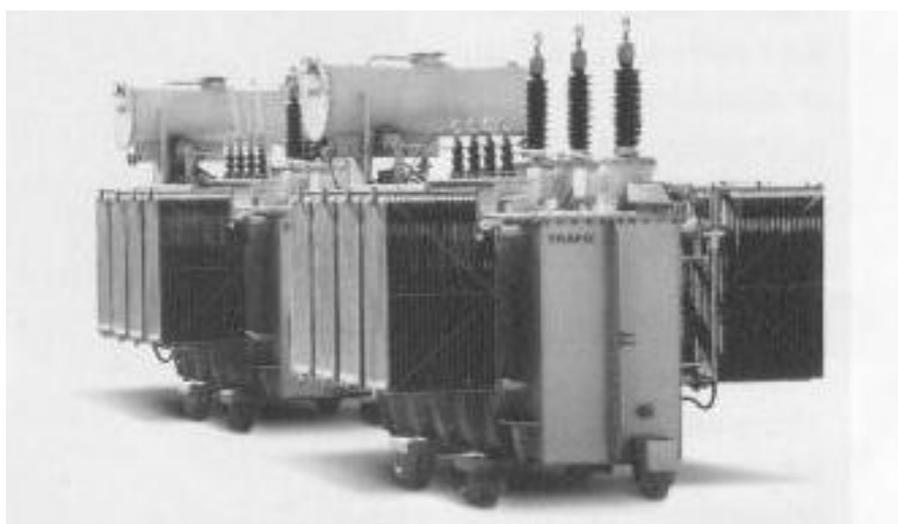


Figura 6.8 - Transformadores reservas para alocação (fonte: CELPE)

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1. Conclusões

Neste trabalho, o problema de alocação de equipamentos reservas foi tratado como um problema de decisão. A escolha do melhor conjunto de soluções é realizada através de um modelo base que considera a estrutura de preferências do decisor, fundamentado na teoria da utilidade multiatributo (MAUT), ao qual se incorporam progressivamente: a inferência Bayesiana na elicitação do conhecimento *a priori* de especialistas para a modelagem probabilística da confiabilidade do sistema e a estrutura do modelo de localização hierárquica de máxima cobertura.

O estudo visa estabelecer um adequado nível de manutenibilidade global para o sistema elétrico composto por diversas instalações, mediante a alocação de um número limitado de equipamentos reservas em um subconjunto dessas instalações, com vistas à redução dos tempos de interrupção do serviço, e atendendo a critérios previamente estabelecidos para a obtenção da disponibilidade ótima do serviço prestado pelo sistema de produção a um custo compatível, sob o enfoque de utilidade.

Os modelos de alocação de transformadores reservas apresentados neste trabalho enfatizam aspectos relevantes que dizem respeito à natureza da carga a ser atendida, tais como: o tamanho da população, o grau de industrialização e o número de serviços coletivos de atendimento à saúde na área de demanda de cada subestação, os quais representam atributos relacionados ao objetivo disponibilidade do serviço.

A distância da reserva técnica em relação às subestações demandantes se apresenta ora como uma dimensão do objetivo custo, quando é considerado o efeito econômico que este atributo causa sobre a organização e, mais ainda, sobre a sociedade em geral por ocasião da interrupção do serviço de energia; e ora se apresenta como uma dimensão do objetivo disponibilidade do serviço, quando é vista como um atributo relacionado ao tempo de atendimento e recomposição do sistema.

A função utilidade multiatributo é empregada na agregação dos critérios associados a esses objetivos, e o conjunto de ações é aferido, segundo a estrutura de preferência do decisor, na forma de uma função multiobjetivo, cuja utilidade total deve ser maximizada (ou a perda total minimizada) pelas soluções eficientes do conjunto de soluções viáveis, de acordo com a formulação da função objetivo de cada modelo empregado.

O modelo 1 é aplicado para a alocação de reserva única e considera, como hipótese simplificadora, que cada instalação apresenta a mesma propensão à falha e, desse modo, visa alocar a reserva naquela subestação que apresente a melhor condição para atender aos critérios estabelecidos em relação a todo o universo de subestações demandantes.

Para fins práticos, a aproximação considerada por esse modelo pode ser assumida como válida em casos de subestações com o mesmo número de equipamentos ou quando se considera que a taxa de falha desses equipamentos, para os eventos que representam a indisponibilidade do trafo por longo prazo, é tão baixa que a diferença na quantidade dos transformadores entre as instalações demandantes se torna pouco significativa.

A análise de sensibilidade demonstra que o modelo é bastante robusto, uma vez que variações de até 20% nos valores dos elementos constituintes da função objetivo não afetaram o resultado final. Isso se deve ao fato de existir uma subestação, cuja área de demanda contempla os clientes com a maior valoração em utilidade para todos os critérios definidos.

O modelo alternativo 2 é formulado como uma extensão do modelo anterior e também se aplica a alocação de reserva única. Esse modelo considera um novo elemento que representa a propensão à falha de cada subestação, por meio da elicitación do conhecimento *a priori* de especialistas sobre o parâmetro de confiabilidade. Dessa forma, o modelo 2 incorpora a incerteza na demanda por reserva de cada SE e, por conseguinte, na ponderação de cada critério, mediante o cálculo da sua esperança em utilidade.

A agregação dos valores esperados das utilidades para cada critério retorna a função utilidade multiatributo, cuja soma para cada uma das subestações candidatas deve ser maximizada, de modo a alocar a reserva naquela subestação que apresente a melhor solução de compromisso dentre aquelas que compõem o universo de subestações demandantes. Além disso, permite considerar falhas parciais em subestações que possuem um maior número de transformadores, atenuando os efeitos da falha na avaliação da utilidade para esse tipo de consequência.

Neste modelo, é feita uma aproximação ao assumir as potências dos transformadores iguais em todas as subestações e este aspecto reflete na divisão de carga quando da falha de um dos transformadores.

O uso da função probabilidade equivalente de falha *a priori* no cálculo do valor esperado da utilidade para cada critério introduz a incerteza no tratamento da demanda e os erros cometidos nesse procedimento são inerentes à vagueza das respostas do especialista.

O terceiro modelo proposto neste trabalho é destinado à alocação de reservas múltiplas e adota uma adaptação do modelo de localização hierárquico de máxima cobertura para serviços de emergência que foi concebido originalmente para contemplar situações onde as facilidades são localizadas em *sites* fixos e os clientes são deslocados até elas, de acordo com o nível de serviço desejado. No caso do modelo proposto, a alocação de transformadores reservas é feita considerando que esses equipamentos serão deslocados até as instalações demandantes, levando em conta as restrições impostas pelos raios de cobertura definidos para os diferentes níveis de serviço.

Cada subestação tem seu mérito avaliado mediante uma função perda total, a qual se busca minimizar, cujo valor representa a desvantagem global decorrente da escolha pela localização da reserva técnica no interior dessa instalação para atender ao conjunto de subestações demandantes.

Neste modelo também se considera a possibilidade de falha parcial, e a configuração com transformadores de capacidades diferentes operando em paralelo numa subestação pode ser tratada de forma mais precisa e realista.

Vale salientar que os modelos anteriores podem ser obtidos a partir de adaptações do modelo 3 para situações em que se dispõe de uma única reserva, cujo raio de cobertura é superior à maior das distâncias entre as SE's envolvidas e os transformadores das subestações são de mesma capacidade (modelo 2) ou, quando além dessa simplificação, verifica-se o mesmo número de equipamentos operando nas SE's demandantes (modelo 1) e os critérios são ponderados pela distância.

Os resultados obtidos da aplicação dos modelos se mostraram coerentes com as expectativas iniciais para o conjunto de instalações contemplado, considerando a existência de subestações detentoras de alto mérito quando da avaliação pelos critérios relacionados ao objetivo da disponibilidade do serviço; além disso, os resultados também foram consistentes na análise de sensibilidade realizada sobre os parâmetros, cujos valores foram obtidos por elicitação. Ou seja, os modelos foram robustos para as variações produzidas sobre aqueles elementos de natureza subjetiva.

Nas análises de sensibilidade dos modelos 2 e 3 foram consideradas as influências sobre os resultados da função objetivo quando da variação dos parâmetros ponderadores de demanda daquelas SE's que ocupam localizações estratégicas e que poderiam alterar o conjunto de soluções eficientes. Entretanto, os modelos se mostraram robustos para a faixa de variação estabelecida desses parâmetros.

