

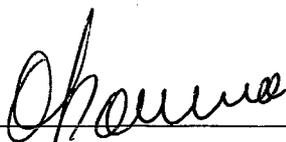
**QUANTIFICAÇÃO E LOCAÇÃO DE UNIDADES MÓVEIS
DE ATENDIMENTO DE EMERGÊNCIA A INTERRUPÇÕES
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:
APLICAÇÃO DO MODELO HIPERCUBO**

JEAN CARLO DE CAMPOS ALBINO

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de:

MESTRE EM ENGENHARIA

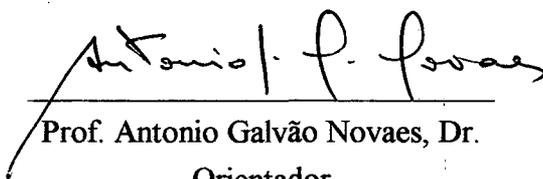
Especialidade em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação.



Prof. Osmar Possamai, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Antonio Galvão Novaes, Dr.

Orientador

Prof^ª. Miriam Buss Gonçalves, D.Sc.

Prof. Ricardo M. Barcia, Ph.D.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**QUANTIFICAÇÃO E LOCAÇÃO DE UNIDADES MÓVEIS
DE ATENDIMENTO DE EMERGÊNCIA A INTERRUPÇÕES
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:
APLICAÇÃO DO MODELO HIPERCUBO**

Jean Carlo de Campos Albino
Orientador: Antonio G. Novaes, Dr.

Florianópolis, novembro de 1994.

RESUMO

O Modelo Hipercubo básico, bem como sua versão aproximada, é normalmente utilizado para analisar o desempenho de sistemas públicos de atendimento de emergência. Ambos os modelos, contudo, só podem ser usados quando o sistema não impõe limitação geográfica a suas Unidades Móveis de Emergência (UMEs), i.e., em sistemas cujas UMEs podem ser despachadas para qualquer atendimento dentro da região de cobertura. Caso o sistema não apresentasse esta propriedade, podia-se somente utilizar técnicas de simulação.

Este trabalho apresenta uma adaptação do Modelo Hipercubo básico, que foi desenvolvida para os casos de sistemas urbanos de emergência em que as UMEs não são autorizadas ou não lhes seja conveniente cobrir a região inteira, ou seja, sistemas com limitação geográfica das UMEs. Esta versão adaptada é chamada Modelo Hipercubo Limitado (MHL).

Foram efetuadas alterações em diversos passos do modelo básico, que trouxeram uma nova perspectiva de análise, devido à ampliação do universo de aplicação do hipercubo e à viabilização da descrição matemática de algumas características específicas de sistemas limitados.

O MHL foi aplicado na análise do serviço de distribuição de energia elétrica da região metropolitana de Florianópolis, com os resultados sendo apresentados e discutidos no trabalho.

ABSTRACT

The basic hypercube queueing model, as well its approximated version, are normally used to analyze public emergency systems' performance. Both models, however, can be used only when the system has no geographical limitation of its emergency mobile units (EMU), i.e., in systems in which the region's atoms can be attended by any EMU, meaning that each EMU can cover the entirety of the analysed region. In systems that does not present this property, one could only use simulation techniques.

This paper presents an adaptation of the basic hypercube model that was developed for cases of urban emergency systems in which the EMU's are not allowed or not worthwhile to cover the entire region. This adapted version is called limited hypercube model (LHM).

Modifications have been made in several steps of the basic model, and has brought a new analysis perspective, by amplifying the hypercube's application universe and allowing mathematical description of some limited systems' specific features.

The LHM was applied to analyze an electric energy distribution public service at Florianópolis, and the results are discussed in the paper.

**QUANTIFICAÇÃO E LOCAÇÃO DE UNIDADES MÓVEIS
DE ATENDIMENTO DE EMERGÊNCIA A INTERRUPÇÕES
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:
APLICAÇÃO DO MODELO HIPERCUBO**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	02
1.1. Importância do Problema	03
1.2. Estrutura de Apresentação	05
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE SERVIÇOS URBANOS DE EMERGÊNCIA	06
2.1. Corpo de Bombeiros	06
2.2. Polícia	08
2.3. Outras Aplicações	09
3. MODELOS DE FILA UTILIZADOS	11
3.1. O Modelo M/M/1	13
3.2. O Modelo M/M/C	14
4. O MODELO HIPERCUBO - GERAL	16
4.1. Hipóteses do Modelo	18
4.2. O Sistema Exemplo	20
4.3. Transição Entre Estados	23
4.4. Taxas de Transição no Hipercubo	24
4.5. Equações de Equilíbrio em Regime Permanente	26
4.6. Medidas de Desempenho do Sistema	28
4.7. Extensões ao Modelo Hipercubo Básico	36
5. MÉTODO DE SOLUÇÃO - O MODELO HIPERCUBO LIMITADO	38
5.1. Taxas de Transição dos Estados	38
5.2. Medidas de Desempenho do Sistema	39
6. VALIDADE DO MODELO - APLICAÇÃO	44
6.1. Descrição - Aspectos Matemáticos	44
6.2. Descrição - Aspectos Computacionais	46
6.3. Exemplo de Aplicação - Grande Florianópolis	48
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
7.1. Conclusões	61
7.2. Recomendações	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS	67

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais os cinco bilhões de habitantes de nosso planeta, especialmente nas nações emergentes, estão passando suas vidas nas cidades ou áreas metropolitanas, em que as estruturas econômicas e sociais se desenvolvem num complexo emaranhado, tornando as atividades humanas intrinsecamente interdependentes.

O atendimento às necessidades de alimentação, habitação, segurança, vestuário, lazer, saúde, energia e outras, requer redes urbanas de transportes e comunicações fortemente estruturadas para a prestação efetiva de diversos *serviços urbanos*, entre os quais:

- serviço de coleta e entrega residenciais, p.e. coleta de lixo, correios;
- serviços de emergência (polícia, bombeiros, ambulâncias, manutenção de emergência);
- transportes de passageiros (ônibus, metrô, táxis);
- manutenção viária;
- serviços prestados em locais fixos (escolas, hospitais, bibliotecas, parques, etc.).

Sendo também crescentes as exigências da população quanto à quantidade e qualidade destes serviços, e a escassez dos recursos disponíveis, cresce também a necessidade de se aprimorar as tomadas de decisão de gerenciamento dos sistemas de atendimento urbano, muitos dos quais enfrentam complexos problemas quanto à utilização mais produtiva de seus recursos, que são temporal e espacialmente limitados.

Para dar suporte a essas decisões, diferentes métodos e modelos matemáticos têm sido utilizados, sendo a maioria deles desenvolvidos entre o final da década de 60 e o início da de 70.

Neste contexto, então, este trabalho, apresenta uma proposta de tratamento matemático do problema do dimensionamento de um sistema de atendimento de emergência a interrupções no fornecimento de energia elétrica em redes aéreas de distribuição.

A partir da configuração inicial do sistema de atendimento, dada pela quantidade de unidades móveis disponíveis e por suas bases geográficas de atuação, bem como pelas taxas de interrupção por unidade geográfica, esta configuração tem sua performance geral avaliada através do *modelo hipercubo*, que fornece vários indicadores de desempenho que permitem aferir objetivamente a qualidade dos serviços, sendo que dentre os indicadores fornecidos pelo modelo, o mais utilizado pelos planejadores do setor é o tempo de espera. Contudo, como o modelo fornece também diversos outros indicadores, o

presente trabalho se propõe a introduzir e discutir tais indicadores, visando incluí-los como critérios de avaliação de performance, na perspectiva de aprimorar a sensibilidade das análises das alternativas de planejamento sob estudo.

Para possibilitar uma noção mais ampla do problema do atendimento de emergência a interrupções no fornecimento de energia elétrica, descreve-se a seguir o contexto geral do problema, na forma como o mesmo se apresenta nas concessionárias brasileiras de distribuição de energia, e segundo a visão resultante da experiência do autor nas Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. - CELESC.

1.1. Importância do Problema

As redes de distribuição de energia elétrica são compostas de diversos equipamentos e materiais, que apresentam diferentes categorias de qualidade, estágio de vida útil e montagem. Somadas ao fato de que as redes brasileiras são, em sua esmagadora maioria, aéreas, estas características fazem com que a rede, como um todo, esteja permanentemente sujeita a falhas (interrupções no fornecimento) diversas, de comportamento aleatório tanto no tempo como no espaço.

Devido à dependência da sociedade atual à utilização de energia elétrica como insumo básico de quase todos os campos da atividade humana, principalmente nos centros urbanos, uma interrupção no fornecimento causa sempre sérios transtornos à população atingida, seja ela uma simples residência, um bairro inteiro, uma indústria ou um hospital; causa também graves prejuízos à concessionária, que deixa de vender seu produto durante a interrupção (uma vez que o mesmo não é armazenável) e que enfrenta altos custos de manutenção de cada falha na rede. Por isso, a questão da continuidade do fornecimento aos consumidores constitui hoje um dos tópicos mais importantes da avaliação da qualidade dos serviços públicos de energia elétrica.

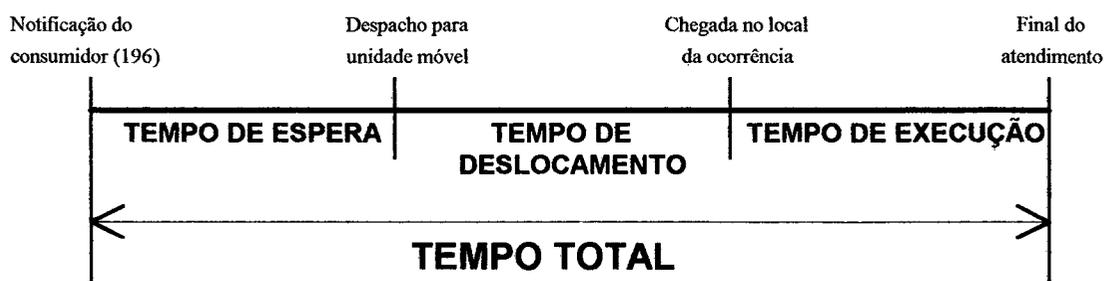
No Brasil a continuidade do fornecimento é aferida pelo DEC¹ - Duração Equivalente por Consumidor - que mede o total anual de horas que cada consumidor, em média, tem seu fornecimento interrompido. A Celesc, que fornece energia elétrica para 99% do estado de Santa Catarina, alcançou um DEC de 28.5 horas/consumidor/ano em 1993. As melhores concessionárias brasileiras têm este indicador na faixa de 10 horas/consumidor/ano. Nos países ditos desenvolvidos, este índice raramente ultrapassa os 45 minutos/ano, havendo casos de 5 minutos/ano.

Assim, aliado ao problema do planejamento e da construção de redes de distribuição, que devem ser executados de forma a maximizar as confiabilidades física e elétrica do fornecimento, está o problema do atendimento a interrupções na rede.

¹ Sobre este indicador, ver a Portaria 046, de 17 de abril de 1978, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, Ministério das Minas e Energia - MME.

A concessionária de energia elétrica, então, para atender adequadamente às interrupções, ou seja, reparar a rede e restaurar o fornecimento, dispõe de uma estrutura específica, composta de uma central de operação (despacho) e de unidades móveis chamadas turmas de emergência, que se comunicam com a central via rádio. Uma interrupção é notificada à central via contato telefônico de um consumidor/cliente que, sem energia devido à interrupção, a relata resumidamente ao atendente, que então a encaminha - através de documento específico ou via terminal de computador - imediatamente ao despachante que, se a unidade que cobre a área estiver livre, a despacha para o atendimento. Se esta unidade estiver ocupada em outra interrupção, o despachante designa a unidade que cobre uma área adjacente. Se a segunda unidade também estiver ocupada, a interrupção entra numa fila única de espera até que seja possível despachá-la, sendo que a posição da interrupção na fila é função da ordem cronológica de chegada e da sua classificação de prioridade. A grande maioria das interrupções, contudo, gera pequeno impacto no sistema, ou seja, atinge poucos consumidores simples, fazendo com que a prioridade tenha pouca influência no desempenho global da central de operação.

Desta forma, a qualidade de um atendimento é aferida por sua duração, que é subdividida como segue:



Estes tempos têm comportamento aleatório; as chegadas de ocorrências têm comportamento típico de Poisson, enquanto que a execução ou reparo segue, com boa aproximação, a distribuição exponencial. Em outras palavras, o comportamento dos serviços pode ser descrito conforme as hipóteses apresentadas no capítulo 4.

O tempo de espera depende da disponibilidade de unidades móveis, e o tempo de deslocamento depende da posição inicial da unidade em relação ao local da ocorrência. Já o tempo de execução é intrínseco à natureza dos reparos a serem efetuados, ou seja, para cada tipo de reparo há um conjunto de procedimentos cujas durações esperadas lhes são características, portanto difíceis de ser alteradas.

Assim, em termos de gerenciamento da qualidade do atendimento, acredita-se que é possível atuar somente sobre os tempos de espera e deslocamento, através da quantificação e locação das unidades móveis de emergência. O planejamento de uma sistemática de atendimento a interrupções que corresponda a um determinado padrão de

qualidade constitui, então, uma questão prioritária no contexto da distribuição de energia elétrica no Brasil.

1.2. Estrutura de Apresentação

Em virtude deste trabalho abordar um assunto ainda incipiente no Brasil, apresenta-se no próximo capítulo um panorama dos estudos que envolvem problemas de dimensionamento e localização de serviços de emergência. Na seqüência, são descritos os modelos de filas comumente utilizados neste tipo de problemas.

No quarto capítulo é então apresentado o modelo hipercubo em sua forma genérica, incluindo um exemplo ilustrativo com três unidades móveis de atendimento. Em seguida, são apresentadas as adaptações efetuadas no modelo genérico para torná-lo aplicável, no seu todo, ao problema em estudo.

Segue a apresentação da aplicação do modelo à região metropolitana da Grande Florianópolis, e uma discussão acerca dos resultados obtidos. Ao final, são tecidas algumas conclusões sobre o trabalho, bem como recomendações para o seu aprimoramento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE SERVIÇOS URBANOS DE EMERGÊNCIA

Em sendo consideravelmente ampla a literatura sobre o assunto, trata-se aqui de apresentar alguns trabalhos que demonstram a importância do tema e o universo de ferramentas utilizadas.

2.1. Corpo de Bombeiros

Um dos focos preferidos de pesquisa dos especialistas, a questão do planejamento de sistemas de combate a incêndios envolve uma série de problemas, desde políticas de despacho (abordagens analíticas e heurísticas) ao dimensionamento e localização de unidades de bombeiros.

O trabalho de Mirchandani & Reilly (1985), por exemplo, aborda o problema da distribuição espacial (localização) ótima das unidades. O artigo descreve inicialmente o *modus operandi* típico dos corpos de bombeiros das grandes cidades, ressaltando a necessidade de uma baixa ocupação ou carga de trabalho, para que haja a maior disponibilidade possível para atender aos incêndios, sempre graves e que requerem ação imediata no sentido de minimizar as perdas humanas (feridos, vítimas) e materiais.

A seguir, sua revisão bibliográfica classifica os modelos analíticos de locação em dois tipos: os modelos estáticos, que partem do pressuposto de que todas as unidades estão sempre disponíveis para serem despachadas a um incêndio, e os modelos dinâmicos, que consideram a possibilidade de algumas unidades não se encontrarem disponíveis por estarem atendendo outros incêndios.

Os modelos estáticos são considerados aplicáveis a cidades de pequeno e médio porte, e incluem tanto modelos de avaliação de performance quanto modelos de otimização, sendo que ambos fornecem resultados em função de um ou mais indicadores de desempenho, tais como tempo de resposta ou carga de trabalho.

Os modelos de otimização, por sua vez, são divididos em duas categorias: formulações por conjunto de cobertura e formulações por minimização do tempo de deslocamento (ou dos danos). As por conjunto de cobertura visam minimizar o número de unidades necessárias para que a distância ou o tempo de deslocamento não ultrapasse um determinado valor, e são apresentadas através de problemas de programação linear inteira.

Nas formulações por minimização, o número de unidades do sistema é uma variável exógena, isto é, é previamente definida e fornecida ao problema. Estas formulações se apresentam normalmente como problemas clássicos de p -medianas (*minisum*) ou p -centros (*minimax*), na forma de modelos de programação linear.