Mesmo no caso do modelo 3, por ocasião da análise de sensibilidade sobre os raios de cobertura, os resultados obtidos incorporaram novas subestações ao conjunto de soluções eficientes, sem descartar as subestações recomendadas nos conjuntos de soluções eficientes originais, na maioria dos casos em que esse modelo se mostrou sensível.

Esses fatos corroboram com a idéia de que os modelos podem ser aplicados para quaisquer outros conjuntos de instalações e se constituem como ferramentas bastante úteis no apoio à decisão, uma vez que incorporam a estrutura de preferência do decisor, mediante uma abordagem multicritério adequada à natureza do problema sob estudo.

7.1.1 Restrições dos Modelos

Na formulação do problema, foram adotadas certas considerações de ordem técnica, no intuito de preservar os níveis de confiabilidade do sistema de produção e simplificar o procedimento de cálculo, sem comprometer a eficácia dos modelos para os objetivos específicos. Essas considerações são descritas de forma sucinta, como segue:

- Os transformadores não devem operar em regime de contingência (sobrecarga);
- O sistema de distribuição de energia deve ser tratado como radial, sem admitir a transferência de carga entre as SE's demandantes ou para SE's externas a área de estudo, de modo a não causar situações de contingência nas linhas e equipamentos.

Além dessas premissas, outras hipóteses foram assumidas, conforme apresentado na tabela 7.1:

Tabela 7.1 - Hipóteses de cada Modelo

Hipótese considerada	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1. As distâncias entre as SE's são iguais em ambos os sentidos de percurso (Não se consideram rotas alternativas).	SIM	SIM	SIM
2. Todas as SE's têm a mesma quantidade de transformadores em operação.	SIM	NÃO	NÃO
3. A propensão à falha de cada transformador é considerada na modulação da demanda.	NÃO	SIM	SIM
4. A falha em um transformador afeta toda a carga atendida pela SE.	SIM	NÃO	NÃO
5. A carga atendida pela SE é dividida proporcionalmente entre cada transformador de acordo com a potência do equipamento.	NÃO	NÃO	SIM
6. Existe apenas uma única reserva.	SIM	SIM	NÃO
7. A reserva técnica, depois de alocada, poderá atender a qualquer SE	SIM	SIM	NÃO
8. Cada SE só pode ser contemplada por uma única reserva de cada tipo.	SIM	SIM	SIM

7.2. Sugestões Para Futuros Trabalhos

Na formulação dos modelos apresentados neste trabalho, hipóteses foram assumidas para favorecer a obtenção das soluções por meio de um programa computacional que utiliza uma linguagem procedural. Como sugestões para futuros trabalhos nesta mesma linha de pesquisa e visando ampliar a abrangência dos modelos apresentados, podem ser considerados os seguintes estudos complementares:

1. Desenvolvimento de um SAD aplicado ao problema de localização hierárquico de transformadores reservas abordado neste trabalho;
2. Abordagem do problema de localização hierárquico de múltiplas reservas técnicas contemplando novos cenários, tais como:
 - A possibilidade de mais de uma reserva de cada tipo por localidade;
 - A inclusão de rotas alternativas entre as SE's demandantes e das condições de trafegabilidade das rodovias e acessos;
 - A inserção de restrições de ordem espacial para a localização de reservas em algumas das SE's demandantes etc.
3. Tratamento conjunto do problema de dimensionamento-alocação-roteamento das reservas técnicas e desenvolvimento de um SAD para o mesmo;
4. Modelagem probabilística das falhas dos transformadores e das reservas técnicas com base no estado operativo, de modo a tornar o modelo exaustivo no que concerne ao parâmetro de confiabilidade desses ativos e inserir a incerteza sobre o atendimento.
5. Modelagem dos aspectos dinâmicos relacionados com as possíveis mudanças na distribuição da demanda pela rede. Mediante essa nova abordagem do problema, incorporar as situações de operação em regime de contingência.

O problema da localização de ativos, em especial a alocação de reservas técnicas no contexto do planejamento da manutenção, notadamente nas plantas de serviço, constitui um campo fértil para receber novas contribuições com variados enfoques, pois a sua importância é indiscutível na consecução dos objetivos relacionados à satisfação dos clientes internos e externos de uma organização.

Ao fim, espera-se que este trabalho possa ter propiciado algum subsídio aos futuros estudos no âmbito da engenharia de manutenção que façam uso da Teoria da Localização como mais uma ferramenta de suporte à definição da logística concernente ao planejamento de recursos na área de manutenção.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A T; CAVALCANTE, C. A. V.; FERREIRA, R. J. P.; FERREIRA, H. L.; MEDEIROS, L. H. A. de. Location of Back-up Transformers. In: *IEEE International Engineering Management Conference*. Salvador, 2006, v.1. p. 300-302.
- ALMEIDA, A. T. de; COSTA, A. P. C. S; MELO, C. S. L. Função Utilidade Multiatributo aditiva aplicada em decisão na manutenção. In: *ENEGEP 97 Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Gramado, Rio Grande do Sul, 1997.
- ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. (Org.). *Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*. Recife: Editora Universitária, 2003. v. 1., 154p.
- ALMEIDA, A. T. de & SOUZA, F. M. C. *Gestão da Manutenção; na direção da Competitividade*. 1.ed. Recife, Editora Universitária, 2001.
- ALMEIDA, L. M. W. *Desenvolvimento de uma metodologia para análise locacional de sistemas educacionais usando modelos de interação espacial e indicadores de acessibilidade*. Florianópolis, 1999. 172p. (Doutorado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina).
- ALMINYANA, M.; BORRÁS, F.; PASTOR, J. T. A new directed branching heuristic for the *pq*-median problem. *Location Science*, vol. 6, pp. 1-23(23), 1998.
- ANDERSSON, G.; FRANCIS, R. L.; NORMARK, T.; RAYCO, M. B. Aggregation method experimentation for large-scale network location problems, *Location Science*, 1998, vol.6, pp. 25-39.
- ASHAYERI, J. & RONGEN, J. M. J. A Central Distribution. In *Europe: A Multi-Criteria Approach to Location Selection. The International Journal of Logistics Management*, vol.8, n.1, pp. 97-109, 1997.
- ASSIS, R. *Apoio à Decisão em Gestão da Manutenção; Fiabilidade e Manutenibilidade*. Lisboa, Ed. Lidel, 2004.
- ASSUNÇÃO, T. C. B. N. Contribuição à Modelagem e Análise do Envelhecimento em Transformadores de Potência. Belo Horizonte, 2007. 207p. (Doutorado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais).
- BADRI, M. A. Combining the analytic hierarchy process and goal programming for global facility location-allocation problem. *International Journal of Production Economics*. United Arab Emirates, vol. 62, n. 3, pp. 237-248, 1999.
- BALINSKI, M. *Integer programming: methods, uses, computation*. Management Science, 1965. vol.12, pp.254-313.
- BALLOU, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento, Organização e Logística Empresarial*. 5 ed. Porto Alegre, Bookman, 2006.