Os modelos dinâmicos são úteis em regiões ou serviços com alta demanda, em que as cargas de trabalho das unidades de serviço - e assim, as probabilidades das mesmas estarem ocupadas - são maiores. Neste caso, a questão não se resume apenas à localização das unidades, mas também a quantas e quais unidades devem ser despachadas. Dentre estes modelos, os mais importantes são o hipercubo e o de simulação.

O modelo hipercubo, apresentado no capítulo 4, constitui-se num modelo analítico de avaliação. Já o de simulação é uma representação em computador da heurística de operação de um Corpo de Bombeiros e, como tal, fornece *insights* avaliativos das políticas de despacho, das configurações das áreas de cobertura e do número de unidades que devem ser despachadas. O sistema compõe-se de um módulo gerador de ocorrências, um módulo que "executa" os despachos e um módulo de avaliação da política de despacho.

Os autores propõem, então, um modelo analítico que se baseia na abordagem por análise de utilidade, que usa a experiência dos bombeiros através de funções de utilidade multidimensionais $u(t_1, t_2)$, onde t_1 é o tempo de resposta da primeira unidade e t_2 é o da segunda unidade. A partir daí, o objetivo é minimizar o valor esperado dessa função, utilizando formulação p -medianas. A solução é encontrada através de algoritmo heurístico aproximado.

Um outro trabalho, de Kolesar & Walker (1974), propõe um algoritmo para o problema da relocação dinâmica de unidades de combate a incêndios. Este problema se verifica quando as unidades de uma central estão ocupadas em um incêndio, deixando sua região de cobertura desguarnecida. A solução usual consiste em relocar unidades externas, temporariamente, para as centrais vazias, de acordo com planos pré-traçados.

A proposta de Kolesar & Walker é formular matematicamente a decisão de relocação, que é dividida em quatro estágios que são resolvidos em seqüência:

1. Determinar a necessidade de relocação, verificando se existe alguma região descoberta.
2. Determinar as centrais vazias que serão preenchidas para cobrir todas as regiões com um número mínimo de movimentos.
3. Determinar as unidades que estão disponíveis para serem relocadas, de modo a minimizar o tempo médio de resposta.
4. Determinar as relocações, de modo a minimizar o deslocamento total.

Os estágios 2, 3 e 4 são problemas de programação linear inteira, sendo que o estágio 2 é um caso de problema de cobertura, o estágio 3 é um problema de transporte e o estágio 4 é um problema de atribuição.

2.2. Polícia

Um dos trabalhos mais importantes nessa área é o de Larson (1972), no qual é analisado minuciosamente o problema do patrulhamento policial pelas ruas das grandes cidades.

Após descrever exaustivamente o contexto e os problemas da atividade policial urbana, Larson apresenta modelos para determinação de tempos ou distâncias de deslocamento, quando estes dados não estão disponíveis diretamente. Primeiramente, é discutida a relação entre os tempos ou distâncias e as efetivas velocidades de deslocamento, em que estas são calculadas como médias que desconsideram flutuações decorrentes de tráfego, contornos, vias de mão única, etc. O autor demonstra que este cálculo pode levar a uma baixa estimativa do tempo de deslocamento. É demonstrado também que a geometria da área urbana tem pouco efeito no valor do tempo de deslocamento, da mesma forma que a quantidade de veículos de patrulha, desde que não haja despachos intersetoriais. Caso este tipo de despacho exista, o foco da questão torna-se identificar a patrulha que será despachada, de modo a minimizar o tempo de deslocamento. Larson identificou então quatro estratégias para o problema, sendo duas baseadas no centro de massa estrito, quando o despachante não sabe o local exato do incidente, e duas baseadas no centro de massa modificado, quando o local do incidente é conhecido. Também são analisados os efeitos das "barreiras" urbanas nos deslocamentos, tais como parques, rios, vias de mão única, etc. Ao final, foram buscadas soluções para a coleta de dados de pequenos deslocamentos e a validação dos modelos acima, em que os testes focaram a variável R , que é a razão entre a distância efetiva e a distância euclidiana entre dois pontos urbanos. Larson encontrou para R um valor próximo a 1.27, através de dedução matemática.

Depois do tempo de deslocamento, são apresentados modelos de patrulhamento preventivo, identificados de acordo com quatro tópicos de análise:

1. Tempo médio entre duas passagens da patrulha por um ponto de máxima cobertura.
2. Frequência média de passagens de uma patrulha que tenha também função de atender a despachos.
3. Probabilidade de coincidência espaço-temporal entre uma patrulha e um incidente independentemente localizado, de duração conhecida.
4. Alocação dos serviços de patrulhamento preventivo.

Larson discorre sobre a dificuldade de utilização destes modelos, devido ao fato de não haver, usualmente, independência entre o local do incidente e o da patrulha, uma vez que os agentes do incidente ou crime procuram saber a posição da patrulha antes de agir, monitorando o rádio ou simplesmente esperando que ela passe. Em vista disso, sugere

a necessidade de mais pesquisa e experimentação, principalmente na alocação (4º tópico), dado que esta não deve ser diretamente proporcional à densidade de crimes.

No capítulo seguinte, então, Larson apresenta e aplica um algoritmo de alocação de patrulhas policiais, que mostrou oferecer várias vantagens quanto à identificação da quantidade de patrulhas necessárias, devido principalmente a considerar as diferenças de demanda ao longo do dia e da semana. Este algoritmo é uma formulação de programação dinâmica que visa minimizar os custos associados ao tempo de espera¹ do incidente e que fornece, iterativamente, a alocação ótima das patrulhas. A aplicação do algoritmo no Departamento de Polícia de Nova Iorque reduziu o tempo médio de espera do sábado à noite de 3.5 minutos para 0.67 minutos, e no domingo de manhã o número de patrulhas foi reduzido em mais de 20%, também com acentuada redução do tempo de espera.

É também apresentado um modelo de simulação genérica no qual é processada a heurística das funções de despacho e patrulhamento, incluindo prioridades de atendimento, e que mostra que a existência destas prioridades contribui decisivamente para a redução da espera das chamadas prioritárias, e portanto dos custos associados.

Por fim, é avaliado o impacto de inovações tecnológicas tais como sistemas de localização automática das patrulhas, e discutida a validade do atendimento intersetorial, cujos benefícios indicam a necessidade de um reposicionamento tanto a nível local como global, para reduzir o tempo de deslocamento.

2.3. Outras Aplicações

Além do Corpo de Bombeiros e da Polícia, existem diversos outros serviços urbanos em que são aplicadas técnicas e modelos de Pesquisa Operacional.

O sistema de ambulâncias, por exemplo, suscita problemas análogos aos dos Corpos de Bombeiros. Localização de escolas, hospitais, postos de saúde e outros, são típicos problemas de cobertura. E há também os serviços de coleta e entrega de material, como lixo e correios.

Contudo, há um problema que é comum a quase todos estes serviços, e que também tem sido foco de pesquisas: a quantificação e a escala de trabalho do pessoal que executa os serviços.

Beltrami (1977) apresenta este tema propondo, primeiramente, um modelo de alocação não linear para o problema do escalonamento dos funcionários de coleta de lixo, baseado na minimização da soma das quantidades coletadas a cada dia. A não-linearidade está em que a quantidade não coletada de um dia depende da capacidade de coleta e da quantidade não coletada no dia anterior, ou seja, o problema depende da quantidade de

¹ Tempo entre a chamada e a chegada da patrulha ao local do incidente.

funcionários que trabalham a cada dia. Se esta dependência não for considerada, o problema assume a forma linear, que Beltrami demonstra que ainda assim equivale à forma não linear.

A seguir ele apresenta um modelo genérico para escalonamento de mão-de-obra, formulado como um problema de programação linear inteira do tipo "cobertura de conjuntos múltiplos", uma vez que os grupos de turnos das escalas diárias são subconjuntos do conjunto total dos turnos. Este modelo visa determinar uma escala geral de folga das equipes, de modo a minimizar o custo adicional de trabalho (horas extras, etc) e satisfazer restrições de necessidade de mão-de-obra.

Outros problemas importantes relativos a serviços de emergência são os de congestão (filas), causados pela saturação da estrutura de atendimento, em que as solicitações de serviço que chegam dos clientes não são imediatamente atendidas, devido à insuficiência de "servidores". O problema do dimensionamento de um sistema de atendimento com fila de espera reside basicamente na aleatoriedade tanto das chegadas de clientes como das durações dos atendimentos.

Tais problemas são descritos e analisados pela chamada Teoria das Filas, que constitui o assunto tratado a seguir.

3. MODELOS DE FILA UTILIZADOS

A Teoria das Filas é o "ramo da Pesquisa Operacional que explora os relacionamentos entre a demanda de um sistema de atendimento e os atrasos sofridos pelos usuários deste sistema" (Larson & Odoni, 1981). Também chamada de Teoria da Congestão, "utiliza conceitos básicos de processos estocásticos e de matemática aplicada para analisar o fenômeno da formação de filas e suas características" (Novaes, 1975), constituindo ferramenta essencial para a análise e o planejamento de serviços de atendimento urbano.

Não obstante as simplificações usualmente inerentes à aplicação de um modelo matemático a um problema real, e suas conseqüentes limitações, uma fila pode ser descrita por um processo de chegada de solicitações de serviço e por um sistema de atendimento formado por um ou mais servidores (Fig. 3.1). Os modelos de fila apresentados não têm outro tipo de prioridade a não ser a ordem de chegada, de acordo com a simplificação do problema analisado neste trabalho; também não são admitidas desistências de usuários; e o processo de atendimento é sempre de nível individual. A notação adotada neste trabalho é a usual, do tipo $X/Y/C$, onde a letra X indica o processo probabilístico de chegada, e a letra Y indica a distribuição dos tempos de atendimentos. Tanto para X como para Y , as distribuições utilizadas possuem a mesma notação: M para Poisson e Exponencial (M significa *memoryless*, ou sem memória), D para determinística, E_k para distribuição Erlang de ordem k , H_k para distribuição hiperexponencial de ordem k , e G para o caso geral (todas as distribuições, inclusive as citadas). A letra C , por fim, indica a quantidade de servidores ou postos de atendimento em operação simultânea.

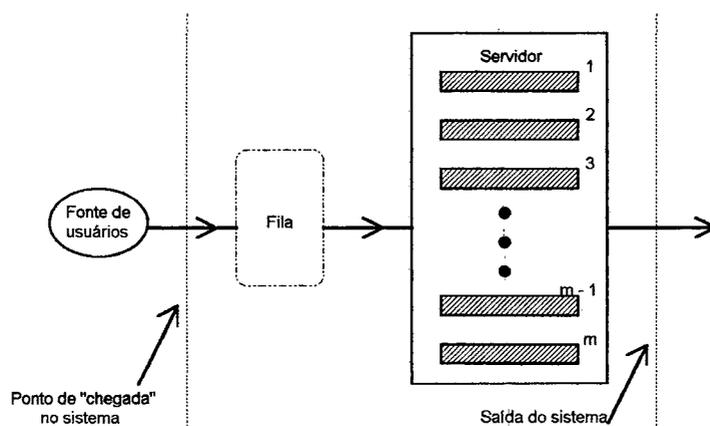


Figura 3.1 - Sistema de filas genérico

Geralmente, o tempo entre chegadas e o tempo de atendimento são variáveis aleatórias, X e S , respectivamente. Assumindo-as como independentes e identicamente distribuídas, os valores esperados destas variáveis aleatórias constituem grandezas de referência para os modelos de fila:

$$\frac{1}{\lambda} \equiv E[X] \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{\mu} \equiv E[S] \quad (3.2)$$

onde λ é a taxa de chegadas de usuários no sistema por unidade de tempo, e μ é a taxa de serviços executados por unidade de tempo. Para C servidores, a taxa de serviços do sistema é $C\mu$.

Admitindo-se o sistema em regime permanente, tem-se outras grandezas de interesse para a descrição analítica das filas:

\bar{W} \equiv valor esperado do tempo total do usuário no sistema;

\bar{L} \equiv valor esperado da quantidade de usuários no sistema;

\bar{W}_q \equiv valor esperado do tempo de espera dos usuários no sistema;

\bar{L}_q \equiv valor esperado da quantidade de usuários na fila do sistema;

Para estas grandezas, tem-se as relações

$$\bar{L} = \lambda \bar{W} \quad (3.3a)$$

$$\bar{L}_q = \lambda \bar{W}_q \quad (3.3b)$$

conhecidas como fórmulas de Little. Finalmente, é importante definir a taxa de utilização ou índice de congestionamento do sistema, que é dado pela razão entre a demanda média e a capacidade média de atendimento do sistema. Matematicamente, tem-se

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (3.4)$$

para um sistema com um único servidor. Para C servidores, a relação muda para

$$\rho = \frac{\lambda}{C\mu} \quad (3.5)$$

A definição detalhada destas grandezas pode ser encontrada em várias referências, sendo que nesta apresentação foram adotadas as descrições de Larson & Odoni (1981) e Novaes (1975), principalmente este último.

Em função das características do comportamento do sistema analisado neste trabalho, os modelos aplicáveis são os de chegadas por Poisson (M) e atendimento exponencial (M), ou seja, os modelos M/M/1 e M/M/C. Estes são, portanto, os modelos aqui discutidos.

3.1. O modelo M/M/1

Para este modelo, valem as seguintes hipóteses: 1) as chegadas são regidas pela distribuição de Poisson, com razão média constante igual a λ ; 2) o tempo de atendimento é distribuído exponencialmente, com parâmetro μ . Desta forma, sendo π_n a probabilidade de haver n usuários no sistema em regime permanente (*steady state*), tem-se

$$-(\lambda + \mu)\pi_n + \lambda\pi_{n-1} + \mu\pi_{n+1} = 0 \quad (3.6)$$

$$-\lambda\pi_0 + \mu\pi_1 = 0 \quad (3.7)$$

Destas duas relações obtém-se

$$\pi_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \pi_0 \quad (3.8)$$

e

$$\pi_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu}, \quad \text{para } \lambda < \mu \quad (3.9)$$

ou seja, a probabilidade de não haver usuários no sistema é equivalente ao complemento da taxa de utilização, o que é óbvio. Assim, a equação (3.8) pode ser também escrita da forma

$$\pi_n = (1 - \rho)\rho^n, \quad n \geq 0 \quad (3.10)$$

constituindo-se assim num caso de distribuição Geométrica, o que permite determinar a quantidade esperada de usuários no sistema e na fila:

$$\bar{L} = E[n] = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (3.11)$$

$$\bar{L}_q = E[q] = \sum_{n=2}^{\infty} (n-1)\pi_n = \frac{\rho^2}{1-\rho} \quad (3.12)$$

uma vez que só existe fila neste modelo quando há mais de um usuário no sistema, e que a quantidade de usuários na fila é igual à quantidade de usuários no sistema menos um.

Para o tempo de espera na fila, w_q , tem-se que seu valor esperado¹ igual a

$$\bar{W}_q = E[w_q] = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)} = \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} \quad (3.13)$$

Quando o sistema possui mais de um servidor, o modelo M/M/1 não é mais aplicável, passando-se a utilizar o modelo M/M/C.

3.2. O Modelo M/M/C

Neste caso, valem as mesmas hipóteses da fila M/M/1, exceto que agora estão disponíveis C servidores para atender os usuários. Então, para a fase de regime, as probabilidades das quantidades de usuários são descritas pelas relações:

$$-\lambda\pi_0 + \mu\pi_1 = 0 \quad (3.14)$$

$$-(\lambda + n\mu)\pi_n + \lambda\pi_{n-1} + (n+1)\mu\pi_{n+1} = 0, \quad 1 \leq n < C \quad (3.15)$$

$$-(\lambda + C\mu)\pi_n + \lambda\pi_{n-1} + C\mu\pi_{n+1} = 0, \quad n \geq C \quad (3.16)$$

Para este sistema, a solução é

$$\pi_n = \frac{\rho^n}{n!} \pi_0, \quad 1 \leq n < C \quad (3.17)$$

$$\pi_n = \frac{\rho^n}{C^{n-C} \cdot C!} \pi_0, \quad n \geq C \quad (3.18)$$

onde

$$\pi_0 = \left[\sum_{j=0}^{C-1} \frac{(C\rho)^j}{j!} + \frac{(C\rho)^C}{C!(1-\rho)} \right]^{-1} \quad (3.19)$$

¹ A dedução de \bar{W}_q está em Novaes (1975), páginas 64 a 67.

sendo ρ agora descrito pela equação (3.5).