- BARCELO, J. & CASANOVAS, J. A heuristic lagrangian for the capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 110, pp. 199-214, 1984.
- BARROS, V. F. de A. & MENEZES J. E. Estudos de Confiabilidade na Modelagem de Sistemas. In: *I SIMPOETS*. CEFET-GO, 2008. pp. 86-103.
- BELARDO, S.; HARRALD, J., WALLACE, W. A.; WARD, J. A partial covering approach to siting response resources for major maritime oil spills. *Management Science*, vol.30, pp. 1184-1196, 1984..
- BERMAN, O.; DREZNER, Z.; WESOLOWSKY, G. O The maximal covering problem with some negatives weights. *Geographical Anaysis*, vol. 41, pp. 30-42, 2009.
- BERMAN, O. & GAVIOUS, A. Location of terror response facilities: A game between state and terrorist, *European Journal of Operation Research*, vol.177, pp.1113-1133, 2007.
- BERMAN, O.; HODGSON, M. J.; KRASS, D. Flow interception problems In: Drezner, Z., ed. *Facility Location: A survey of Applications and Methods*. New York, Springer, 1995, pp. 389-426.
- BERMAN O. & KRASS D. Flow intercepting spatial interaction model: a new approach to optimal location of competitive facilities, *Location Science*, 1998, vol. 6, pp. 41-65.
- BERTUGLIA, C. S.; LEONARDI, G.; OCCELI, S.; RABINO, G. A.; TADEI, R. & WILSON, A. G. *A historical review of approaches to urban modelling*. In *Urban Systems: Contemporary Approaches to Modeling*. (ed.) Croom Helm, London, 1987.
- BILINTON, R *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*. Pitman Publishing, Inc., 1983.
- BOCCIA, M.; SFORZA, A.; STERLE, C. Flow Intercepting Facility Location: Problems, Models and Heuristics, *Journal of Mathematical Modeling and Algorithms*, vol. 8, pp. 35-79, 2009.
- BOWERSOX, D. J. *Logistical Management - A Systems Integration of Physical Distribution Management and Materials Management*, 2.^a ed., Ed. EUA: Macmilian, 1978.
- BRANDEAU, M. L. & CHIU, S. S. An overview of representative problems in location research, *Management Science*, vol. 35, pp. 645–674, 1989.
- BRANS, J. P. & VINCKE Ph., “A preference ranking organisation method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making)”, *Management Science*, vol. 31, pp. 647-656, 1985.
- CALVO, A. B. & MARKS D. H. Location of health care facilities: an analytic approach, *Socio-economic Planning Science*, vol. 7, pp. 407-422, 1973.
- CAMPOS, V. R., & ALMEIDA, A. T. de. Modelo multicritério de decisão para localização de nova jaguariba com vip analysis, *Pesquisa Operacional*, vol. 26, n.1, pp. 91-107, 2006.

- CARRIZOSA, E. J.; CONDE, E.; MUNOZ, M.; PUERTO, J. The generalized weber problem with expected distances. *RAIRO*, vol. 29, pp. 35-57, 1995.
- CAVALCANTE, C. A. V. & ALMEIDA, A. T. de. Modelo Multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHE II em situações de incerteza. *Pesquisa operacional*, vol. 25, n.2, pp.279-296, 2005.
- CHASE, R. B. & AQUILANO, N. J. *Production and Operations Management: A Life Cycle Approach*, 5ª ed. Homewood, III: Richard D. Irwin, 1989.
- CHAUDHRY, S. S.; HE, S.; CHAUDHRY, P. E. Solving a class of facility location problems using genetic algorithms. *Expert Systems*, vol.20, n.2, pp.86-91, 2003.
- CHIYOSHI, F.; GALVAO, R. D.; MORABITO, R. O uso do modelo hipercubo na solução de problemas de localização probabilísticos. *Gestão da Produção*, vol.7, n.2, pp. 146-174, 2000.
- CHURCH, R. L. & RE VELLE, C. S. The maximal covering location problem, pap. *Region Sci Assoc.*, vol. 32, pp. 101-118, 1974.
- COOPER, L. Location-allocation problems, *Operations Research*, vol.11, pp. 331-343, 1963.
- COOPER, L. Solutions of generalized locational equilibrium models, *Journal of Regional Science*, vol.7, n.1, pp. 1-18, 1967.
- CORRÊA, F. A.; CAVES, A. A.; LORENA, L. A. N. Hybrids heuristics for the probabilistic maximal covering location-allocation problem. *Operational Research*, vol. 7, n.3, pp. 323-343, 2009.
- CORREA, H. L. & CAON, M. *Gestão de serviços: lucratividade por meio de operações e de satisfação dos clientes*, 1.ed.5, São Paulo: Atlas, 2006.
- CORREA, E. S; STEINER, M. T. A.; FREITAS, A. A.; CARNIERI, C. A genetic algorithm for solving a capacitated p-median problem. *Numerical Algorithms*, vol.35, pp. 373–388, 2004.
- CORREIA, I. & CAPTIVO M. E. Lagrangean Heuristic for a Modular Capacitated Location Problem, *Annals of Operations Research*, vol. 122, pp. 141–161, 2003.
- COSTA, J. G. de C. & SILVA, A. M. L. da. Dimensionamento Ótimo de Reserva Técnica de Transformadores de Subestações. In: *XI SEPOPE- Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, SP-074, Belém do Pará, 2009.
- CURRENT, J; DASKIN, M; SCHILLING, D. Discrete Network Location Models, chapter 3 In: *Facility Location Theory: Applications and Methods*, Z. Drezner and H. Hamacher eds., Springer-Verlag, Berlin, 2002, pp. 81-118
- DASCI, A. & LAPORTE, G. A continuous model for multi-store competitive location, *Operations Research*, vol. 53, pp. 263-280, 2005.

- DASKIN, M. S. *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*. Wiley Interscience, New York, EUA, 1995.
- DAVIS, M. M; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. *Fundamentos da Administração da Produção*. Bookman, 2001.
- DAVIS, P.S. & RAY, T. L. A Branch-and-Bound Algorithm for the Capacitated Facilities Location Problem. *Naval Research Logistics*, vol. 16, pp. 331-344, 1969.
- DIAS, J.; CAPTIVO, M. E.; CLÍMACO, J. Desenvolvimento de Um Sistema de Apoio à Decisão Dedicado ao Estudo de Problemas de Localização Dinâmica de Equipamentos Para Transferência, Tratamento e Deposição de Resíduos Sólidos. In: *Anais do XXXV SBPO*, Natal, 2003, pp. 906-922.
- DIETRICH, W. et alli, CIGRÉ Working Group 05. An International Survey on Failures. In: Large Power Transformers in Service. *ELECTRA*, nº88, 1983.
- DREZNER, T. & DREZNER, Z. Facility location in anticipation of future competition. *Location Science*, vol. 6, pp. 155-173, 1998.
- DREZNER, Z.; KLAMROTH, K.; SCHÖBEL, A; WESOŁOWSKY, G. O. The Weber Problem. In: Drezner Z. & Hamacher H. (eds). *Facility Location: Application and Theory*. Springer-Verlag: Berlin, 2002. pp. 1-36.
- DREZNER, Z. & GUYSE J. Application of decision analysis techniques to the Weber facility location problem. *European Journal of Operational Research*, "s.l", vol.116, pp. 69-79, 1999.
- DREZNER, Z. & WESOŁOWSKY, G. O. On the collection depots location problem, *European Journal of Operational Research*, vol.130, pp. 510-518, 2001.
- DUPONT, L. Warehouse location problem with concave costs: heuristics and exact method, In: IMACS *Multiconference 2006*, Beijing, China. *Computational Engineering in Systems Applications (CESA)*, October, 4-6, pp. 1341-1346.
- EISELT, H.A & LAPORTE, G. Sequential location problems. *European Journal Operational Research*, vol. 96, pp. 217-231, 1996.
- EISELT, H. A.; LAPORTE, G.; THISSE, J. F. Competitive location models: A framework and bibliography. *Transport Science*, vol. 27, pp. 44-54, 1993.
- ESPEJO, L. G. A. & GALVAO, R. D. Uma aproximação da fronteira eficiente para um problema de localização hierárquico de máxima cobertura. *Pesquisa Operacional*, vol.24, n.2, pp. 303-321, 2004.
- FABRYCKY, W. J. & BLANCHARD, B. S. *Systems Engineering and Analysis*. 2nd. New Jersey, Prentice Hall, 1997.
- FALKNER, C. H. & BENHAJLA, S. Multi-attribute decision models in the justification of CIM systems. *The Engineering Economist*, vol. 35, n. 2, pp. 91-114, 1990.

- FERNANDES, S.; CAPTIVO, M. E.; CLÍMACO, J. SABILOC – um sistema de apoio à decisão para análise de problemas de localização bicritério. *Pesquisa Operacional*, vol. 27, n.3, pp. 1-17, 2007.
- FERREIRA, H. L.; ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C. A. V.; MEDEIROS, L. H. A. Alocação de transformadores de Reserva Técnica nas Subestações da Celpe. In: *XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XVII SNPTEE GMI-12)*, Uberlândia, Minas Gerais, 2003.
- FERREIRA, H. L. Uso do Conhecimento a priori de Especialistas no Dimensionamento de Sobressalentes Para a Manutenção do Sistema na CELPE. Recife, 2001. 93p. (Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de Pernambuco).
- FERREIRA, J. A. de. Localização. Universidade de Aveiro. Disponível em <<http://www2.egi.ua.pt/cursos/files/DL/Localização.pdf>>. Acesso em: 25 de agosto de 2009.
- FERREIRA, R. P.; CAVALCANTE, C. A. V.; FERREIRA, H. L.; ALMEIDA, A. T. ALOCA: Sistema de alocação de reserva técnica de transformadores em subestação de energia elétrica. In: *XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2005.
- FERREIRA, R. P.; BRITO, A. J. M.; COSTA, A. P. S.; FITTIPALDI, E. H. D.; FERREIRA, H. L. Sistema estatístico para controle e avaliação do desempenho da manutenção, In: *XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, Fortaleza, Ceará, 2006.
- FIEPE – Federação das Indústrias do Estado de Pernambuco. Cadastro Industrial. Disponível em <<http://www.fiepe.org.br/secao/39-22-3-cadastro-industrial.html>>. Acesso em: 15 de julho de 2009.
- FIGUEIREDO, J. L. F. C. T. de. Otimização da localização de armazéns de redistribuição, 2007. 82p. (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial – Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa)
- GAITHER, N. & FRAZIER, G. *Administração da Produção e Operações*. Editora Pioneira, “s.l”, 2002.
- GALVANI, L. V. Metodologia para minimizar o impacto da indisponibilidade não programada sobre a receita do serviço de transmissão de energia elétrica, 2003. 164p. (Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Catarina).
- GALVÃO, R. D.; NOBRE, F. F.; VASCONCELLOS, M. M. Modelos matemáticos aplicados à organização espacial de unidades de saúde. *Revista de Saúde Pública*, “s.l”, vol.33, n.4, pp. 422-434, 1999.
- GARCÍA, F. J. M. & PÉREZ, J. A. M. Optimización por Enjambre para la p-Mediana Continua y Discreta. In: *5º Congreso Espanhol de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos e Bioinspirado*, MAEB, 2007.

- GEOFFRION, A. M. & GRAVES, G. W. Multicommodity system design by benders decomposition. *Management Science*, vol. 20, pp. 822-844, 1974
- GEOFFRION, A. M. & NAUSS, R. Parametric and postoptimality analysis in integer linear programming'. *Management Science*, vol. 23, n. 5, January, pp. 453-66, 1977.
- GIDDINGS, A.P.; BAILEY T.G.; MOORE J.T. Optimality analysis of facility location problems using response surface methodology. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 31, n.1, pp. 38-52, 2000.
- GOMES, L. F. A.; GOMES, C. F. S. & ALMEIDA, A. T. de. *Tomada de Decisão Gerencial: O Enfoque Multicritério*. Revista e Ampliada. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009. vol. 1. 324 p.
- GOLDMAN, A. S. & SLATTERY, T. B. *Maintenability: A major Element of System Effectiveness*. Robert E. Krieger Publishing Company, 1977.
- GUIMARÃES, M. B. Reflexos do planejamento da manutenção na produção e rentabilidade em usinas de geração de energia elétrica, Campus Ponta Grossa, 2007, 77p, (Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná).
- GUINARD, M. & SPIELBERG, K. A Direct Dual Method for the Mixed Plant Location Problem. *Math Programming*, vol. 17, pp. 198-228, 1979.
- HAKIMI, S. L. Optimum locations of switching centers and medians of a graph. *Operations Research*, vol.12, pp. 450-459, 1964.
- HAKIMI, S. L. Optimum locations of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, vol.13, pp- 462-475, 1965.
- HAKIMI, S. L. Network Location Theory & Contingency Planning, *Energy*, vol. 8, n.8-9, pp. 697-702, 1983.
- HAKIMI, S. L. On locating new facilities in a competitive environment. *European Journal of Operational Research*, vol. 12, pp. 29-55, 1983.
- HAKIMI, S. L. & KUO, C.C. On a general network location-production-allocation problem, *European Journal of Operational Research*, vol. 55, pp. 31-45, 1991.
- HAMACHER, H. W. & NICKEL, S. Classification of location models. *Location Science*, vol.6, n.1-4, pp. 229-242, 1988.
- HANDLER, G. Y. & MIRCHANDANI, P. B. *Location On Networks Theory And Algorithms*. MIT Press, Cambridge, 1979.
- HOOVER, E. M. *Location Theory and the Shoe and Leather Industries*. Cambridge: Harvard University Press, 1957.
- HOTTELING Stability in Competition. *Economics Journal*, vol.39, pp. 41-57, 1929.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <<http://www.igge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 15 de julho de 2009.

- ISARD, W. *General Theory: Social, Politic, Economic, and Regional with Particular Reference to Decision Making Analysis*, MIT Press, Cambridge, MA, 1969.
- JAYARAMAN, V. A multi-objective logistics model for a capacitated service facility problem. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol.29, n.1, pp. 65-80, 1999.
- KADANE, J. B. Predictive and structural methods for eliciting prior distributions. In *Bayesian Analysis in Econometrics and Statistics* (A. Zellner, ed.), Noeth-Holland, Amsterdam, 1980, pp.89-93.
- KAPUR, K. C. & LAMBERSON, L. R. *Reliability in engineering design*, John Wiley & Sons, New York, 605p, 1977.
- KEENEY, R. L. & RAIFFA, H. *Decision with Multiples Objectives: Preferences and Value Trade-offs*, John Wiley & Sons, 1976.
- KHOR, H. M.; MELIAN, J. A.; QUIROZ, A. J.; PICADO, D. C.; YUSTA; J. M.; URDANETA, A. J. A probabilistic methodology for distribution substation location. *IEEE Transaction on Power Systems*, vol.18, n. 1, pp.388-393, 2003.
- KLOSE, A. & DREXL, A. Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, vol.162(1), pp. 4-29, 2005.
- KOGAN, V. I.; ROGER, C. J.; TIPTON, D. E. Substation distribution transformers failures and spares. *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 11, issue 4, pp. 1905-1912, 1996.
- KRATICA J.; TOSIC, D.; FILIPOVI, V.; LJUBI, I. Solving The Simple Plant Location Problem by Genetic Algorithm, *RAIRO, Operational Research*, vol.35, n.1, pp. 127-142, 2001.
- KRIVITSKI, D.; SCHUSTER, A; WOLFF, R. A Local Facility Location Algorithm for Large-scale Distributed Systems. *Journal of Grid Computing*, vol.5, n.4, pp. 361-378, 2007.
- KUEHN, A. & HAMBURGUER, M. J. A Heuristic Program for Locating Warehouses. *Management Science*, vol. 9, pp. 643-666, 1963.
- KUHN, H. W. On a pair of dual nonlinear programs. In: Abadie J. (ed). *Nonlinear Programming*. North-Holland: Amsterdam, 1967, pp. 37-54.
- LARSON, R. C. A hypercube queuing model for facility location and redistricting in urban emergency service. *Computers Operational Research*, vol.1, pp. 67-95, 1974.
- LARSON, R. C. & ODoni, A. R. *Urban Operations Research*. New Jersey: Prentice -Hall, 1981.
- LASHINE, S. H.; FATTOUH, M.; ISSA, A. Location/allocation and routing decisions in supply chain network design. *Journal of Modelling in Management*, vol.1, pp. 173-183, 2006.

- LEE, C. A Cross Decomposition algorithm for a multiproduct-multitype facility location problem. *Computers and Operations Research*, vol. 20/5, pp. 527-540, 1993.
- LEUNG, L. C. & KHATOR, S. K. Transformer procurement and relocation at a large electric utility: a mixed 0-1 linear programming model. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, n. 2, pp. 957-963, 1995.
- LI, W.; VAAHEDI, E.; MANSOUR, Y. Determining Number and Timing of Substation Spare Transformers Using a Probabilistic Cost Analysis Approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, n.3, pp. 934-939, 1999.
- LOBO, D. S. Dimensionamento e otimização locacional de unidades de educação infantil. Florianópolis, 2003. 155p. (Doutorado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de Santa Catarina).
- LOPES, R. L. & CAIXETA FILHO, J. V. Suinocultura no Estado de Goiás: aplicação de um modelo de localização. *Pesquisa. Operacional*, vol. 20, n. 2, pp. 213-232, 2000.
- LOPES, Y. G. & ALMEIDA, A. T. de. Enfoque multicritério para a localização de instalações de serviço: aplicação do método SMARTER. *Sistemas & Gestão*, vol. 3, n.2, 114-128, 2008.
- LORENA, L.A.N. Análise de redes. In: Câmara, G.; Monteiro, A. M.; Fuks, S.; Camargo, E.; Felgueiras, C. *Análise Espacial de Dados Geográficos*. São José dos Campos, INPE, 2001.
- LUSS, H. On the equitable resource allocation problems: A lexicographic minimax approach. *Operations Research*, vol.47, n.3, pp. 361-378, 1999.
- MANDELL, M. B. Covering models for two-tiered emergency medical services systems. *Location Science*, vol. 6, pp. 355-368, 1998.
- MARIANOV, V. & REVELLE, C. S. Siting emergency services. In: Drezner (ed). *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*. Springer: New York, 1995, pp. 199-223.
- MARTZ, H. F. & WALLER, R. A. *Bayesian Reliability Analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1998.
- MELO, C. S. L. de. Um Modelo de Decisão Para Dimensionamento de Sobressalentes Baseado em Teoria da Utilidade Multiatributo. Recife, 1998. 83p. (Mestrado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Pernambuco).
- MICHEL, L. & VAN HENTENRYCK, P. A simple tabu search for warehouse location. *European Journal of Operational Research*, vol. 157, n. 3, pp. 576-591, 2004.
- MILLER, S. M. & JENSEN O. W. Location and Theory of production: A review, summary and critique of recent contributions. *Regional Science and Urban Economics*, vol.8, n.2, pp. 117-128, 1978.