As expectâncias do número de usuários no sistema e na fila são dadas pelas relações

$$\bar{L} = E[n] = \frac{(C\rho)^{C+1}}{(C-1)! \sum_{j=0}^C \frac{(C\rho)^j}{j!} [(C-j)^2 - j]} \quad (3.20)$$

$$\bar{L}_q = E[q] = \frac{\pi_0 \rho (C\rho)^C}{(1-\rho)^2 C!} \quad (3.21)$$

Pela relação (3.3) tem-se

$$\bar{W}_q = E[w_q] = \frac{\pi_0 \rho (C\rho)^C}{(1-\rho)^2 C! \lambda} = \frac{\pi_0 (C\rho)^C}{C\mu(1-\rho)^2 C!} \quad (3.22)$$

O modelo M/M/C já foi utilizado anteriormente no problema do dimensionamento de turmas de emergência (ver CODI, 1984), porém com resultados insatisfatórios, fazendo com que o problema fosse novamente estudado, desta vez utilizando como ferramenta de análise o modelo hipercubo, que se mostrou mais adequado a este tipo de problema, conforme ver-se-á no capítulo a seguir.

4. O MODELO HIPERCUBO - GERAL

Desenvolvido por Richard Larson¹, o modelo hipercubo constitui-se numa ferramenta específica para planejamento de sistemas urbanos, uma vez que considera as complexidades tanto geográficas das cidades ou aglomerados urbanos como das políticas de despacho dos veículos, ao invés das usuais hipóteses de uniformidade necessárias para tornar um modelo analiticamente viável, caso típico do modelo M/M/C. Implementado em computador, a solução do modelo, em lugar de ser uma expressão fechada, é um conjunto de valores das probabilidades de estado e dos vários indicadores de desempenho associados ao sistema urbano em questão.

A geografia da cidade é modelada através da sua divisão em um conjunto de *átomos geográficos*, cada qual representando uma fonte independente de solicitações de serviço. Uma *área de cobertura primária* de uma Unidade Móvel de Emergência (UME) é composta pelos átomos aos quais esta UME, quando disponível, tem preferência para despacho, mesmo se as outras UMEs também estiverem disponíveis. Desta forma, as áreas de cobertura podem ter qualquer formato, inclusive formas não contíguas. Uma UME *fixa*, quando disponível, está sempre posicionada em um determinado átomo, enquanto que uma UME *móvel* (p.e., um carro de patrulha policial) pode estar probabilisticamente localizada em um dos átomos de sua *área de patrulhamento*, que não precisa coincidir com sua área de cobertura primária.

O nome do modelo deriva do espaço de estados que descreve a disponibilidade dos servidores (UMEs). Cada UME pode estar em um dos dois estados: *ocupada* ou *livre*. Um estado particular do sistema é descrito pela lista das UMEs que estão ocupadas e livres. Por exemplo, o estado 011 corresponde a um sistema com três UMEs em que a UME 1 está livre e as UMEs 2 e 3 estão ocupadas. O espaço de estados para um sistema de três servidores é dado pelos vértices de um cubo, conforme a figura 4.1. À medida que o número de UMEs cresce além de três, a noção do cubo é transposta para o espaço N-dimensional, chamado *hiperespaço*, donde então o nome *hipercubo*. O modelo hipercubo permite a opção da existência de uma fila de espera de serviços ainda não atendidos; caso esta opção seja utilizada, o espaço de estados deve ser aumentado por uma “cauda infinita”.

¹ O conteúdo deste capítulo está fortemente baseado em Larson & Odoni (1981). Parte da apresentação de Beltrami (1977) também é utilizada.

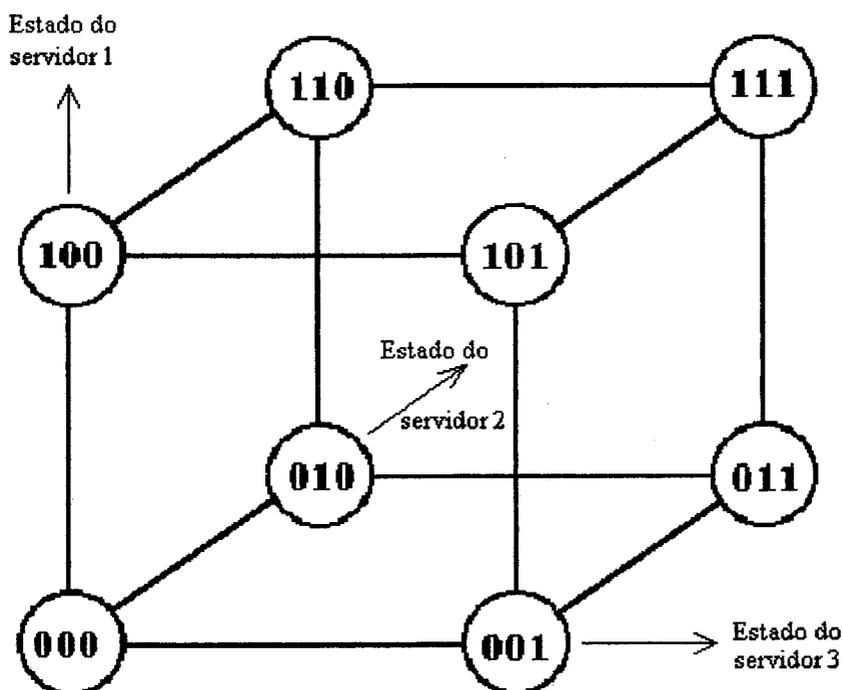


Figura 4.1 - Espaço de estados do hipercubo para um problema com três servidores

Caso o serviço urbano analisado envolva prioridades nas chamadas, explícita ou mesmo implicitamente, o modelo pode ser adaptado para considerar os procedimentos de despacho para uma classe limitada de prioridades de atendimento. No entanto, esquemas complexos de prioridades não são abrangidos pelo modelo, tais como:

- a. manutenção dos chamados de baixa prioridade na fila de espera para serem atendidos pelo servidor primário associado aos átomos dos chamados;
- b. Interrupção de um serviço de baixa prioridade para despachar o servidor para um chamado de maior prioridade;
- c. posicionamento seletivo dos chamados na fila de espera em função da prioridade.

Tais esquemas são melhor analisados por modelos de simulação, normalmente específicos para cada problema. No caso da distribuição de energia elétrica, embora a política de despacho contemple os três esquemas acima, o modelo hipercubo pode ser utilizado porque a grande maioria dos chamados são de baixa prioridade, de forma que chamados especiais praticamente não influem na performance global do sistema. O esquema *a*, em particular, foi adaptado na aplicação do modelo, conforme ver-se-á no capítulo 5.

Após a apresentação das hipóteses chaves do modelo, no item 4.1 abaixo, o modelo em si é apresentado a partir de um exemplo com três servidores, ilustrando assim eficazmente a sua potencialidade e o seu âmbito de aplicação.

4.1. Hipóteses do Modelo

São nove as hipóteses básicas de aplicação do modelo hipercubo:

1. *Átomos Geográficos.* A área na qual o sistema urbano presta serviço pode ser dividida em um número N_A de “átomos geográficos”. No modelo, cada átomo é representado como um único ponto, localizado próximo ao centro real do átomo.
2. *Chegadas poissonianas independentes.* As solicitações de serviço dos clientes são geradas como um processo de Poisson, independentemente aos átomos. A taxa de chegadas poissonianas λ_j do átomo j ($j = 1, 2, \dots, N_A$) é conhecida ou pode ser estimada.
3. *Tempos de deslocamento.* Há disponibilidade de dados para estimar o tempo médio de deslocamento τ_{ij} entre cada átomo i e cada átomo j ($i, j = 1, 2, \dots, N_A$). Na ausência de tais dados, podem ser obtidas aproximações plausíveis dos tempos de deslocamento utilizando conceitos de probabilidade geométrica (via distâncias Euclidianas ou Manhattan, ou via relações tempo-distância empíricas).
4. *Servidores.* Existem N servidores ou UMEs espacialmente distribuídos, cada um podendo se deslocar para qualquer um dos átomos da região atendida:
5. *Localização dos servidores.* A localização de cada UME, quando livre, é conhecida (ao menos estatisticamente). Por exemplo, uma radiopatrulha pode alocar 50% de seu tempo de patrulhamento no átomo 12 e 25% cada para os átomos 8 e 12. Uma UME fixa, como uma ambulância ou um caminhão de entregas, estaria sempre localizada num determinado átomo, quando livres. Para UMEs não fixas, o conjunto de átomos nos quais a UME pode estar localizada quando estiver livre é chamado de *área de patrulhamento* da UME. Em geral, as áreas de patrulhamento podem sobrepor-se.
6. *Despacho de um servidor.* Para atender a cada solicitação de serviço, apenas uma UME é despachada para o local do chamado, dado que pelo menos uma UME esteja disponível dentro da região de serviço. Se

não houver UME disponível, o chamado tanto pode entrar numa fila junto com outros chamados anteriores como pode ser perdido, ou ainda ser atendido por um serviço “backup” (por exemplo, a polícia pode cobrir um serviço de ambulâncias temporariamente saturado). Se os chamados entram numa fila, são posteriormente despachados de acordo com a disciplina da fila, que não depende da duração do atendimento ou da localização do chamado; tais como FIFO, LIFO, e aleatório. Após o término de um serviço, a UME tanto pode ser despachada para um chamado da fila como pode retornar à sua base geográfica.

7. *Preferência de despacho.* O despacho de um servidor obedece um esquema fixo de preferência geográfica, ou seja, se por exemplo um chamado chega do átomo 12, então há uma lista ordenada de UMEs, tipo (3, 1, 7, 5, 6, 4, 2) para um serviço urbano com sete servidores, que especifica a preferência do despachante para designar a UME que vai ao átomo 12. O despachante começa com a primeira UME da lista, no caso a nº 3, e a designa para o atendimento, se ela estiver disponível. Neste exemplo, então, o átomo 12 pertence à área de cobertura primária da UME 3. Se a primeira da lista estiver ocupada, o despachante designa a segunda da lista, se estiver livre, no caso a nº 1. O despachante desce a lista até que uma UME livre seja encontrada (se houver), para designá-la. Este procedimento é chamado de “preferência fixa”, uma vez que a lista ordenada das preferências não muda com o estado do sistema. No entanto, a lista de preferência pode mudar por átomos, ou seja, a lista para o átomo $i + 1$ poderia ser (5, 6, 3, 1, 7, 2, 4). O modelo pode operar com qualquer esquema de preferência fixa de despacho. Com N_A átomos e N servidores, são possíveis $(N!)^{N_A}$ diferentes esquemas de despacho.
8. *Tempos de execução dos serviços.* O tempo de execução para um chamado, incluindo tempo de deslocamento, tempo no local do chamado e um possível tempo de “follow-up” associado, tem um valor médio conhecido. Geralmente, cada UME pode ter seu próprio tempo médio de execução. Além disso, em função da imprevisibilidade dos tempos de execução nos sistemas reais, há variações consideráveis em torno do(s) valor(es) médio(s). Como medida dessa variabilidade, o desvio padrão é assumido como aproximadamente igual à media. A análise matemática assume tempos de execução exponenciais

negativos, porém foram encontrados desvios razoáveis desta hipótese que contudo não alteram, na prática, a precisão preditiva do modelo.

9. *Dependência do tempo de execução do tempo de deslocamento.* As variações no tempo de execução que são imputadas às variações no tempo de deslocamento são assumidas como de segunda ordem, comparadas com as variações dos tempos no local do chamado e de “follow-up”. Esta hipótese, que limita a aplicabilidade do modelo, é mais verificada nos serviços policiais, serviços de reparo de emergência e alguns serviços sociais de visitas a domicílios, e menos verificada em serviços rurais de emergência, especialmente ambulâncias rurais. Esta hipótese não implica em que o tempo de deslocamento seja ignorado no cálculo do tempo médio de execução; através do processo de calibração média, o tempo médio de execução μ_n^{-1} para o servidor n é igual à soma dos seus tempos médios de deslocamento, no local do chamado e de “follow-up”.

Dadas as hipóteses acima, o modelo calcula valores numéricos para os seguintes indicadores de desempenho:

1. *A nível de região.* Tempo médio de deslocamento, ocupação (carga de trabalho) média e balanço de ocupação, fração de despachos de uma UME fora de sua área de cobertura primária.
2. *A nível de UME.* Ocupação (medida como fração do tempo total em serviço que a UME esteve trabalhando), tempo médio de deslocamento, fração de atendimentos realizados fora de sua área de cobertura primária.
3. *A nível de área de cobertura primária.* Ocupação gerada internamente (dado fornecido), tempo médio de deslocamento, fração de atendimentos realizados por outras UMEs que não a sua.
4. *A nível de átomo.* Ocupação gerada internamente (também dado fornecido), tempo médio de deslocamento, fração de atendimentos realizados por cada UME n ($n = 1, 2, \dots, N$).

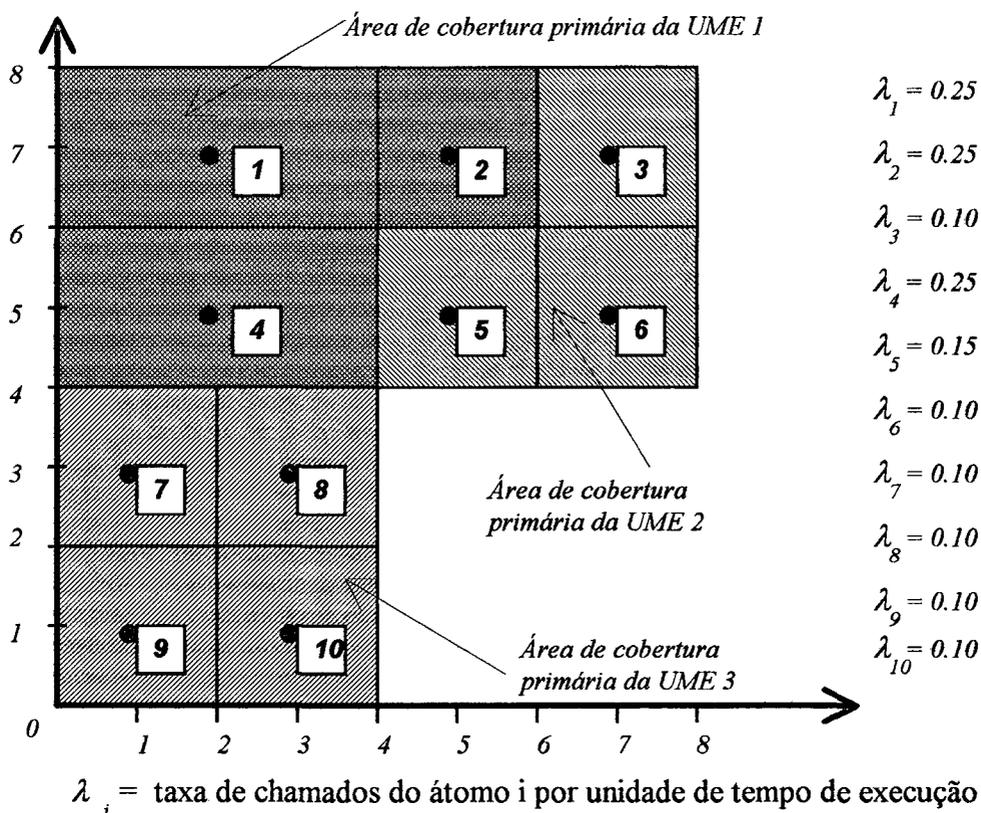
Se o sistema real em análise for uma força de patrulhamento policial, pode-se calcular a frequência de passagens de um veículo de patrulha em cada átomo geográfico.

4.2. O Sistema Exemplo

Com o objetivo de ilustrar a aplicação do modelo hipercubo e de introduzir sua estrutura matemática geral, apresenta-se agora um sistema simples de três

servidores conforme figura 4.2. A região é dividida em 10 átomos geográficos, cada qual atuando como um gerador poissoniano independente de solicitações de serviço.

Figura 4.2 - Mapa da cidade de três servidores



Para facilitar a apresentação, considera-se o tempo médio de execução igual para cada UME n , com valor μ^{-1} . Considera-se também que o modelo hipercubo admite fila de capacidade infinita, ou seja, valem as hipóteses apresentadas no capítulo anterior.