- MIRCHANDANI, P. B. & FRANCIS, R. L. *Discrete Location Theory*, Wiley Interscience, New York, 1990.
- MIRSHAWKA, V. & OLMEDO, N. L. *Manutenção combate aos custos da não eficácia, a vez do Brasil*, Ed. Makron Books do Brasil Ltda., São Paulo, Brasil, 1993.
- MOORE, G. C. & REVELLE, C. S. The hierarchical service location Problem. *Management science*, vol. 28, pp. 775-780, 1982.
- MOREIRA, D. A. *Administração da Produção e Operações*, São Paulo, Ed. Pioneira, 1998.
- MOUNT, S. M. Strategic facility planning as a component of the business plan. *Industrial Development Section*, vol. 1, pp. 879-82, 1990.
- NARULA S. C. Hierarchical location-allocation problems: a classification scheme, *European Journal of Operational Research*, vol.15, pp. 93-99, 1984.
- NAUSS, R. M. *Parametric Integer Programming*, University of Missouri Press. Columbia, MO, 1979.
- NOZICK, L. K. & TURNQUIST, M. A. Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers. *European Journal of Operational Research*, vol.129, n.2, pp. 362-371, 2001.
- O'BRIEN, J. A. *Sistemas de informação e as decisões gerenciais na era da Internet*. 2ª ed. São Paulo: Saraiva, 2004.
- O'CONNOR, P. D. T. *Practical Reliability Analysis*. 1ª ed., John Wiley & Sons, 1985.
- O'MARA, M. A. Strategic drivers of location decisions for information-age companies. *The Journal of Real Estate Research*, vol.17, n.3, pp. 365-386, 1999.
- OGRYCZAK, W. On distribution approach to location problems. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 37, n.3, pp. 595-612, 1999.
- O'HAGAN, A. *Eliciting expert beliefs in substantial practical applications*. *The Statistician*, 47, 21-35, 1998.
- OWEN, S. H. & DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review, *European Journal of Operational Research*, vol. 111, pp. 423-447, 1998.
- PAO & CHUANG, T. A QFD Approach for Distribution's Location Model. *International Journal of Quality and Reliability Management*, vol.19, n. 8/9, pp. 1037-1054, 2002.
- PASTOR, J. T.; BORRÁS, F.; ALMINYANA, M. A new directed branching heuristic for pq median problem. *Location Science*, vol.6, pp. 1-23, 1998.
- PAULINO. C. D.; TURKMAN, M. A. A.; MURTEIRA, B. *Estatística Bayesiana*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2003.
- PERL, J. & DASKIN, M. S. A warehouse location-routing problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol.19(5), pp. 381-396, 1985.

- PERL, J. & DASKIN, M. S. A unified warehouse location routing methodology. *Journal of Business Logistics*, vol.5(1), pp. 92–111, 1994.
- PORTER, M. E. *Competição – Estratégias Competitivas Essenciais*. 2ª Edição. São Paulo: Editora Campus, 1999.
- REVELLE, C. S. The maximum capture or "sphere of influence" location problem: hotelling revisited on a network. *Journal of Regional Science*, vol.26, n.2, pp. 343-358, 1986.
- REVELLE, C. S.; BIGMAN, D.; SCHILLING, D.; COHON, J.; CHURCH, R. Facility Location: A Review of Context-Free and EMS Models. *Health Services Research*, pp.129-146, 1977.
- REVELLE, C. S.; MARKS, D.; LIEBMAN, J. C. An analysis of private and public sector location models. *Management Science*, vol.16, pp. 692-70, 1970.
- REVELLE, C.S.; TOREGAS, C.; FALKSON, L. Applications of the location set covering problem. *Geographical Analysis*, vol.8, pp. 65–77, 1976.
- RHIM, H.; HO, T. H.; KARMARKAR, U.S. Competitive location, production, and market selection. *European Journal of Operation Research*, vol.149, pp. 211-228, 2003.
- ROBESON, J. F.; COPACINO, W. C.; HOWE, R. E. *The Logistic Handbook*, Ed. EUA: Andersen Consulting, 1994.
- ROSING, K. E. & HODGSON, M. J. A systematic classification of applications of location-allocation models. *Belgian J Opns Res, Stat Comput Sci*, vol.36, pp. 77-108, 1996.
- ROY, B. Partial Preference Analysis and Decision Aid: The fuzzy outranking relation concept, D.E. Bell, R.L. Keeney, H. Raiffa, (eds.), *Conflicting objectives in Decisions*, J. Wiley, New York, 1977, pp. 40 - 75.
- ROY, B. The Outranking Approach and the Foundations of Electre Methods. *Theory and Decision*, vol. 31, pp. 49-73, 1991.
- ROY, B. Decision science or decision-aid science? *European Journal of Operational Research*, vol.66, pp. 184-203, 1993.
- SANTOS, I. M. dos. Proposta de um modelo de avaliação de desempenho para empresas de serviços certificados com a ISO 9001:2000. Recife, 2006. 179p. (Mestrado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Pernambuco).
- SANTOS, K. C. dos. Proposta conceitual de um modelo de localização de estabelecimentos de ensino. Florianópolis, 2005. 182p. (Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina).
- SAATY, T. L. *Multicriteria decision making: the analytic hierarchy process: planning, priority setting resource allocation*, 2nd ed., 192p. RWS Publications, Pittsburgh, Pa, USA, 1990.
- SCAPARRA, M. P. & SCUTELLÀ, M. G. Facilities, Locations, Customers: Building Blocks of Locations Blocs. *A Survey, Technical Report TR-01-18*, 2001.

- SCHILLING, D.; JAYARAMAN, V.; BARKHI, R. A review of covering problems in facility location. *Location Science*, vol. 1, pp.25-55, 1993.
- SCHILLING, D.; RE VELLE, C. S.; COHON, J.; ELZINGA, D. Some Models for Fire Protection Location Decisions. *European Journal of Operational Research*, vol.5, pp.1-7, 1980.
- SCHULTZ, G. P. The logic of health care facility planning. *Socio-economic Planning Science*, vol. 4, pp. 383-393, 1970.
- SERRA D. & MARIANOV V. The p-median problem in a changing network: the case of Barcelona. *Location Science*, vol. 6, pp. 383-394, 1998.
- SERRA, D. & RE VELLE, C. The pq-median problem, location and districting of hierarchical facilities. *Location Science*, vol. 1 (4), pp. 299-31, 1993.
- SERRA, D. & RE VELLE, C. The pq-median problem: location and districting of hierarchical facilities.-II. Heuristic solution methods, *Location Science*, vol. 2 (2), pp. 63-82, 1994.
- SHAOJUN W.; SARKER, B. R.; MANN L. Jr., TRIANTAPHYLLOU, E. Resource planning and a depot location model for electric power restoration, *European Journal of Operational Research*, vol. 155, pp. 22-43, 2003.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSON, R. *Administração da Produção*, 2ª ed. São Paulo, Editora Atlas, 2002.
- SLATER, P. J. Maximum facility location, *J. Res. NBS Math Sci*, vol. 79, pp. 1063-1077., 1975.
- SILVA da, M. V. *Localização de Estoques na Rede de Distribuição de uma Empresa do Setor Siderúrgico*. Belo Horizonte, 2006. 141p. (Mestrado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Minas Gerais).
- SMITH, H.K., LAPORTE, G., HARPER, P.R. Locational analysis: highlights of growth to maturity. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 60, pp.140-148, 2009.
- SNYDER, L. V. (2006) Facility location under uncertainty: a review, *IIIE Transactions*, vol. 38, n. 7, pp. 547-564, 2006.
- SNYDER, L. V. & DASKIN M. S. Reliability Models Facility Location: The Expected Failure Cost Case. *Transportation Science*, vol.39, n.3, pp. 400-416, 2005.
- SPRAGUE Jr. R. H. & WATSON, H. J. *Decision Support Systems - Putting Theory into Practice*. Prentice-Hall, Inc, 1989.
- SRIDHARAN, R. The capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, 87, pp. 203-213, 1995.
- THAI, V. V. & DEVINDER, D. Selecting the Location of Distribution Centre in Logistics Operations: A Conceptual Framework and Case Study, *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, vol. 17, n. 3, pp. 3-24, 2005.

- TONG, D. & MURRAY, A. T. Maximising coverage of spatial demand for service, *Papers in Regional Science*, vol.88, n.1, pp. 85-97, 2007.
- TRAGANTALERNGSAK, S.; HOLT, J.; RONNQVIST, M. Lagrangian heuristics for two-echelon, single-source, capacitated facility location problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 102, pp. 611-625, 1997.
- VANCE, C. S. A Internet como fonte de informações para a competitividade das empresas do setor elétrico brasileiro - Diplome d'études Approfondies en Information Scientifique et Technique Veille Technologique - Marseille, 2000.
- TURBAN, E.; MCLEAN, E.; WETHERBE, J. *Tecnologia da Informação para gestão*. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- VAITHYANATHANA, S.; BURKEB, L. I.; MAGENTB, M. A. Massively parallel analog tabu search using neural networks applied to simple plant location problems. *European Journal of Operational Research*, vol. 93, n.2, pp. 317-330, 1996.
- VINCKE, P. *Multicriteria decision-aid*, John Wiley & Sons, 1992.
- WANG, S.; SARKER, B., R.; MANN, L.; TRIANTAPHILLOU, E. Resource Planning and a depot location for electric power restoration. *European Journal of Operational Research*, vol. 155, n.1, pp. 22-43, 2004.
- WEBER, A. *Alfred Weber's theory of the location of industries*. Chicago (III): University of Chicago Press, 1929.
- YEH, A. G. O. & CHOW, M. H. An integrated GIS and Location-Allocation approach to public facilities planning – an example of open space planning. *Computer Environment and Urban Systems*, vol.20, n.4-5, pp. 339-350, 1996.
- YIGIT, V.; AYDIN, M.E.; TURKBEBY, O. Solving large-scale uncapacitated facility location problems with evolutionary simulated annealing, *International journal of production research*, vol.44, n.22, pp. 4773-4791, 2006.
- ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, N. R. da. Análise multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG. *Pesquisa Operacional*, vol. 25, n. 2, pp.183-199, 2005.
- ZHU, Z. P.; REVELLE, C. S.; ROSING, K. Adaptation of the plant location model for regional environmental facilities and cost allocations. *Annals of Operations Research*, vol. 18,1989, pp. 345-366.

ANEXO 1

A seguir é apresentada a memória de cálculo, referente aos modelos de alocação propostos na tese, através das rotinas do programa matlab utilizado para a obtenção das soluções eficientes.

Modelo 1 (Localização de reserva única para SE's com demanda idêntica)

```

close all;
clear all;
clc;

% Ordem: AGB ACV BLJ BZR BCO BMD CTD CRR GAN IBI PQR STC SRN TRT.

% Vetores critérios
P=[0.0384567887488182      0.0656565247582279      0.0718311512945459
    0.0573217911680571      0.0439279127535393      0.0407575963089905
    0.0338885773458014      0.2926226371931160      0.1265251833661630
    0.0275945072141907      0.0620873881734645      0.0745813906878534
    0.0344857953222649 0.0302627556649668]; % Critério População;
I =[0.003 0.068 0.054 0.040 0.014 0.003 0.011 0.629 0.135 0.001 0.065
    0.239 0.017 0.099]; % Critério Industrialização;
S =[0.090 0.560 0.260 0.240 0.160 0.190 0.120 1.370 0.660 0.140 0.330
    0.180 0.220 0.090]; % Critério Saúde;

% Matriz da distâncias entre as subestações.
D_IJ = [ 0 126 202 228 133 268 220 198 90 215 166 261 190 238
        126 0 76 162 222 202 192 132 100 85 40 195 74 172
        202 76 0 86 141 126 116 56 93 161 36 119 140 96
        228 162 86 0 181 100 81 30 138 247 122 93 226 70
        133 217 141 181 0 221 156 151 43 307 177 214 286 191
        268 202 126 100 221 0 130 70 178 287 162 83 266 60
        220 192 116 81 156 130 0 60 113 287 158 123 256 100
        198 132 56 30 151 70 60 0 108 227 92 63 196 40
        90 100 93 138 43 178 113 108 0 185 129 171 164 148
        215 85 161 247 307 287 298 227 185 0 125 290 89 267
        166 40 36 122 177 162 152 92 129 125 0 155 104 132
        261 195 119 93 214 83 123 63 171 290 155 0 259 23
        490 74 140 226 286 266 256 196 164 89 104 269 0 239
        238 172 96 70 191 60 100 40 148 267 132 23 239 0];

% Matriz da distâncias entre as subestações normalizada
D_IJ_norm = D_IJ/max(max(D_IJ));

% Elicitação da estrutura de preferência do decisor sobre os
atributos do modelo

```

```
k1 = 0.35; % constante de escala do critério População;
k2 = 0.3; % constante de escala do critério Industrialização;
k3 = 0.25; % constante de escala do critério Serviço de Saúde;
k13 = 0.1; % constante de escala para a interação entre população e
saúde;
A1 = 20; % Parâmetro de forma do decisor para população;
A2 = 25; % Parâmetro de forma do decisor para indústria;
A3 = 3; % Parâmetro de forma do decisor para serviço de saúde;
n_J = 14; % Número total de subestações;

% Criando as possibilidades de Alocação dos Equipamentos. -----
Poss_y = diag(ones(1, n_J));
% -----
for i = 1:size(Poss_y, 1)
    termo1 = k1*(exp(-A1*(D_IJ_norm(i, :).*P)));
    termo2 = k2*(exp(-A2*(D_IJ_norm(i, :).*I)));
    termo3 = k3*(exp(-A3*(D_IJ_norm(i, :).*S)));
    termo13= k13*(exp(-A1*(D_IJ_norm(i, :).*P)).*exp(-
        A3*(D_IJ_norm(i, :).*S)));

% Função Objetivo
U(i)= sum((termo1 + termo2 + termo3 + termo13))/(k1 + k2 + k3 + k13);
End

% Solução
Resultado = [Poss_y U'];
```