As taxas de chamada λ_j de cada átomo j são apresentadas na figura acima (expressas em chamadas por unidade de tempo médio de execução), com λ_5 , por exemplo, equivalendo a 0.15 chamadas por unidade de tempo médio de execução. Cada UME tem sua área de cobertura primária, que consiste de um conjunto de átomos aos quais sempre é dada a primeira preferência de despacho. No caso, a área de cobertura primária da UME 2 é composta pelos átomos 3, 5 e 6. A segunda UME na lista de preferência de despacho é escolhida com base na sua proximidade geográfica. O esquema completo de preferência de despacho é apresentado na tabela 5.1 abaixo. Observa-se, neste exemplo, que a UME 1 é a segunda na lista de preferência de todos os chamados das áreas de cobertura 2 e 3; assim, a UME não enfrenta somente uma pesada carga de trabalho em sua área de cobertura primária, que corresponde a 50% do total, mas também é a primeira a cobrir o resto da região! Observa-se também que a própria

área de cobertura 1 é dividida em termos de unidade de backup²: a UME 2 é backup dos átomos 1 e 2, enquanto que a UME 3 é backup do átomo 4. Com isto, pode-se afirmar que a complexidade dos esquemas de preferência de despacho não influi sobremaneira na dificuldade de solução das equações de equilíbrio do modelo hipercubo.

Tabela 4.1. - Preferências de despacho para o sistema-exemplo

Átomo	ESQUEMA DE DESPACHO		
	Primeira UME	Segunda UME	Terceira UME
1	1	2	3
2	1	2	3
3	2	1	3
4	1	3	2
5	2	1	3
6	2	1	3
7	3	1	2
8	3	1	2
9	3	1	2
10	3	1	2

Se o interesse reside apenas nos desempenhos em termos de carga de trabalho, não é necessário incluir a matriz de tempos de deslocamento interátomos (t_{ij}) nem a matriz de probabilidades de localização das UMEs quando livres. Basta somente o esquema de preferência de despacho, as taxas de chamada dos átomos, tempos médios de execução, e o comportamento da fila (aqui, capacidade infinita).

Neste exemplo todos os tempos médios de execução são iguais e constantes. Com esta restrição, o modelo de fila associado, caso não houvesse interesse na identidade dos servidores ocupados, seria simplesmente o modelo M/M/C, apresentado no capítulo anterior. Mas o espaço de estados no qual a identidade dos servidores é obtida é mais complicado do que o conjunto de inteiros não-negativos correspondentes ao modelo M/M/C. Simbolicamente, se se tem b_n = estado do servidor n ($b_n = 0$ para “livre”, ou $b_n = 1$ para “ocupado”), o estado do sistema é dado por $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$. O conjunto de todos os B s possíveis é denotado por C_n , que corresponde aos vértices de um hipercubo N -dimensional. O peso de B , denotado $w(B)$, é igual ao número de servidores ocupados no estado B . Por exemplo, o peso de $\{0, 1, 1\}$ é 2.

Para o caso em que os tempos médios de execução são iguais, pode-se utilizar o conceito de peso para relacionar o espaço de estados do hipercubo com o espaço de estados simplificado do modelo M/M/C. Esta equivalência é obtida através da junção de todos os estados de mesmo peso, chamada de w_0 . A soma das probabilidades destes estados equivale à probabilidade do estado S_{w_0} ocorrer no modelo M/M/C. Por

² A expressão “backup” equivale aqui à segunda UME na lista de preferência de despacho de um átomo.

exemplo, os estados 001, 010 e 100 têm peso 1, e a soma de suas probabilidades deve ser igual à probabilidade do estado S_j no modelo M/M/3.

4.3. Transição Entre Estados

No modelo hipercubo, as transições entre os estados ocorrem de modo idêntico às transições em outros modelos de filas. O modelo hipercubo admite que apenas uma UME é designada para atender um chamado. Admitindo também que é zero a probabilidade de chegada³ de dois chamados simultaneamente, tem-se que uma transição do estado (0, 0, 0) para o estado (0, 1, 0) seria permitida, enquanto que uma transição do estado (0, 0, 0) para o estado (0, 1, 1) não o seria, pois significaria que duas unidades livres ficariam ocupadas no mesmo instante. Da mesma forma, ao se admitir que cada uma das UMEs ocupadas está trabalhando independentemente do local do chamado para o qual foi designada, também é virtualmente impossível que duas UMEs ocupadas fiquem livres no mesmo instante; assim, uma transição do estado (1, 0, 1) para o estado (0, 0, 1) seria permitida, enquanto que uma transição do estado (1, 0, 1) para o estado (0, 0, 0) não seria.

Em síntese, qualquer transição de um passo é permitida, e todas as transições com mais de um passo não são. Tal característica é decorrente da natureza das distribuições dos intervalos entre solicitações e dos tempos de atendimento (exponenciais negativas). As transições entre os estados pode ser visualizada no hipercubo: uma vez que uma transição de um passo muda somente um dos 0s ou 1s do estado do sistema (ou seja, somente uma UME muda de estado), diz-se que a mesma ocorre em uma *borda* do hipercubo, onde uma borda representa uma linha reta que conecta dois vértices adjacentes do hipercubo.

Para exemplificar a combinação dos conceitos de estado e de transições, considerar-se-á o sistema-exemplo acima apresentado, que inicia com todas as UMEs livres. Suponha-se que ocorrem os seguintes eventos:

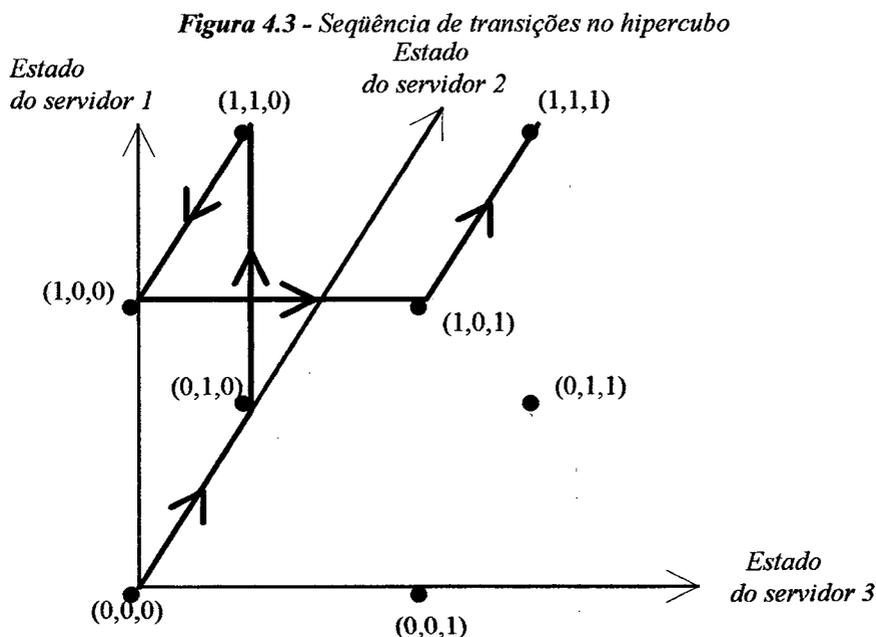
1. Chega um chamado do átomo 6.
2. Chega um chamado do átomo 1.
3. A UME 2 termina o serviço de seu chamado.
4. Chega um chamado do átomo 4.
5. Chega um chamado do átomo 3.

Lembrando que o átomo 6 pertence à área de cobertura primária da UME 2, o chamado deste átomo resultaria em que a UME 2 ficaria ocupada, causando uma transição do estado (0, 0, 0) para o estado (0, 1, 0). Analogamente, o próximo chamado faria com que a UME 1 ficasse ocupada, resultando então numa transição do estado (0,

³ Infinitésimo de segunda ordem.

1, 0) para o estado (1, 1, 0). A seguir, com a UME 2 ficando livre, o sistema faz uma transição para o estado (1, 0, 0). Na seqüência, ao chegar um chamado do átomo 4, que pertence à área de cobertura primária da UME 1, verifica-se que esta está ocupada atendendo outro chamado. Como a primeira UME de backup, UME 3, está livre, ela é despachada para o atendimento, resultando em um despacho interáreas de cobertura. O sistema agora muda do estado (1, 0, 0) para o estado (1, 0, 1). Finalmente, quando chega um chamado do átomo 3, a UME 2 é despachada, fazendo com que o sistema entre no *estado de saturação* (1, 1, 1), em que se chegar algum outro chamado, este terá que ficar esperando numa fila.

O comportamento total do sistema na situação acima descrita pode ser visualizado na Figura 4.3 abaixo, que demonstra a transição dos estados como uma seqüência contínua de deslocamentos pelas bordas do cubo.



4.4. Taxas de Transição no Hipercubo

Neste ponto, far-se-á a associação entre as taxas de chamados dos átomos e de serviço das UMEs com os estados e suas transições no hipercubo.

Utilizando o sistema-exemplo supra, suponha-se que o sistema está no estado “vazio”, (0, 0, 0). Lembrando que unidade de tempo do sistema equivale ao tempo de execução, e lembrando também que a taxa de chamados da área de cobertura 1 é 0.75 chamados por unidade de tempo, da área de cobertura 2 é 0.35 e da área de cobertura 3 é 0.40, tem-se então uma taxa de transição do estado (0, 0, 0) para o estado (1, 0, 0) igual a 0.75 chamados por unidade de tempo. Da mesma forma, a taxa de

transição do estado $(0, 0, 0)$ para o estado $(0, 1, 0)$ é de 0.35 por unidade de tempo e para o estado $(0, 0, 1)$ é de 0.40 chamados por unidade de tempo.

Analogamente, a taxa de transição de um estado do sistema para outro estado adjacente que tenha uma UME ocupada a menos é igual a 1 por unidade de tempo. Estas transições são chamadas de *descendentes*, significando a diminuição do número de UMEs ocupadas. As transições que resultam no despacho de uma UME são chamadas *ascendentes*, pois o total de UMEs ocupadas foi acrescido de 1.

Apresentadas as transições ascendentes básicas, resta especificar as demais transições ascendentes, que dependem do esquema de preferência de despacho, o que torna mais complexa a especificação das taxas.

Contudo, um grupo de transições ascendentes é particularmente fácil de especificar: dado que todos os chamados são imediatamente atendidos (não entram na fila de espera) se houver ao menos uma UME disponível, todos os estados que estão a uma UME do estado de saturação (neste caso, estados 110, 101 e 011) devem apresentar taxa de transição ascendente equivalente à taxa global de chamados da região atendida pelo sistema, λ , que no sistema-exemplo é igual a 1.5. Assim, todas as transições ascendentes para o estado 111 devem ser iguais a λ .

O cálculo dos valores das transições ascendentes restantes é efetuado de forma análoga ao exemplo a seguir, da transição do estado 100 para o estado 101. A taxa desta transição consiste na soma de duas taxas: a taxa de chamados da área de cobertura primária 3 mais a taxa da parte da área de cobertura primária 1 que tem a UME 3 como primeiro backup. A primeira taxa é simplesmente 0.40 chamados por unidade de tempo, e a segunda é a taxa de chamados do átomo 4 (da área de cobertura 1), que tem a UME 3 como primeiro backup (ver tabela 4.1). Assim, a taxa de transição do estado 100 para o estado 101 é $(0.40 + 0.25) = 0.65$ chamados por unidade de tempo.

Genericamente, então, as taxas das transições ascendentes são dadas pela soma da taxa de chamados da área de cobertura primária da UME que fica ocupada com as taxas de chamados dos átomos que têm a UME em questão como backup e cujas UMEs anteriores de seus (dos átomos) esquemas de preferência de despacho estejam ocupadas.

O diagrama de transição dos estados completo para o sistema-exemplo (excluindo a cauda infinita) é mostrado na figura abaixo.

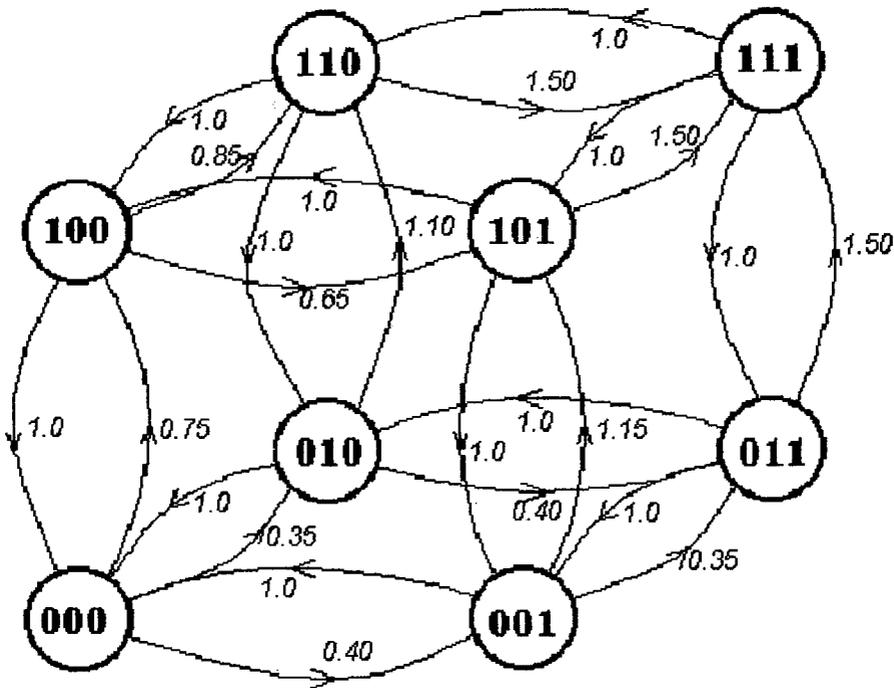


Figura 4.4 - Diagrama de transição de estados do hipercubo para sistemas não saturados; os valores referem-se ao sistema-exemplo; não são apresentados os estados que envolvem filas.

4.5. Equações de Equilíbrio em Regime Permanente

Embora seja possível visualizar este processo num cubo tridimensional, esta possibilidade não se verifica para $N > 3$. Em vista disso, torna-se necessário escrever as equações de equilíbrio do sistema em regime permanente sem recorrer ao auxílio visual. Para tanto, são definidas as seguintes grandezas:

π_{ijk} \equiv probabilidade de o sistema estar no estado $\{i, j, k\}$ (isto $p/N = 3$);

P_n \equiv probabilidade de haver n UMEs ocupadas;

P_Q \equiv probabilidade de haver uma fila de comprimento positivo.

Do modelo M/M/3 (equação 3.19), fazendo $\lambda = 1.5$ e $\mu = 1$, tem-se

$$P_0 = \left[1 + 1.5 + \frac{(1.5)^2}{2} + \frac{(1.5)^3}{6} \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} \right]^{-1} \cong 0.2105 \quad (4.1a)$$

pois $\rho = \frac{\lambda}{C\mu}$, mas $\mu = 1$, por hipótese, levando a $N\rho = \lambda$, sendo λ a soma de todas as taxas de chamados dos átomos, ou seja, $N\rho = 1.5$. Por outro lado, tem-se também neste caso que N é igual a 3.

Da equação (3.18) tem-se

$$P_1 = \frac{24}{16} P_0 \cong 0.31579 \quad (4.1b)$$

$$P_2 = \frac{18}{16} P_0 \cong 0.23684 \quad (4.1c)$$

$$P_3 = \frac{8}{16} P_0 \cong 0.11842 \quad (4.1d)$$

e assim

$$P_Q = 1 - \sum_{n=0}^N P_n = 1 - (P_0 + P_1 + P_2 + P_3) \cong 0.11842 \quad (4.1e)$$

Com estes resultados pode-se então escrever as equações de balanço de fluxo de cada estado:

$$\pi_{000}(0.75 + 0.40 + 0.35) = 1.0(\pi_{100} + \pi_{010} + \pi_{001}) \quad (4.2a)$$

$$\pi_{100}(0.85 + 0.65 + 1.0) = 1.0(\pi_{110} + \pi_{101}) + 0.75\pi_{000} \quad (4.2b)$$

$$\pi_{010}(1.10 + 0.40 + 1.0) = 1.0(\pi_{110} + \pi_{011}) + 0.35\pi_{000} \quad (4.2c)$$

$$\pi_{001}(1.15 + 0.35 + 1.0) = 1.0(\pi_{101} + \pi_{011}) + 0.40\pi_{000} \quad (4.2d)$$

$$\pi_{110}(1.5 + 1.0 + 1.0) = 1.0\pi_{111} + 1.10\pi_{010} + 0.85\pi_{100} \quad (4.2e)$$

$$\pi_{101}(1.5 + 1.0 + 1.0) = 1.0\pi_{111} + 0.65\pi_{100} + 1.15\pi_{001} \quad (4.2f)$$

$$\pi_{011}(1.5 + 1.0 + 1.0) = 1.0\pi_{111} + 0.40\pi_{010} + 0.35\pi_{001} \quad (4.2g)$$

$$\pi_{111}(1.0 + 1.0 + 1.0) = 1.5(\pi_{110} + \pi_{101} + \pi_{011}) \quad (4.2h)$$

e, adicionalmente,

$$\pi_{000} + \pi_{100} + \pi_{010} + \pi_{001} + \pi_{110} + \pi_{101} + \pi_{011} + \pi_{111} = 1 - P_Q \quad (4.3)$$

Conceitualmente, as equações (4.2) significam que a somatória das transições que saem de um estado é igual à somatória das transições que entram no mesmo estado, sendo as somatórias ponderadas pelas probabilidades dos estados de origem de cada transição. A equação (4.3) representa, obviamente, o universo das probabilidades de ocupação dos estados para um sistema com fila de capacidade infinita. Para os casos de fila de capacidade zero, $P_Q = 0$.