Modelo 2 (Localização de reserva única para SE's com demandas diferenciadas)

```

close all;
clear all;
clc;
% Ordem: AGB ACV BLJ BZR BCO BMD CTD CRR GAN IBI PQR STC SRN TRT.
% Vetores critérios
P=[0.0384567887488182      0.0656565247582279      0.0718311512945459
    0.0573217911680571      0.0439279127535393      0.0407575963089905
    0.0338885773458014      0.2926226371931160      0.1265251833661630
    0.0275945072141907      0.0620873881734645      0.0745813906878534
    0.0344857953222649 0.0302627556649668]; % critério População;
I= [0.003 0.068 0.054 0.040 0.014 0.003 0.011 0.629 0.135 0.001 0.065
    0.239 0.017 0.099]; % critério Industrialização;
S= [0.090 0.560 0.260 0.240 0.160 0.190 0.120 1.370 0.660 0.140 0.330
    0.180 0.220 0.090]; % critério Serviço de Saúde;
% Caracterização das subestações demandantes
n_J = 14; % Número total de subestações;
SE_nEqp = [2 2 2 1 1 1 2 4 2 1 2 2 1 2]; % número de transformadores
em operação
Fator_Carga_Falha = 1./SE_nEqp; % carga afetada pela falha de um
transformador
% Matriz das distâncias entre as subestações.
D_IJ = [ 0  126 202 228 133 268 220 198 90  215 166 261 190 238
        126  0   76 162 222 202 192 132 100  85  40 195  74 172
        202  76  0   86 141 126 116  56  93 161  36 119 140  96
        228 162  86  0  181 100  81  30 138 247 122  93 226  70
        133 217 141 181  0  221 156 151  43 307 177 214 286 191
        268 202 126 100 221  0  130  70 178 287 162  83 266  60
        220 192 116  81 156 130  0  60 113 287 158 123 256 100
        198 132  56  30 151  70  60  0 108 227  92  63 196  40
        90 100  93 138  43 178 113 108  0 185 129 171 164 148
        215  85 161 247 307 287 298 227 185  0 125 290  89 267
        166  40  36 122 177 162 152  92 129 125  0 155 104 132
        261 195 119  93 214  83 123  63 171 290 155  0 259  23
        490  74 140 226 286 266 256 196 164  89 104 269  0 239
        238 172  96  70 191  60 100  40 148 267 132  23 239  0];
% Matriz da distâncias entre as subestações normalizadas.
D_IJ_norm = D_IJ/max(max(D_IJ));
%Elicitação da estrutura de preferências do decisor sobre os
atributos do modelo
k1 = 0.35; % constante de escala do critério População;
k2 = 0.3; % constante de escala do critério Industrialização;
k3 = 0.25; % constante de escala do critério Serviço de Saúde;
k13 = 0.1; % constante de escala para a interação entre os critérios
população e saúde;
A1 = 20; % Parâmetro de forma do decisor para população;

```

```

A2 = 25; % Parâmetro de forma do decisor para indústria;
A3 = 3; % Parâmetro de forma do decisor para serviço de saúde;
%Educação do conhecimento a priori do especialista sobre o parâmetro de
propensão à falha
eta = [0.020  0.020  0.020  0.040  0.040  0.040  0.020  0.010
       0.020  0.040  0.020  0.020  0.040  0.020]; % Parâmetro de
       escala da Weibull;
beta = [3.700  4.500  4.700  8.500  5.400  5.600  7.200  6.800
       5.000  3.800  8.400  4.600  6.300  5.300]; % Parâmetro de
       forma da Weibull;
%-----%
function y = funProbFalha_ (x, A, B, A1, Dist)
z = wblpdf(x, A, B);
y = z.*x.*exp(-A1*Dist);
%-----%
% Criando as possibilidades de Alocação dos Equipamentos. -----
Poss_y = diag(ones(1, n_J));
% -----
termo1 = zeros(1, n_J);
termo2 = zeros(1, n_J);
termo3 = zeros(1, n_J);
termo13 = zeros(1, n_J);
for i = 1:size(Poss_y, 1)
    for j = 1:size(Poss_y, 1)
        termo1(j) = quad(@(x) funProbFalha_28_09_2009(x, alfa(j), beta(j),
A1, D_IJ_norm(i,j)*Fator_Carga_Falha(j)*P(j)), 0, 1);
        termo2(j) = quad(@(x) funProbFalha_28_09_2009(x, alfa(j), beta(j),
A2, D_IJ_norm(i,j)*Fator_Carga_Falha(j)*I(j)), 0, 1);
        termo3(j) = quad(@(x) funProbFalha_28_09_2009(x, alfa(j), beta(j),
A3, D_IJ_norm(i,j)*Fator_Carga_Falha(j)*S(j)), 0, 1);
        termo13(j) = termo1(j)*termo3(j);
    end
end

% Função Objetivo
U(i) = sum((k1*termo1 + k2*termo2 + k3*termo3 + k13*termo13))/(k1 +
k2 + k3 + k13);

End

% Solução
Resultado = [Poss_y U'];

clear A1 A2 A3 D_IJ D_IJ_norm Fator_Carga_Falha I P Poss_y S SE_nEqp
U alfa beta i j k1 k13 k2 k3 n_J termo1 termo13 termo2 termo3

```

Modelo 3 (Localização de múltiplas reservas para SE's com demandas diferentes)

```

close all;
clear all;
clc;
% Ordem: AGB ACV BLJ BZR BCO BMD CTD CRR GAN IBI PQR STC SRN TRT.
% Caracterização das subestações demandantes
n_J = 14; % Número total de subestações;
SE_Tipo1 = [1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 1];
SE_Tipo2 = [0 0 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1];
SE_nEqp_Tipo1 = [2 2 0 0 0 1 2 0 0 1 2 0 1 1];
SE_nEqp_Tipo2 = [0 0 2 1 1 0 0 4 2 0 0 2 0 1];
% Estabelecimento do fator de carga
Fator_Carga_Falha_T1=((5*SE_Tipo1)./(5*SE_nEqp_Tipo1+10*SE_nEqp_Tipo2));
Fator_Carga_Falha_T2=((10*SE_Tipo2)./(5*SE_nEqp_Tipo1+10*SE_nEqp_Tipo2));
% Vetores critérios
P=[0.0384567887488182      0.0656565247582279      0.0718311512945459
    0.0573217911680571      0.0439279127535393      0.0407575963089905
    0.0338885773458014      0.2926226371931160      0.1265251833661630
    0.0275945072141907      0.0620873881734645      0.0745813906878534
    0.0344857953222649 0.0302627556649668]; % Fator População;
I =[0.003 0.068 0.054 0.040 0.014 0.003 0.011 0.629 0.135 0.001 0.065
    0.239 0.017 0.099]; % Fator Industrialização;
S =[0.090 0.560 0.260 0.240 0.160 0.190 0.120 1.370 0.660 0.140 0.330
    0.180 0.220 0.090]; % Fator Saúde;
% Matriz da distâncias entre as subestações.
D_IJ =[ 0 126 202 228 133 268 220 198 90 215 166 261 190 238
        126 0 76 162 222 202 192 132 100 85 40 195 74 172
        202 76 0 86 141 126 116 56 93 161 36 119 140 96
        228 162 86 0 181 100 81 30 138 247 122 93 226 70
        133 217 141 181 0 221 156 151 43 307 177 214 286 191
        268 202 126 100 221 0 130 70 178 287 162 83 266 60
        220 192 116 81 156 130 0 60 113 287 158 123 256 100
        198 132 56 30 151 70 60 0 108 227 92 63 196 40
        90 100 93 138 43 178 113 108 0 185 129 171 164 148
        215 85 161 247 307 287 298 227 185 0 125 290 89 267
        166 40 36 122 177 162 152 92 129 125 0 155 104 132
        261 195 119 93 214 83 123 63 171 290 155 0 259 23
        490 74 140 226 286 266 256 196 164 89 104 269 0 239
        238 172 96 70 191 60 100 40 148 267 132 23 239 0];
% Designação das reservas quanto ao nível de atendimento
p = 1; % Unidade de reserva do nível 1;
q = 2; % Unidade de reserva do nível 2 (também atende o nível 1);
%Elicitação da estrutura de preferências do decisor sobre os
atributos do modelo.