O conjunto das equações (4.2) acima forma um sistema de 2^N equações lineares típico, que pode ser prontamente resolvido pelas ferramentas matemáticas disponíveis, sendo entretanto necessária a substituição de uma das equações (4.2), a escolher, pela equação (4.3). No presente trabalho, conforme ver-se-á no capítulo 5, foi

adotado o método de Gauss da decomposição triangular via matriz LU, obtida através de sucessivas eliminações de elementos da matriz de coeficientes das equações de equilíbrio.

É de se notar que o sistema de equações (4.2) acima apresenta solução somente quando o sistema não for saturado, ou seja, quando $\rho < 1$.

O uso destas equações no sistema-exemplo levou aos seguintes resultados:

$$\pi_{000} = \mathbf{0.21053}$$

$$\pi_{100} = \mathbf{0.13669}$$

$$\pi_{010} = \mathbf{0.08863}$$

$$\pi_{001} = \mathbf{0.09047}$$

$$\pi_{110} = \mathbf{0.09489}$$

$$\pi_{101} = \mathbf{0.08894}$$

$$\pi_{011} = \mathbf{0.05301}$$

$$\pi_{111} = \mathbf{0.11842}$$

4.6. Medidas de Desempenho do Sistema

Uma das propriedades mais interessantes do modelo hipercubo é que estas mesmas probabilidades de estado são utilizadas como base para o cálculo dos vários e importantes indicadores de desempenho do sistema, como segue.

Ocupações. Pode-se obter imediatamente as ocupações ou cargas de trabalho das UMEs individualmente consideradas. A ocupação ρ_n do servidor n , que é definida como a fração do tempo em que a UME n está ocupada, é igual à soma das probabilidades dos estados que têm o estado da UME n igual a 1 mais a fração do tempo em que existe uma fila (quando todas as UMEs estão ocupadas e há chamados entrando no sistema). Desta forma, para o sistema-exemplo tem-se

$$\rho_1 = \pi_{100} + \pi_{101} + \pi_{110} + \pi_{111} + P_Q = \mathbf{0.5574} \quad (4.4a)$$

$$\rho_2 = \pi_{010} + \pi_{110} + \pi_{011} + \pi_{111} + P_Q = \mathbf{0.4734} \quad (4.4b)$$

$$\rho_3 = \pi_{001} + \pi_{101} + \pi_{011} + \pi_{111} + P_Q = \mathbf{0.4693} \quad (4.4c)$$

Vale também aqui a assertiva de que para sistemas de capacidade zero, $P_Q = 0$.

Estes resultados condizem com a condição de que a ocupação média $\rho = \lambda/3\mu = 0.5$. É importante notar que a divisão da carga de trabalho entre as UMEs fez com que as ocupações das mesmas fossem mais equilibradamente distribuídas do que as

cargas de trabalho da áreas de cobertura primária; se cada UME atendesse somente os chamados de sua área de cobertura primária, as ocupações seriam $\rho_1 = 0.75$, $\rho_2 = 0.35$ e $\rho_3 = 0.40$. De fato, é possível para uma determinada área de cobertura gerar mais chamados do que uma UME poderia atender, e a divisão da carga de trabalho facilitaria o intercâmbio entre as UMEs (isso se, obviamente, o sistema não for saturado, ou seja, se a soma dos λ_i s for inferior a N).

Freqüências de despachos interátomos. Um indicador interessante a ser calculado é

$$f_{nj} \equiv \text{parcela dentre todos os despachos que designam a UME } n \text{ ao átomo } j. \text{ Obviamente, } \sum_{n,j} f_{nj} = 1.$$

Seja

$$E_{nj} \equiv \text{conjunto dos estados nos quais a UME } n \text{ pode ser designada para uma chamado proveniente do átomo } j.$$

No sistema-exemplo, $E_{21} = \{100, 101\}$ e $E_{11} = \{000, 010, 001, 011\}$. Se o sistema estiver em *qualquer* estado pertencente ao conjunto E_{nj} , a fração dos chamados que resultam no despacho na UME n ao átomo j é λ_j/λ . Assim, *exceto esperas na fila*, a parcela dentre todos os despachos que designam a UME n ao átomo j é (λ_j/λ) , multiplicada pela soma das probabilidades dos estados em E_{nj} . Contudo, a UME n também pode ser designada ao átomo j devido a um chamado que está numa fila de espera de atendimentos, o que torna mais conveniente escrever a relação

$$f_{nj} = f_{nj}^{[1]} + f_{nj}^{[2]} \quad (4.5)$$

onde $f_{nj}^{[1]}$ = fração dentre todos os despachos que designam a UME n ao átomo j para atender um chamado que *não entrou* na fila de espera.

$f_{nj}^{[2]}$ = fração dentre todos os despachos que designam a UME n ao átomo j para atender um chamado que estava na fila de espera.

Conforme exposto acima, para estados não saturados tem-se

$$f_{nj}^{[1]} = \frac{\lambda_j}{\lambda} \sum_{B_i \in E_{nj}} P_{B_i} \quad (4.6)$$

O termo $f_{nj}^{[2]}$ é igual ao produto de três termos: (1) a probabilidade de que uma chegada aleatória de um chamado fique na fila de espera; (2) a probabilidade condicional de que o chamado seja proveniente do átomo j , dado que está na fila de espera; e (3) a probabilidade condicional de que a UME n seja a despachada, dado que o chamado é proveniente do átomo j e que está na fila de espera. Obviamente, o chamado entrará na fila de espera quando todas as N UMEs estiverem ocupadas, resultando para o primeiro termo

$$P'_Q \equiv P_Q + \pi_{11\dots 1} \quad (4.7)$$

O segundo termo equivale à fração de chamadas (λ_j/λ) que são geradas no átomo j , e que é independente da existência de uma fila de espera; O terceiro termo deriva do fato os chamados são atendidos num esquema tipo FIFO ou outro que não leve em conta o local do chamado e o local da UME (que se encontra no local do chamado anterior). Assim sendo, qualquer uma das N UMEs é igualmente passível de ser despachada para qualquer chamado da fila de espera, o que dá uma probabilidade condicional de $1/N$. Em resumo, então, tem-se

$$f_{nj}^{[2]} = \frac{\lambda_j P'_Q}{\lambda N} \quad (4.8)$$

e, portanto,

$$f_{nj} = \frac{\lambda_j}{\lambda} \sum_{B_i \in E_{nj}} P_{B_i} + \frac{\lambda_j}{\lambda} \frac{P'_Q}{N} \quad (4.9)$$

A partir desta relação pode-se calcular algumas medidas de desempenho relativas às frequências de despacho:

1. Fração dentre todos os despachos que são interáreas de cobertura

$$f_I = \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{j \notin \text{area de} \\ \text{cobertura } n}} f_{nj} \quad (4.10)$$

2. Fração dos despachos da UME n que são interáreas de cobertura

$$f_{I_n} = \frac{\sum_{\substack{j \notin \text{area de} \\ \text{cobertura } n}} f_{nj}}{\sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}} \quad (4.11)$$

3. Fração dos chamados da área de cobertura i que são atendidas por outra UME que não a i

$$f'_{I_i} = \frac{\sum_{n \neq i} \sum_{\substack{j \in \text{area de} \\ \text{cobertura } i}} f_{nj}}{\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{j \in \text{area de} \\ \text{cobertura } i}} f_{nj}} \quad (4.12)$$

Estas relações são demonstradas no sistema-exemplo; primeiramente, ao se calcular o termo adicional associado aos chamados que estão na fila de espera, tem-se $P_Q' = 0.23684$ e portanto $f_{nj}^{[2]} = \lambda_j(0.052631)$. Usando estes valores, obtém-se para f_{11}

$$f_{11} = \frac{\lambda_1}{\lambda} (\pi_{000} + \pi_{010} + \pi_{001} + \pi_{011}) + \lambda_1(0.052631) = 0.08692$$

Este valor significa que aproximadamente 8.7% de todos os despachos resultaram na UME 1 sendo designada a um chamado do átomo 1. A tabela 4.2 a seguir apresenta o conjunto completo de todos os f_{nj} s.

Tabela 4.2 - Frequências de despacho para o sistema-exemplo

Átomo	UME			Total
	1	2	3	
1	0.07376	0.03760	0.01581	0.1272
	0.08692	0.05076	0.02897	0.1667
2	0.07376	0.03760	0.01581	0.1272
	0.08692	0.05076	0.02897	0.1667
3	0.00944	0.03511	0.00633	0.0509
	0.01470	0.04037	0.01159	0.0667
4	0.07376	0.01482	0.03860	0.1272
	0.08692	0.02798	0.05176	0.1667
5	0.01416	0.05266	0.00949	0.0763
	0.02205	0.06056	0.01738	0.1000
6	0.00944	0.03511	0.00633	0.0509
	0.01470	0.04037	0.01159	0.0667
7	0.00957	0.00593	0.03538	0.0509
	0.01483	0.01119	0.04064	0.0667
8	0.00957	0.00593	0.03538	0.0509
	0.01483	0.01119	0.04064	0.0667
9	0.00957	0.00593	0.03568	0.0509
	0.01483	0.01119	0.04064	0.0667
10	0.00957	0.00593	0.03538	0.0509
	0.01483	0.01119	0.04064	0.0667
Total	0.2926	0.2366	0.2339	0.7632
	0.3715	0.3157	0.3128	1.0000

O primeiro valor é $f_{nj}^{[1]}$; o segundo valor é f_{nj} total.

Utilizando a equação (4.10), a fração dos despachos interáreas de cobertura é 0.43529. Pela equação (4.11), a fração dos despachos da UME 1 que são interáreas de cobertura é $0.11077/0.3715 = 0.2982$, e pela equação (4.12) tem-se que a fração dos chamados da área de cobertura 1 que foram atendidos por outras UMEs é $0.23919/0.500 = 0.4784$.

Os valores acima permitem observar que a frequência de despachos interáreas para uma UME é diferente da frequência de despachos interáreas para uma área de cobertura.

Tempos de deslocamento. O tempo de deslocamento é um indicador central do desempenho do sistema, calculado pelo modelo hipercubo. Todos os tempos de deslocamento são calculados a partir de uma matriz de tempos de deslocamento cujo elemento genérico é τ_{ij} , que vem a ser o tempo médio de deslocamento entre os átomos i e j . Os valores de τ_{ij} podem refletir complicações de deslocamento tais como condições da estrada, vias de mão única, obstáculos, tráfego, etc. Desta forma, o tempo necessário para se deslocar de i até j pode não ser o mesmo requerido para o deslocamento de j

para i , ou seja, é possível ter-se $\tau_{ij} \neq \tau_{ji}$. Ser não for viável a obtenção empírica da matriz de τ_{ij} s, pode-se através da especificação do centróide (\bar{x}_i, \bar{y}_i) de cada átomo obter uma aproximação de τ_{ij} como sendo $(|\bar{x}_i - \bar{x}_j| + |\bar{y}_i - \bar{y}_j|) / v$, onde v é a velocidade média de deslocamento. No sistema-exemplo, para simplificação, v é igual a uma unidade de distância por minuto, sendo que foi utilizada a métrica euclidiana. A matriz de tempo de deslocamento é mostrada na tabela 4.3 abaixo.

Tabela 4.3 - Matriz de tempos de deslocamento entre os átomos

Origem	Destino									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	3	5	2	5	7	5	5	7	7
2	3	0	2	5	2	4	8	6	10	8
3	5	2	0	7	4	2	10	8	12	10
4	2	5	7	0	3	5	3	3	5	5
5	5	2	4	3	0	2	6	4	8	6
6	7	4	2	5	2	0	8	6	10	8
7	5	8	10	3	6	8	0	2	2	4
8	5	6	8	3	4	6	2	0	4	2
9	7	10	12	5	8	10	2	4	0	2
10	7	8	10	5	6	8	4	2	2	0

Para calcular os tempos médios de deslocamento do sistema, é também necessário conhecer a localização de uma UME quando despachada para um chamado. Na estrutura do hipercubo, a representação geográfica da localização de uma UME é suficientemente genérica para descrever as bases fixas de ambulâncias e de veículos de reparo de emergência, e as bases móveis de patrulhas policiais. Esta representação se dá na forma de uma matriz $L = (l_{nj})$, onde l_{nj} é a *probabilidade da UME n estar localizada no átomo j quando estiver livre* (ou, equivalentemente, a fração do tempo livre da UME n que a mesma fica no átomo j). É necessário que a matriz L seja estocástica, isto é, para todo n , $\sum_{j=1}^{N_A} l_{nj} = 1$. Uma UME de base fixa tem $l_{nj} = 1$ para um dado átomo j e $l_{nk} = 0$ para $k \neq j$. De fato, se o objetivo for definir com precisão a base fixa de uma UME, o átomo j com $l_{nj} = 1$ poderia ser um ponto qualquer da cidade, com área zero e taxa de chamados zero, enquanto que uma base móvel teria provavelmente vários $l_{nj} > 0$. Neste caso, é naturalmente possível a existência de intersecção de áreas de patrulhamento; por exemplo, o átomo k poderia pertencer a duas áreas de patrulhamento se $l_{n1k} > 0$ e $l_{n2k} > 0$ para UMEs n_1 e n_2 , com $n_2 \neq n_1$. A área de patrulhamento de uma UME n é composta de todos os átomos para os quais $l_{nj} > 0$, enquanto que sua área de cobertura primária é composta de todos os átomos para os quais a UME n é a primeira do esquema de despacho. É perfeitamente possível, portanto, que as áreas de patrulhamento e de cobertura primária não sejam idênticas.

Para se obter o desempenho em termos de tempo e deslocamento, é primeiramente necessário calcular

$t_{nj} \equiv$ tempo médio requerido à UME n quando disponível, para deslocar-se até o átomo j ; $n = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, N_A$.

Dado que a UME n estará no átomo k com probabilidade I_{nk} , tem-se a relação

$$t_{nj} = \sum_{k=1}^{N_A} I_{nk} \tau_{kj} \quad (4.13)$$

Para incluir os chamados da fila de espera, define-se o “tempo médio de deslocamento para chamados da fila” :

$$\bar{T}_Q \equiv \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_A} \frac{\lambda_i \lambda_j}{\lambda^2} \tau_{ij} \quad (4.14)$$

Para interpretar esta expressão, considere-se um determinado chamado que espera na fila. O chamado é gerado no átomo j com probabilidade λ_j/λ . Cada uma das N UMEs ocupadas é igualmente passível de ser designada para o chamado. A probabilidade de que a UME designada deva partir do átomo i é λ_i/λ , que é a fração de serviços gerada pelo átomo i , sendo que o despacho é efetuado independentemente dos valores assumidos por i e j . Assim, com probabilidade $\lambda_i \lambda_j / \lambda^2$, o tempo de deslocamento entre os átomos i e j será τ_{ij} .