```

```

k1 = 0.35; % Peso do fator População;
k2 = 0.3; % Peso do fator Industrialização;
k3 = 0.25; % Peso do fator Serviço de Saúde;
k13 = 0.1; % Peso do fator acoplamento entre população e saúde;
A1 = 20; % Parâmetro de forma do decisor para população;
A2 = 25; % Parâmetro de forma do decisor para indústria;
A3 = 3; % Parâmetro de forma do decisor para serviço de saúde;
%Educação do conhecimento a priori do especialista sobre o parâmetro de
propensão a falha.
eta_Tipo1 =[0.080 0.050 0.000 0.000 0.000 0.030 0.060
0.000 0.000 0.030 0.060 0.000 0.030 0.035]; %
Parâmetro de escala da Weibull;
beta_Tipo1 =[3.700 4.500 0.000 0.000 0.000 5.600 7.200
0.000 0.000 3.800 6.400 0.000 8.300 3.900];
% Parâmetro de forma da Weibull;
eta_Tipo2 =[0.000 0.000 0.060 0.040 0.030 0.000 0.000
0.090 0.060 0.000 0.000 0.050 0.000 0.025]; %
Parâmetro de escala da Weibull;
beta_Tipo2 = [0.000 0.000 4.700 8.500 5.400 0.000 0.000
6.800 5.000 0.000 0.000 4.600 0.000 5.300];
% Parâmetro de forma da Weibull;
%-----%
function y = funProbPop (x, A, B, A1)
z = wblpdf(x, A, B);
y = z.*x.*(exp(-A1) - 1);
%-----%
% Cálculo das utilidades das conseqüências para as SE's do tipo 1
for i = 1: n_J
if SE_Tipo1(i) == 0
f_J_Tipo1(i) = 0;
else
f_J_Tipo1_P = quad(@(x)funProbPop_28_09_2009(x, alfa_Tipo1(i),
beta_Tipo1(i), A1*Fator_Carga_Falha_T1(i)*P(i)), 0, 1);
f_J_Tipo1_I = quad(@(x)funProbPop_28_09_2009(x, alfa_Tipo1(i),
beta_Tipo1(i), A2*Fator_Carga_Falha_T1(i)*I(i)), 0, 1);
f_J_Tipo1_S = quad(@(x)funProbPop_28_09_2009(x, alfa_Tipo1(i),
beta_Tipo1(i), A3*Fator_Carga_Falha_T1(i)*S(i)), 0, 1);
f_J_Tipo1_PS = f_J_Tipo1_P*f_J_Tipo1_S;
f_J_Tipo1(i) = (k1*f_J_Tipo1_P + k2*f_J_Tipo1_I + k3*f_J_Tipo1_S
+ k13*f_J_Tipo1_PS)/(k1 + k2 + k3 + k13);
end
% Cálculo das utilidades das conseqüências para as SE's do tipo 2
if SE_Tipo2(i) == 0
f_J_Tipo2(i) = 0;
else
f_J_Tipo2_P = quad(@(x)funProbPop_28_09_2009(x, alfa_Tipo2(i),
beta_Tipo2(i), A1*Fator_Carga_Falha_T2(i)*P(i)), 0, 1);
f_J_Tipo2_I = quad(@(x)funProbPop_28_09_2009(x, alfa_Tipo2(i),
beta_Tipo2(i), A2*Fator_Carga_Falha_T2(i)*I(i)), 0, 1);

```

```

        f_J_Tipo2_S = quad(@(x)funProbPop_28_09_2009(x, alfa_Tipo2(i),
beta_Tipo2(i), A3*Fator_Carga_Falha_T2(i)*S(i)), 0, 1);
        f_J_Tipo2_PS = f_J_Tipo2_P*f_J_Tipo2_S;
        f_J_Tipo2(i) = (k1*f_J_Tipo2_P + k2*f_J_Tipo2_I + k3*f_J_Tipo2_S
+ k13*f_J_Tipo2_PS)/(k1 + k2 + k3 + k13);
    end
end

% Definição dos raios de cobertura.
R11 = 150; % Raio de cobertura da reserva de nível 1 para atender ao
equipamento de nível 1;
R21 = 50; % Raio de cobertura da reserva de nível 2 para atender ao
equipamento de nível 1;
R22 = 130; % Raio de cobertura da reserva de nível 2 para atender ao
equipamento de nível 2;

% Varrendo as subestações.
for SEs_lin = 1:n_J
    for SEs_col = 1:n_J
        if D_IJ(SEs_lin,SEs_col) <= R11 && SE_Tipo1(SEs_col) == 1
            a(SEs_lin,SEs_col) = 1; % Teste de cobertura de j por i
em relação a R11;
        else
            a(SEs_lin,SEs_col) = 0;
        end
        if D_IJ(SEs_lin,SEs_col) <= R21 && SE_Tipo1(SEs_col) == 1
            b(SEs_lin,SEs_col) = 1; % Teste de cobertura de j por i
em relação a R21;
        else
            b(SEs_lin,SEs_col) = 0;
        end
        if D_IJ(SEs_lin,SEs_col) <= R22 && SE_Tipo2(SEs_col) == 1
            c(SEs_lin,SEs_col) = 1; % Teste de cobertura de j por i
em relação a R22;
        else
            c(SEs_lin,SEs_col) = 0;
        end
    end
end
end

% keyboard

% Criando as possibilidades de Alocação dos Equipamentos. -----
Poss_yi = diag(ones(1,n_J));
Poss_zi = [];
for i = 1:n_J
    for j = i+1:n_J
        poss_zi = zeros(1,n_J);
        poss_zi(i) = 1;
    end
end

```

```

        poss_zi(j) = 1;
        Poss_zi = [Poss_zi; poss_zi];
    end
end
% -----
Memoria = [];
for possy = 1:size(Poss_yi,1) % Variando as possibilidades de
alocação da reserva do tipo 1.
    yi = Poss_yi(possy,:); % Fixando a reserva do tipo 1.
    for possz = 1:size(Poss_zi,1) % Variando as possibilidades de
alocação da reserva do tipo 2.
        zi = Poss_zi(possz,:); % Variando a reserva do tipo 2 com a
do tipo 1 fixa.
        % Fixado as reservas do tipo 1 e do tipo 2 obtenha Xj Tipo 1
e Xj Tipo 2!
        % verificação das restrições
        for j = 1:n_J
            soma_pay(j) = a(:,j)'*yi';
            soma_pbz(j) = b(:,j)'*zi';
            soma_pcz(j) = c(:,j)'*zi';
        end
        Memoria = [Memoria; yi zi soma_pay soma_pbz soma_pcz];
    end
end

fprintf('\n\n');
Numero_de_Possibilidades = size(Memoria,1);
Resultado = [];

% keyboard

% Procedimento de teste de cobertura
for possibilidade = 1:Numero_de_Possibilidades
    Xj_Tipo1 = zeros(1,n_J);
    Xj_Tipo2 = zeros(1,n_J);
    for j = 1:n_J
        if (Memoria(possibilidade, j + 2*n_J) +
Memoria(possibilidade, j + 3*n_J)) > 0 % O equipamento do tipo 1 está
coberto.
            Xj_Tipo1(j) = 1; % 1 se a subestação j é coberta para
falhas em equipamento do tipo 1 (0 caso contrário);
        else
            Xj_Tipo1(j) = 0;
        end
        if Memoria(possibilidade, j + 4*n_J) > 0 % O equipamento tipo
2 está coberto.
            Xj_Tipo2(j) = 1; % 1 se a subestação j é coberta para
falhas em equipamentos do tipo 2 (0 caso contrário);

```

```

        else
            Xj_Tipo2(j) = 0;
        end
    end
end

% Função Objetivo
Avaliacao = f_J_Tipo1*Xj_Tipo1' + f_J_Tipo2*Xj_Tipo2';
% fprintf('\n Possibilidade: %1.0f.\n', possibilidade);
% fprintf(' O valor da função objetivo é: %2.8f.\n', Avaliacao);

% Solução
Resultado = [Resultado; Memoria(possibilidade, :) Xj_Tipo1
Xj_Tipo2 Avaliacao];
end

vetorResultado = Resultado(:, end);
[Avaliacao, Linha] = max(vetorResultado);
Possibilidade = [Linha];
vetorResultado(Linha) = -vetorResultado(Linha);
flaggg = 1;
while flaggg ~= 0
    [SegMaior, Linha] = max(vetorResultado);
    if Avaliacao == SegMaior
        Possibilidade = [Possibilidade; Linha];
        vetorResultado(Linha) = -vetorResultado(Linha);
    else
        flaggg = 0;
    end
end

clear Avaliacao D_IJ I Memoria Numero_de_Possibilidades Poss_yi Poss_zi ...
P R11 R21 R22 S SE_Tipo1 SE_Tipo2 SEs_col SEs_lin Xj_Tipo1 Xj_Tipo2 ...
a b c f_J_Tipo1 f_J_Tipo2 i j lbd_J_Tipo1 lbd_J_Tipo2 n_J p ...
percentual_carga possibilidade possy possz q soma_pay soma_pbz ...
soma_pcz yi zi A1 A2 A3 k1 k13 k2 k3 poss_zi alfa_Tipo1 alfa_Tipo2 ...
beta_Tipo1 beta_Tipo2 f_J_Tipo1_I f_J_Tipo1_P f_J_Tipo1_PS ...
f_J_Tipo1_S f_J_Tipo2_I f_J_Tipo2_P f_J_Tipo2_PS f_J_Tipo2_S ...
Fator_Carga_Falha_T1 Fator_Carga_Falha_T2 SE_nEqp_Tipo1 SE_nEqp_Tipo2

```