Pode-se agora escrever o tempo médio global de deslocamento:

$$\bar{T} = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}^{[1]} t_{nj} + P_Q' \bar{T}_Q \quad (4.15)$$

Definindo

$\bar{T}_j =$ tempo médio de deslocamento até o átomo j

tem-se, analogamente a (4.15),

$$\bar{T}_j = \frac{\sum_{n=1}^N f_{nj}^{[1]} t_{nj}}{\sum_{n=1}^N f_{nj}^{[1]}} (1 - P'_Q) + \sum_{i=1}^{N_A} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda} \right) \tau_{ij} P'_Q \quad (4.16)$$

Se o interesse residir no tempo médio de deslocamento para uma dada área de cobertura primária, define-se

$\overline{TRA}_n \equiv$ tempo médio de deslocamento até os átomos da área de cobertura primária n

e, assumindo-se que na área n há pelo menos um átomo j com $\lambda_j \neq 0$, por razões análogas às acima tem-se

$$\overline{TRA}_n = \frac{\sum_{\substack{j \in \text{area de } m=1 \\ \text{cobertura } n}} \sum_{m=1}^N f_{mj}^{[1]} t_{mj}}{\sum_{\substack{j \in \text{area de } m=1 \\ \text{cobertura } n}} \sum_{m=1}^N f_{mj}^{[1]}} (1 - P'_Q) + \frac{\sum_{\substack{k \in \text{area de } j=1 \\ \text{cobertura } n}} \sum_{j=1}^{N_A} \frac{\lambda_j \lambda_k \tau_{jk}}{\lambda^2}}{\sum_{\substack{k \in \text{area de } \\ \text{cobertura } n}} \lambda_k / \lambda} (P'_Q) \quad (4.17)$$

Infelizmente, até o momento não há uma expressão exata para o cálculo do tempo médio de deslocamento da UME n para filas de capacidade infinita. O problema em desenvolver tal expressão provém do fato de que a posição da UME quando despachada para o primeiro chamado da fila de espera não é descrita pela probabilidade de localização dos chamados λ_j/λ ; ao invés disso, a UME foi mais provavelmente designada para seu chamado atual quando havia *várias* UMEs disponíveis, e assim sua localização tende a ser próxima à sua base. Em vista disso, apresenta-se uma expressão aproximada:

$$\overline{TU}_n = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}^{[1]} t_{nj} + (T_Q P'_Q / N)}{\sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}^{[1]} + (P'_Q / N)} \quad (4.18)$$

Nesta expressão, a parcela referente aos chamados da fila de espera é uma sobrestimativa que se torna assintoticamente exata na medida em que a taxa de utilização do sistema $\rho = \lambda/N \rightarrow 1$.

Aplicando estas equações ao sistema-exemplo, tem-se que a equação (4.14) fornece como resultado $\bar{T}_Q = 4.34$ minutos. Para calcular as demais grandezas, é necessário especificar a matriz de localizações L , abaixo definida:

$$L = (l_{nj}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A partir de L , então, são calculados os tempos de deslocamento, dispostos nas tabelas (4.4). O tempo médio global de deslocamento obtido foi $\bar{T} = 3.26$ minutos.

Tabela 4.4 - Tempos médios de deslocamento para o sistema-exemplo

Átomo	\bar{T}_j
1	3.37
2	4.29
3	5.26
4	1.75
5	1.77
6	3.64
7	2.64
8	2.31
9	4.55
10	4.19

(a)

Área de cobertura	\overline{TRA}_n	\overline{TU}_n^*
1	3.13	3.14
2	3.30	3.18
3	3.42	3.45

(b)

Obs. 1: Valores em minutos.

*Obs. 2: * - Valores estimados de (4.18)*

4.7. Extensões ao Modelo Hipercubo Básico

O modelo hipercubo, acima apresentado em sua versão básica, permite algumas extensões às hipóteses/restrições consideradas na apresentação.

Primeiramente, os tempos médios de execução das UMEs não se obrigam a ser necessariamente iguais, embora isto acarrete algumas complicações na formulação do modelo; ao invés das taxas das transições descendentes serem idênticas, seriam de valor μ_n , i.e., para a UME n a transição descendente seria igual a sua taxa de execução de serviços.

A capacidade de fila do sistema pode, em geral, assumir qualquer valor entre 0 e infinito. Contudo, a restrição das opções disponíveis de políticas de atendimento às filas permanece como obstáculo à obtenção de disciplinas que contemplem a distribuição geográfica dos elementos da fila.

Podem também ser admitidos esquemas de despacho não fixos, modificando o cálculo das taxas das transições ascendentes. Neste caso, busca-se

modelar esquemas que despacham, por exemplo, a UME disponível mais próxima ao local do chamado. O problema apresentado neste trabalho, no entanto, utiliza um esquema de despacho fixo porém com restrições geográficas, em que a UME não atende toda a região de interesse, e sim uma parte da mesma, fazendo com que o cálculo das taxas das transições ascendentes seja também diferente do apresentado neste capítulo.

5. MÉTODO DE SOLUÇÃO - O MODELO HIPERCUBO LIMITADO

O problema do atendimento de emergência a defeitos nas redes de distribuição de energia elétrica, embora guarde muitas semelhanças com os problemas normalmente estudados com o modelo hipercubo, não pode ser inteiramente estudado pelo modelo em sua forma geral. Isto significa que o modelo hipercubo, da forma como foi apresentado no capítulo anterior, não contempla todas as particularidades do problema aqui analisado.

Para tornar possível a utilização do modelo hipercubo na solução do problema, foi necessário efetuar um conjunto de adaptações no MHG. Estas adaptações decorrem de uma diferença capital entre o problema em estudo e os problemas típicos em que o modelo hipercubo é aplicado: cada átomo da área de atendimento *só pode ser atendido por no máximo dois servidores*, um de preferência primária e outro de preferência secundária, sendo que a UME secundária deve necessariamente pertencer a uma área de cobertura vizinha. Esta característica do problema constitui estratégia definida para as operações da CELESC, e que deve ser mantida futuramente, devendo, portanto, fazer parte do modelo. Em função desta limitação geográfica das UMEs, também encontrada em outros sistemas de atendimento emergencial, o modelo com as adaptações é chamado Modelo Hipercubo Limitado (MHL).

No Modelo Hipercubo Geral (MHG), cada átomo pode ter todos as UMEs do sistema associados a ele, em ordem de preferência. Ou seja, o átomo pode ser atendido por qualquer outra UME, se os precedentes do esquema de despacho estiverem ocupados.

A seguir são descritas as conseqüências matemáticas desta diferença.

5.1. Taxas de Transição dos Estados

Conforme apresentado no item 4.4, no MHG a taxa de transição dos estados com apenas uma UME disponível para o estado em que todas estão ocupadas é λ , ou seja, equivale à taxa global de chamadas na área de atuação, significando que a única UME disponível pode atender ocorrências em qualquer átomo da área de atendimento.

Como isto não acontece no problema ora em estudo, a transição dos estados com apenas uma UME disponível para o estado em que todas as UMEs estão

ocupadas se dá de maneira análoga às transições ascendentes dos demais estados, em que uma UME só entra em ação quando há ocorrência em seus átomos primários ou em seus átomos secundários dos quais a UME primária está ocupada. Assim, a taxa das transições ascendentes é igual à soma dos λ_j dos átomos envolvidos em cada transição. Os valores destas taxas são usualmente menores que as calculadas pelo MHG.

Isto faz com que, no final, as probabilidades de estado sejam diferentes em relação ao MHG, especialmente nos estados intermediários, uma vez que os coeficientes das equações de equilíbrio são bastante alterados por este procedimento.

5.2. Medidas de Desempenho do Sistema

Frequências de Despacho. Neste ponto a alteração se dá para as ocorrências que são despachadas a partir da fila de espera. Sendo f_{nj} a parcela dentre todos os despachos que enviam a UME n ao átomo j , e sendo esta composta de duas parcelas, [1] - despachos fora da fila, e [2] - despachos a partir da fila, a parcela $f_{nj}^{[2]}$ é, analogamente ao MHG, equivalente ao produto de três termos:

- i. probabilidade de um chamado ser proveniente do átomo j ; equivale a (λ_j/λ) .
- ii. probabilidade de uma chamada ficar esperando na fila; obviamente, isto ocorrerá quando as UMEs primária e secundária do átomo onde provém o chamado estiverem ocupadas. Assim,

$$P'_Q = P_Q + \sum_{i \in O_j} \pi_i \quad (5.1)$$

onde

$P_Q \Rightarrow$ probabilidade de fila no MHG;

$\pi_i \Rightarrow$ probabilidade do estado i ($i = 0 \dots 2^N - 1$).

$O_j \Rightarrow$ conjunto de estados em que os dois servidores que atendem o átomo j estão ocupados.

- iii. probabilidade de que a UME n seja o despachado; como para cada átomo j há apenas duas UMEs que o atendem, ambas são igualmente prováveis de serem designadas, o que resulta numa probabilidade de $1/2$.

Desta forma, tem-se

$$f_{nj}^{[2]} = \frac{\lambda_j P'_Q}{\lambda \cdot 2} \quad (5.2)$$

Esta adaptação reveste-se de fundamental importância para o MHL, pois é a partir do conceito do P'_Q específico para cada combinação nj é que tornou-se possível o cálculo de grandezas para as quais o MHG fornece apenas métodos aproximados (caso do tempo médio de deslocamento de cada servidor), além de simplificar o cálculo das frações de despachos interáreas de cobertura.

Da mesma forma que as probabilidades de estado, os valores das frequências de despacho também serão alterados, sendo que de antemão muitos serão nulos devido a que para cada UME n há um grande grupo de átomos j para os quais ela nunca será despachada.

Frações de despachos interáreas de cobertura. Conforme acima, o cálculo destas grandezas ficou bastante simplificado, por considerar intrinsecamente, na parcela dos despachos a partir da fila, a especificidade do P'_Q .

Dado que um despacho é considerado interárea quando um átomo é atendido por sua UME secundária, as frações de despachos interáreas dos átomos, áreas de cobertura e UMEs são resultantes da divisão da soma dos f_{nj} interáreas atinentes pela soma de todos os f_{nj} , interáreas e normais, atinentes (isto é, correspondentes ao átomo, área de cobertura ou UME de interesse). A fração interárea total é a soma de todos os f_{nj} interáreas.

Matematicamente, então, isto quer dizer que as equações (4.10), (4.11) e (4.12) continuam válidas no MHL, embora os cálculos apresentem parcelas nulas nos somatórios.

Tempos de Deslocamento. Também houve grande simplificação no cálculo destas grandezas, pelas mesmas razões citadas. A maior vantagem da adaptação foi obtida no cálculo dos tempos médios das UMEs, que ficou análogo aos demais, enquanto que o MHG possui um cálculo diferente e bastante pesado, que fornece apenas um valor aproximado.

Calculados os t_{nj} (tempo médio de deslocamento da UME n ao átomo j) da forma convencional (Eq. (4.13)), os tempos médios de deslocamento do átomo, área de cobertura, UME e global equivalem às médias dos t_{nj} ponderadas pelos f_{nj} correspondentes.

Para o átomo, tem-se

$$\bar{T}_j = \frac{\sum_{n=1}^N f_{nj} t_{nj}}{\sum_{n=1}^N f_{nj}} \quad (5.3)$$

sendo que existem apenas duas parcelas não nulas nestes somatórios, que correspondem às duas UMEs associadas ao átomo j .

Para uma área de cobertura primária, tem-se

$$\overline{TRA}_n = \frac{\sum_{\substack{j \in \text{area de} \\ \text{cobertura } n}} \sum_{m=1}^N f_{mj} t_{mj}}{\sum_{\substack{j \in \text{area de} \\ \text{cobertura } n}} \sum_{m=1}^N f_{mj}} \quad (5.4)$$

Para uma UME, tem-se

$$\overline{TU}_n = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} f_{nj} t_{nj}}{\sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}} \quad (5.5)$$

e o tempo médio global de deslocamento é descrito por

$$\overline{T} = \sum_n \sum_j f_{nj} t_{nj} \quad (5.6)$$

Tempos de Espera. Diferentemente do MHG, cuja fila geral é do tipo M/M/C simples, para o problema da distribuição de energia elétrica o atendimento a um átomo é descrito por uma fila M/M/2.

Sabendo-se que a capacidade do sistema em atender uma ocorrência é 2μ , onde μ é a taxa média de serviço de uma UME, tem-se que a alocação desta capacidade para um átomo j é

$$\mu_j = \frac{1}{2} \left(\frac{f_{n_1j}}{\sum_j f_{n_1j}} + \frac{f_{n_2j}}{\sum_j f_{n_2j}} \right) \cdot \mu \quad (5.7)$$

Para uma fila M/M/2, tem-se

$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{2\mu_j} \quad (5.8)$$

e, conseqüentemente,

$$\bar{W}_j = 2 \cdot \sum_{i \in D_j} \pi_i \cdot \frac{\rho_j^3}{(1-\rho_j)^2} \cdot \frac{1}{\lambda_j} \quad (5.9)$$

onde \bar{W}_j é o tempo médio de espera do átomo j , e D_j é o conjunto dos estados em que ambas as UMEs associadas ao átomo j estão disponíveis.

A partir dos tempos de espera dos átomos são então calculados os tempos de espera das UMEs, áreas de cobertura e global, que nada mais são do que médias dos \bar{W}_j ponderadas pelos $f_{nj}^{[2]}$ correspondentes, de forma análoga ao cálculo dos tempos de deslocamento.

Portanto, semelhantemente às Equações (5.4), (5.5) e (5.6), tem-se que, para uma área de cobertura primária,

$$\overline{WRA}_n = \frac{\sum_{\substack{j \in \text{area de } m=1 \\ \text{cobertura } n}} \sum_{m=1}^N f_{mj}^{[2]} \bar{W}_j}{\sum_{\substack{j \in \text{area de } m=1 \\ \text{cobertura } n}} \sum_{m=1}^N f_{mj}^{[2]}} \quad (5.10)$$

Para uma UME,

$$\overline{WU}_n = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}^{[2]} \bar{W}_j}{\sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}^{[2]}} \quad (5.11)$$

e, para a região,

$$\bar{W} = \frac{\sum_n \sum_j f_{nj}^{[2]} \bar{W}_j}{\sum_n \sum_j f_{nj}^{[2]}} \quad (5.12)$$

sendo que também neste caso haverá parcelas nulas.

Salienta-se que as adaptações acima tornam possível o uso deste modelo em sistemas com quaisquer esquemas limitados de preferência de despacho, ou seja,

sistemas em que cada átomo está associado a m UMEs, sendo $m \leq N$. Quando $m = N$, especialmente, os tempos de deslocamento são calculados pela forma geral.

6. VALIDADE DO MODELO - APLICAÇÃO

O MHL teve sua validade testada através da sua implementação em um programa computacional, desenvolvido pelo autor na linguagem C++, cuja descrição aqui apresentada contempla os aspectos matemáticos e de estruturação do programa. A parte matemática aborda as técnicas utilizadas para solução e calibração do modelo, enquanto que na estruturação são descritas as principais entidades do sistema, bem como a dinâmica de processamento.

O MHL foi aplicado à região metropolitana da Grande Florianópolis, onde os resultados se mostraram bastante importantes e interessantes.

6.1. Descrição - Aspectos Matemáticos

Basicamente, as questões matemáticas envolvidas na implementação do Modelo Hipercubo Limitado são: a escolha do método de solução do sistema de equações lineares para o cálculo das probabilidades de estado do modelo, e a calibração da taxa de utilização (ρ), Equação (5.8), para o cálculo dos tempos de espera.

Relativamente ao método de solução das equações de equilíbrio, considerou-se o fato de que o modelo monta 2^N equações, ou seja, aumenta exponencialmente com o número de UMEs do sistema, gerando uma matriz $2^N \times 2^N$. Devido a esta matriz apresentar um razoável grau de esparsidade, a implementação do modelo em microcomputador fez com que fossem utilizadas técnicas de esparsidade na montagem e na solução da matriz do sistema, a fim de evitar a limitação dos blocos de memória convencional, e de obter maior precisão nos cálculos.

Matematicamente, a solução se processa da seguinte forma:

1. É montada a matriz **T** de transição de estados, onde o elemento t_{ij} representa a taxa de transição do estado i para o estado j , sendo i e j numerados de 0 a $2^N - 1$, segundo critério ilustrado na tabela 6.1. As transições ascendentes são calculadas conforme descrito no capítulo 5, e as descendentes são iguais a μ . Para esta matriz tem-se, para $i = j$, $t_{ij} = 0$, sendo que quanto maior N , maior a esparsidade da matriz.

Tabela 6.1 - Critério de numeração dos estados - exemplo para 4 UMEs

Número	Estado	Número	Estado
0	0000	8	0110
1	1000	9	0101
2	0100	10	0011
3	0010	11	1110
4	0001	12	1101
5	1100	13	1011
6	1010	14	0111
7	1001	15	1111

2. É montada a matriz $\mathbf{S} = \mathbf{I} - \mathbf{P}$ do sistema de equações lineares que, de acordo com o critério de numeração desenvolvido para os estados do sistema, assume os seguintes valores:

$$s_{ii} = - \sum_{j=0}^{2^N-1} t_{ij} \quad , \quad i = 1, 2^N - 1 \quad (6.1)$$

$$s_{ij} = t_{ji} \quad , \quad \begin{cases} i = 1, 2^N - 1 \\ j = 0, 2^N - 1 \end{cases} \quad , \quad i \neq j \quad (6.2)$$

$$s_{ij} = 1 \quad , \quad j = 0, 2^N - 1 \quad (6.3)$$

3. É montado o estágio inicial do vetor \mathbf{B} de solução do sistema, em que

$$b_0 = 1 - P_Q \quad (6.4)$$

$$b_j = 0 \quad , \quad j = 1, 2^N - 1 \quad (6.5)$$

4. O sistema de equações $\mathbf{S}\mathbf{II} = \mathbf{B}$ é então resolvido, tendo sido adotado como método de solução a decomposição triangular via matriz LU, adaptado às técnicas de esparsidade, apresentado em Morozowski F^o (1981).
5. São calculadas as frequências f_{nj} , os tempos t_{nj} e os tempos de espera e deslocamento para todos os níveis de interesse.

Com relação à calibração do tempo de espera, a mesma tornou-se necessária em função de que, na prática, as UMEs não estão disponíveis para despacho durante todo o tempo: aproximadamente 20% do período de trabalho é ocupado

principalmente por atividades de execução de manobras na rede de distribuição para isolamento de trechos em que são realizadas manutenções programadas, e também outras tais como refeições, etc.

Este percentual pode variar em função da quantidade de serviços de manutenção de cada região, podendo chegar a 25%, como no caso de Florianópolis.

Para adaptar o modelo a esta realidade, foi então efetuada a seguinte alteração na equação (5.8):

$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{2\mu_j(1-U)} \quad (6.6)$$

onde U é a indisponibilidade média das UMEs, na base unitária.

6.2 - Descrição - Aspectos Computacionais

O Modelo Hipercubo Limitado foi implementado na linguagem C++, gerando um programa executável para utilização em microcomputador PC. O programa solicita um arquivo com os dados da região a ser analisada, sendo que os dados requeridos para o estudo são:

- nº de átomos da região;
- nº de UMEs disponíveis;
- tempo de execução ($1/\mu$) em minutos;
- velocidade média de deslocamento, em km/h;
- dados dos átomos:
 - nº do átomo;
 - indicação de que se o átomo é ou não sede da área de cobertura;
 - UME primária;
 - UME secundária;
 - taxa de chamadas do átomo;
- dados da rede viária:
 - átomo inicial;
 - átomo final;
 - distância entre os dois átomos.

Os resultados do processamento, que são enviados para um arquivo de resposta, são:

- Probabilidade de fila P_Q - Eq. (4.1e);
- Probabilidade dos estados do sistema - Eqs. (4.2);
- Freqüências f_{nj} , calculadas conforme modificação descrita no item 5.2;

- Tempo de Espera global médio - Eq. (5.12);
- Tempo de Deslocamento global médio - Eq. (5.6);
- Performance por UME, com as seguintes grandezas:
 - Ocupação - Eqs. (4.4);
 - Fração de despachos interáreas de cobertura - Eq. (4.11);
 - Tempo de Espera - Eq. (5.11);
 - Tempo de Deslocamento - Eq. (5.5);
- Performance por área de cobertura e por átomo, sendo as grandezas análogas às das UMEs.

No contexto da programação orientada a objetos, as principais classes do programa são:

- Vetor: define uma lista de objetos dinâmicos que contêm a descrição e, após o processamento, a probabilidade de cada estado do sistema;
- Zonas: define uma lista de objetos dinâmicos que contêm os dados de entrada e os resultados para os átomos da região analisada;
- Turmas: classe dinâmica que contêm os resultados para as UMEs do sistema;
- Elemento: define várias listas de objetos dinâmicos, cada uma correspondendo a uma matriz de trabalho do problema: a matriz **T** de transição dos estados, a matriz **S** das equações de equilíbrio do sistema, e a matriz LU de solução;
- Despachos: define uma lista de objetos dinâmicos que contêm os resultados para as frequências de despacho f_{nj} do problema;
- Distâncias: define uma lista de objetos dinâmicos que contêm a matriz de distâncias entre os átomos da região analisada. Esta lista contêm tanto os dados de entrada do problema como os resultados da execução do algoritmo de caminhos mínimos de Floyd.
- Solução: classe que contêm os resultados a nível global da região e que executa os passos de solução do problema, realizando conexão com as demais classes.

Como o número de equações do sistema cresce exponencialmente com o número de UMEs, o tempo de processamento também depende diretamente desse valor. Em um microcomputador PC 486 SX 25 Mhz, 4 MB RAM, por exemplo, obteve-se tempos de processamento conforme tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Tempos de Processamento do programa computacional implementado.

<i>Nº de UMEs</i>	<i>Tempo de Proc.</i>
4	2.0330"
5	12.7473"
6	4' 25.85"
7	1h 49' 53.02"

Estes tempos crescentes de processamento parecem sugerir a inviabilidade do uso desta ferramenta, tanto que, por causa deste problema, o autor da mesma desenvolveu o modelo hipercubo aproximado (Larson, 1975), onde ao invés de 2^N tem-se N equações, tornando a solução bem mais rápida.

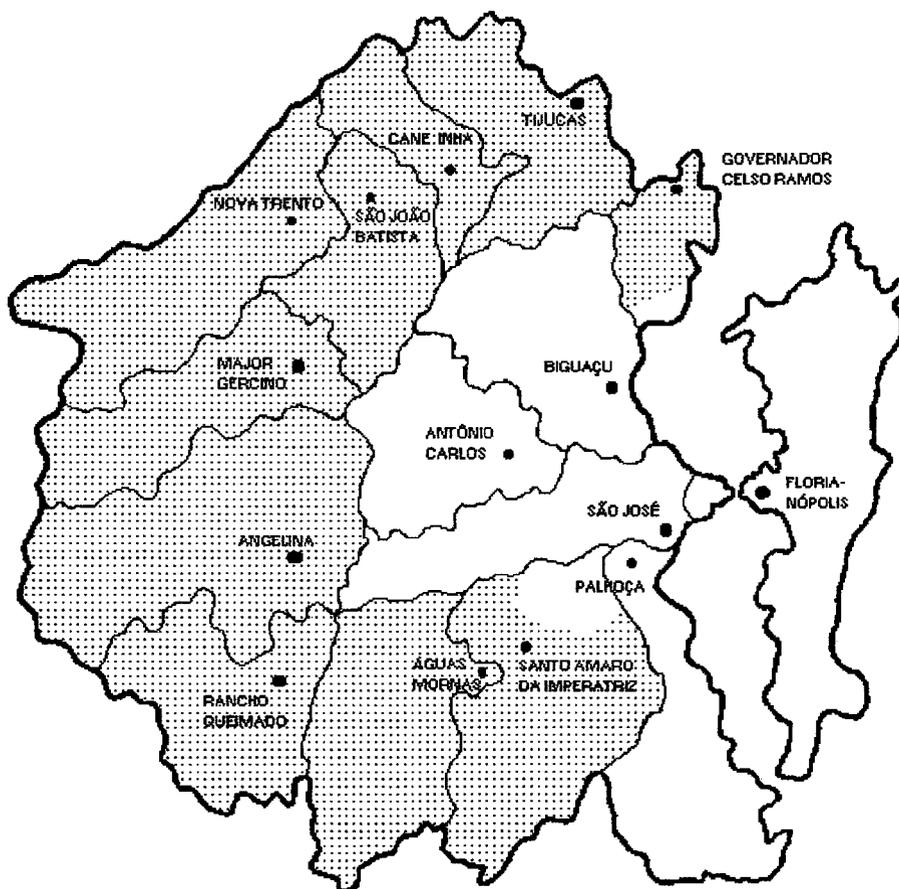
Contudo, a adaptação do Modelo Hipercubo Geral para o Modelo Hipercubo Limitado mostrou-se bastante eficaz, devido principalmente à sua maior aderência ao problema real aqui analisado. Além disso, o MHL tornou possível a divisão de uma região em sub-regiões que podem então ser analisadas separadamente e com menor número de UMEs, ao passo que os modelos geral e aproximado forçam a que a análise seja da região inteira.

6.3. Exemplo de Aplicação - Grande Florianópolis

O Modelo Hipercubo Limitado foi testado em várias configurações hipotéticas na fase de elaboração e ajustes do programa computacional. Como teste prático do modelo, entretanto, adotou-se como região-teste a Grande Florianópolis, cujo serviço de distribuição de energia elétrica é prestado pela Celesc.

A área de concessão da Celesc - Agência Regional de Florianópolis, para fins de atendimento a ocorrências no sistema de distribuição, está subdividida em 40 átomos, sendo 29 deles atendidos diretamente pelo Centro de Operação da Distribuição (COD), e os demais atendidos pelos escritórios locais, uma vez que não são cobertos pelo atual sistema de telecomunicações do COD (Na figura 6.1, a região em branco corresponde à área de atendimento do COD).

O átomo 29, especificamente, é quase que inteiramente coberto por uma área de preservação permanente da Mata Atlântica, portanto com baixíssima taxa de chamadas. Em função disso, este átomo não foi incluído na base de dados de estudo da região, sendo o estudo então realizado sobre 28 átomos da Agência Regional de Florianópolis.



*Figura 6.1 - Área de concessão da Agência Regional de Florianópolis - CELESC.
A parte em branco corresponde à região analisada neste trabalho.*

O grafo correspondente à região analisada é apresentado na Figura 6.2 e Tabela 6.3, onde os átomos de 1 a 10 estão situados na Ilha de Santa Catarina (município de Florianópolis) e os demais na parte continental. Os átomos de maior demanda são os de número 01, que corresponde ao Centro de Florianópolis, 10, correspondente às praias do Norte da Ilha, e 16, correspondente a Barreiros e Jardim Atlântico (município de São José). Também apresentam alta taxa de chamadas os átomos 06 (Sul da Ilha) e 12 (Estreito). Os dados de demanda compreendem o período de janeiro a julho de 1994, com o comportamento estatístico das chegadas e dos atendimentos apresentando boa aderência à distribuição exponencial, conforme ilustrado nos gráficos do Anexo 5.

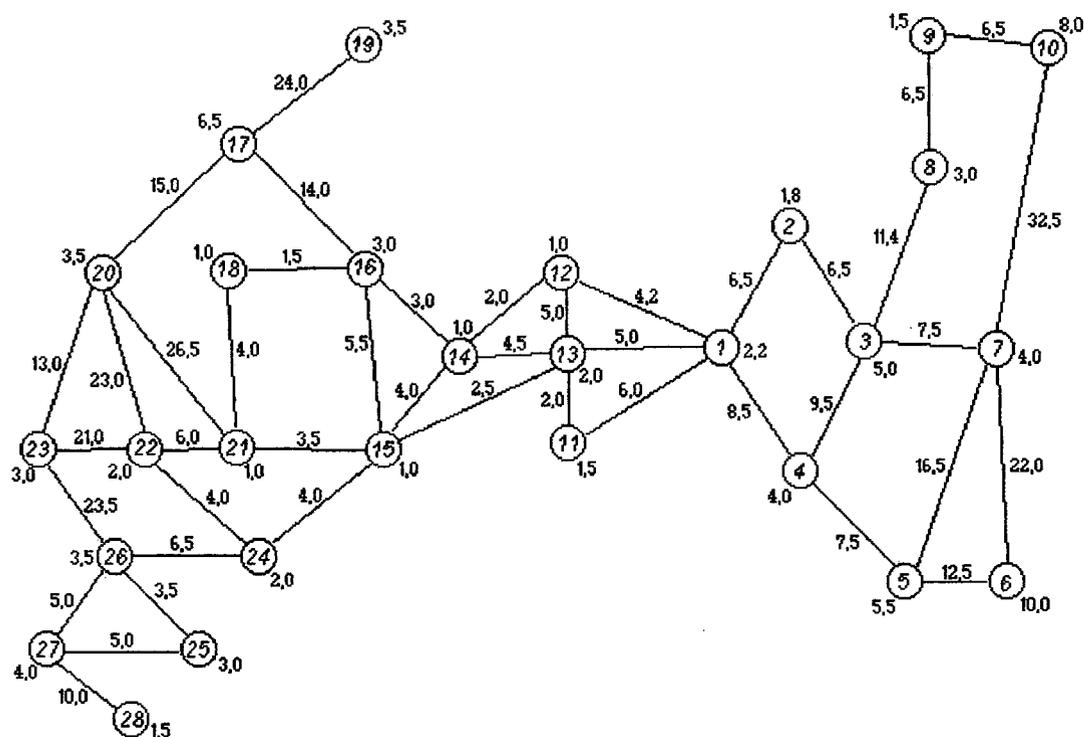


Figura 6.2 - Grafo¹ da região analisada..

Para o horário das 6 às 22 horas dos dias úteis, a configuração original de atendimento proposta pelo COD, inicialmente analisada, dispõe de 6 UMEs distribuídas conforme apresentado também na Tabela 6.3. Esta configuração, aqui denominada Caso A, prevê que as três UMEs sediadas na parte insular nunca são despachadas para atendimentos na parte continental, assim como as três UMEs da parte continental não são despachadas para a Ilha.

¹ - Os números dentro dos vértices correspondem aos átomos.

- Os números nas arestas correspondem às distâncias médias entre os átomos, em km.

- Os números junto aos vértices correspondem às distâncias internas médias dos átomos, em km.

Tabela 6.3 - Taxa de Chamadas dos Átomos e Configuração Inicial do Atendimento - Caso A
(átomos com [*] são sedes das áreas de cobertura primária)

Átomo	UME 1	UME 2	λ
1*	1	2	0.357
2	1	3	0.082
3	1	2	0.146
4	1	2	0.074
5	2	3	0.072
6	2	3	0.218
7*	2	3	0.125
8	3	2	0.081
9	3	2	0.027
10*	3	2	0.300
11	4	6	0.121
12	4	5	0.210
13*	4	6	0.155
14	4	5	0.063

Átomo	UME 1	UME 2	λ
15	4	6	0.089
16*	5	4	0.300
17	5	6	0.174
18	5	6	0.053
19	5	6	0.028
20	5	6	0.038
21	5	4	0.079
22*	6	5	0.131
23	6	5	0.049
24	6	5	0.091
25	6	5	0.110
26	6	5	0.117
27	6	5	0.064
28	6	5	0.010

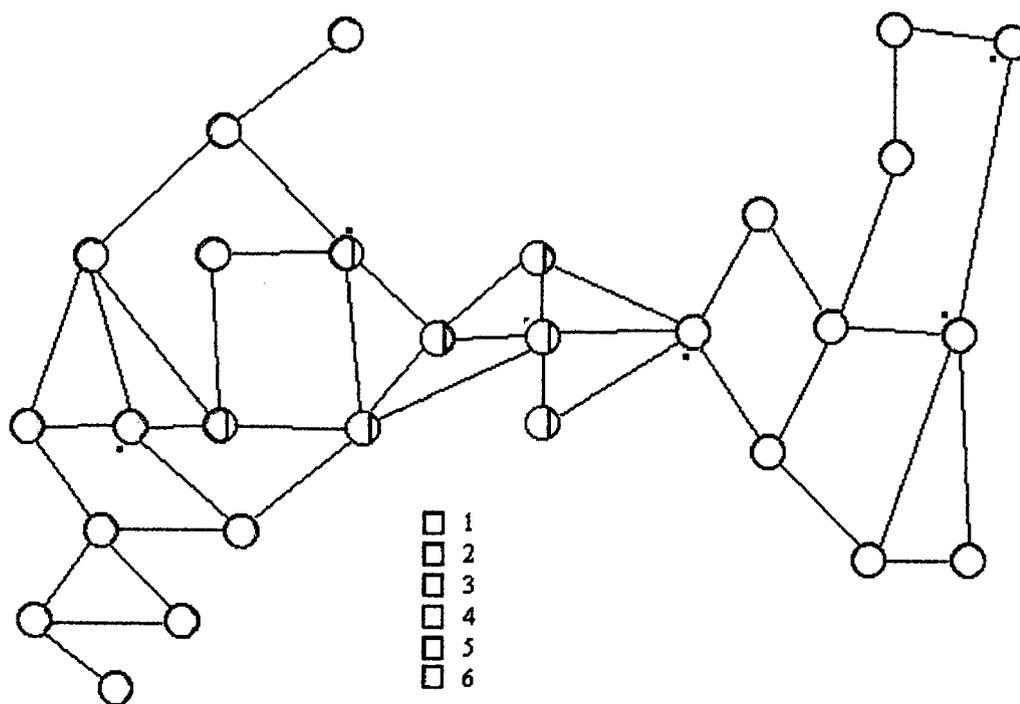


Figura 6.3 - Grafo correspondente ao Caso A.

Para cada nó, a cor predominante indica a UME primária do átomo, e a segunda cor a UME secundária. Átomos de mesma cor predominante formam uma área de cobertura primária, sendo que o ponto ao lado de um dos nós significa que o átomo é sede da área de cobertura.

Tabela 6.4 - Configuração de Atendimento - Caso B
 (átomos com [*] são sedes das áreas de cobertura primária)

Átomo	UME 1	UME 2
1*	1	3
2	1	3
3	1	3
4	1	3
5	2	3
6	2	3
7*	2	1
8	2	3
9	2	1
10	2	1
11	3	5
12	3	4
13*	3	5
14	4	3

Átomo	UME 1	UME 2
15	5	3
16*	4	5
17	4	5
18	4	5
19	4	5
20	5	3
21*	5	3
22	6	5
23	6	5
24	6	5
25	6	5
26*	6	5
27	6	5
28	6	5

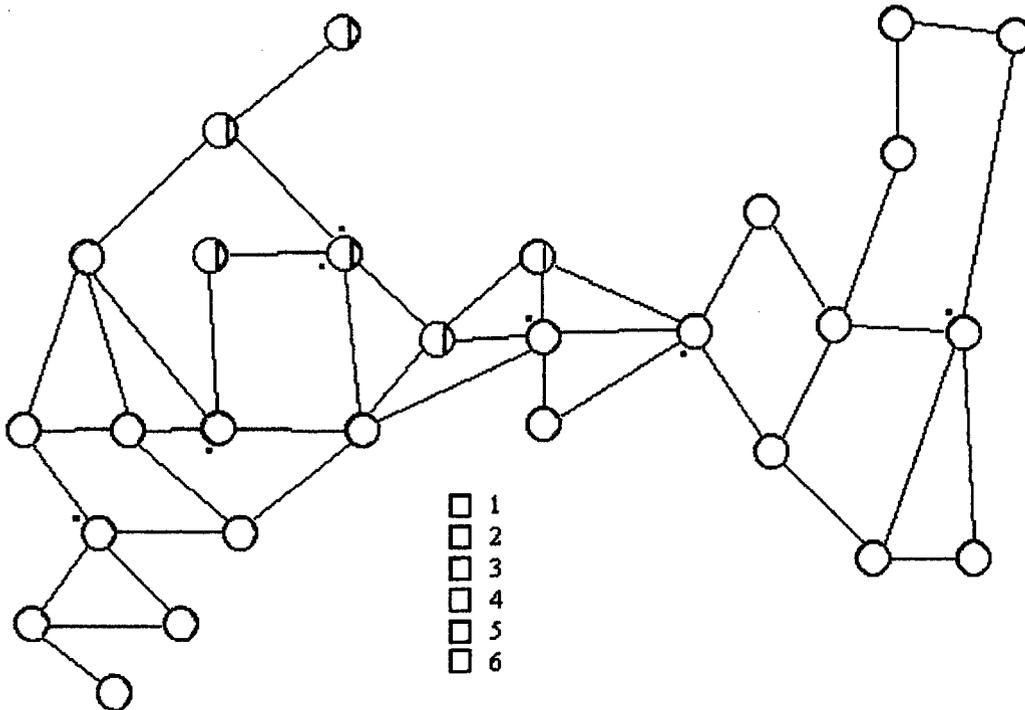


Figura 6.4 - Grafo correspondente ao Caso B

Tabela 6.5 - Configuração de Atendimento - Caso C
 (átomos com [*] são sedes das áreas de cobertura primária)

Átomo	UME 1	UME 2
1*	1	2
2	1	3
3	1	2
4	1	2
5	2	3
6	2	3
7*	2	3
8	3	2
9	3	2
10*	3	2
11	4	1
12	4	1
13*	4	1
14	4	1

Átomo	UME 1	UME 2
15	4	6
16*	5	4
17	5	6
18	5	6
19	5	6
20	5	6
21	5	4
22*	6	5
23	6	5
24	6	5
25	6	5
26	6	5
27	6	5
28	6	5

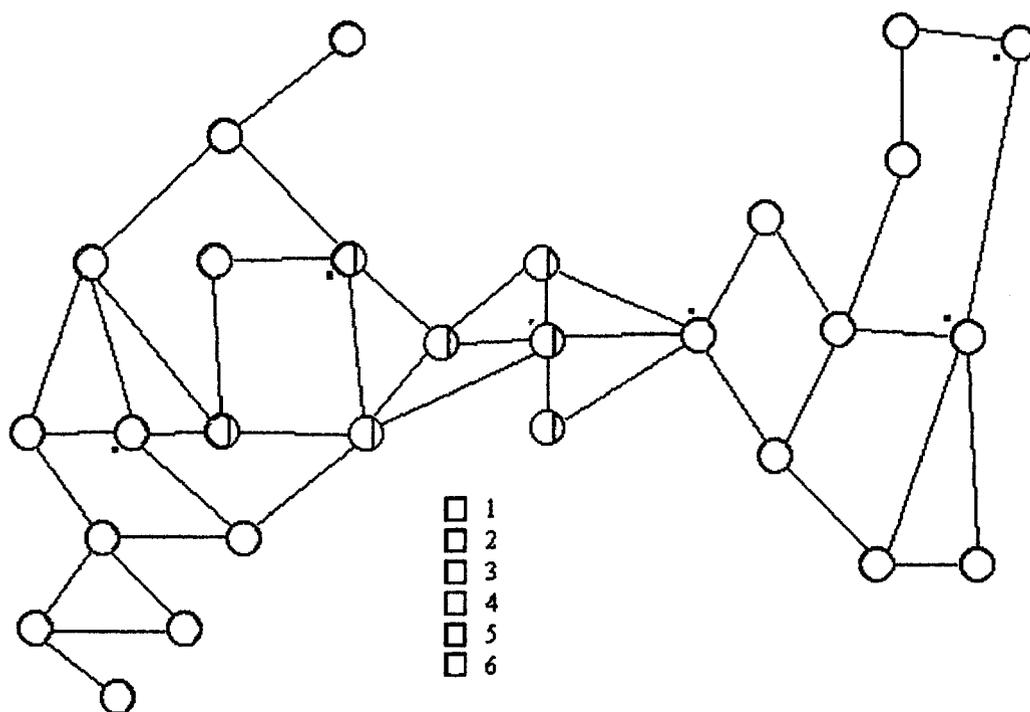


Figura 6.5 - Grafo correspondente ao Caso C

Tabela 6.6 - Configuração de Atendimento - Caso D
(átomos com [*] são sedes das áreas de cobertura primária)

Átomo	UME 1	UME 2
1*	1	2
2	1	3
3	1	2
4	1	2
5	2	3
6	2	3
7*	2	3
8	3	2
9	3	2
10*	3	2
11	4	6
12	4	5
13*	4	6
14	4	5

Átomo	UME 1	UME 2
15	4	6
16*	5	6
17	5	4
18	5	6
19	5	6
20	6	7
21	6	4
22*	6	7
23	6	7
24	7	6
25	7	6
26*	7	6
27	7	6
28	7	6

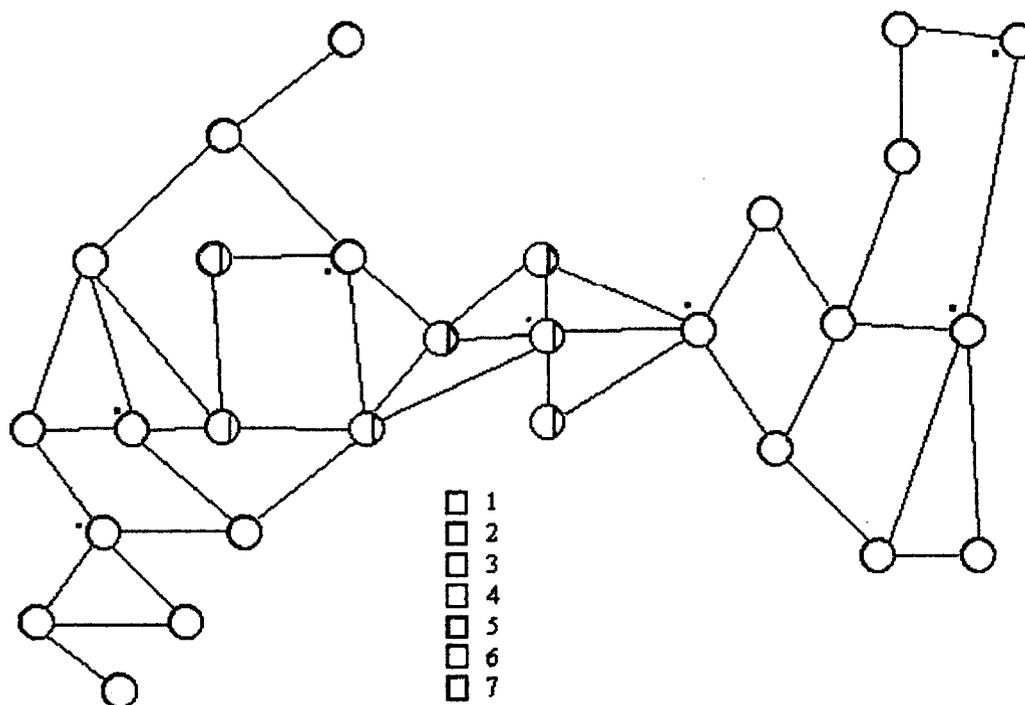


Figura 6.6 - Grafo correspondente ao Caso D

Tabelas 6.7 - Resultados para o Caso A

UME	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.2816	0.0000	15.9289	12.0702
2	0.2773	0.4007	16.3423	39.4873
3	0.2406	0.2604	18.5008	37.6654
4	0.3105	0.1837	40.3949	8.3252
5	0.3487	0.3007	68.6725	20.9750
6	0.3132	0.2886	76.2718	24.8510
Média	0.2953			

(a)

Área	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.1959	0.2341	15.9289	19.9167
2	0.1234	0.2307	21.2818	47.2556
3	0.1213	0.1940	14.0086	27.2946
4	0.1897	0.2506	39.7530	9.2993
5	0.1998	0.2825	74.0784	21.9370
6	0.1700	0.2453	75.8141	24.0271

(b)

Átomo	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.1061	0.2327	7.8278	15.0462
2	0.0244	0.2443	28.8479	27.2981
3	0.0434	0.2327	19.1407	25.9338
4	0.0220	0.2327	37.7640	23.3630
5	0.0214	0.2307	40.8886	49.6034
6	0.0648	0.2307	13.5045	61.0305
7	0.0372	0.2307	23.5518	21.8798
8	0.0241	0.1940	23.5206	31.8742
9	0.0080	0.1940	70.5618	23.6445
10	0.0892	0.1940	6.3506	26.3866
11	0.0360	0.2544	40.2690	9.6638
12	0.0624	0.2456	25.6174	10.3448
13	0.0461	0.2544	31.4358	8.6113
14	0.0187	0.2456	85.3914	8.5480
15	0.0265	0.2544	54.7477	8.0669
16	0.0892	0.2839	26.1460	8.8498
17	0.0517	0.2808	48.1738	35.6459
18	0.0158	0.2808	158.1556	8.0412
19	0.0083	0.2808	299.3659	85.3011
20	0.0113	0.2808	220.5854	56.5146
21	0.0235	0.2839	92.2887	11.6730
22	0.0389	0.2453	47.2908	8.9585
23	0.0146	0.2453	126.4304	49.2837
24	0.0271	0.2453	68.0779	11.0667
25	0.0327	0.2453	56.3190	31.7564
26	0.0348	0.2453	52.9495	24.5150
27	0.0190	0.2453	96.7983	34.8598
28	0.0030	0.2453	619.5090	55.5495

(c)

	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
Região	1.0000	0.24353	46.7420	23.2730

(d)

Tabelas 6.8 - Resultados para o Caso B

UME	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.3211	0.1980	36.5748	24.2159
2	0.3280	0.0000	40.3777	48.1452
3	0.3361	0.4820	40.8920	23.6840
4	0.2894	0.1121	27.3835	15.0286
5	0.2529	0.6704	29.8699	20.2908
6	0.2542	0.0000	23.5187	15.8536
Média	0.2970			

(a)

Área	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.1959	0.2564	37.5789	16.2148
2	0.2446	0.2669	40.3777	55.5992
3	0.1445	0.2835	37.5469	8.4518
4	0.1837	0.2417	26.4506	17.3217
5	0.0612	0.2015	44.1610	15.1167
6	0.1700	0.2123	23.5187	18.5244

(b)

Átomo	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.1061	0.2564	17.3421	8.1589
2	0.0244	0.2564	75.5015	18.2225
3	0.0434	0.2564	42.4049	31.6707
4	0.0220	0.2564	83.6638	22.3604
5	0.0214	0.2660	80.2901	41.2923
6	0.0648	0.2660	26.5178	56.5240
7	0.0372	0.2677	42.1937	19.3519
8	0.0241	0.2660	71.3689	58.6054
9	0.0080	0.2677	195.3414	67.1076
10	0.0892	0.2677	17.5807	71.6164
11	0.0360	0.2848	49.9303	7.6732
12	0.0624	0.2819	29.7986	10.3448
13	0.0461	0.2848	38.9779	6.4948
14	0.0187	0.2351	57.6980	6.9367
15	0.0265	0.2015	34.0718	6.8244
16	0.0892	0.2424	10.3390	7.4608
17	0.0517	0.2424	17.8258	31.7241
18	0.0158	0.2424	58.5225	4.3574
19	0.0083	0.2424	110.7747	81.3793
20	0.0113	0.2015	79.7998	57.3294
21	0.0235	0.2015	38.3847	4.1538
22	0.0389	0.2123	14.6704	19.7473
23	0.0146	0.2123	39.2208	50.1583
24	0.0271	0.2123	21.1189	13.8876
25	0.0327	0.2123	17.4711	13.3916
26	0.0348	0.2123	16.4258	11.8541
27	0.0190	0.2123	30.0284	16.4951
28	0.0030	0.2123	192.1817	37.1847

(c)

	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
Região	1.0000	0.24933	35.0811	25.2575

(d)

Tabelas 6.9 - Resultados para o Caso C

UME	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.3257	0.2222	31.9416	13.5492
2	0.2850	0.4259	23.0578	39.6338
3	0.2429	0.2702	21.6568	38.2656
4	0.3092	0.1757	33.5329	8.2505
5	0.3259	0.2100	48.5314	21.9691
6	0.2889	0.1864	55.7422	24.7242
Média	0.2963			

(a)

Área	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.1959	0.2708	29.6967	21.1466
2	0.1234	0.2372	23.6404	47.6747
3	0.1213	0.1950	14.7722	27.3417
4	0.1897	0.2516	35.8987	9.7511
5	0.1998	0.2673	49.2705	21.7540
6	0.1700	0.2287	47.6586	23.7904

(b)

Átomo	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.1061	0.2691	14.8991	16.6896
2	0.0244	0.2828	48.6391	29.4796
3	0.0434	0.2691	36.4313	25.7830
4	0.0220	0.2691	71.8780	24.2676
5	0.0214	0.2372	45.4202	50.0375
6	0.0648	0.2372	15.0012	61.4659
7	0.0372	0.2372	26.1620	22.2616
8	0.0241	0.1950	24.8028	31.9006
9	0.0080	0.1950	74.4083	23.6985
10	0.0892	0.1950	6.6967	26.4387
11	0.0360	0.2500	39.0694	8.2766
12	0.0624	0.2500	22.5114	12.0003
13	0.0461	0.2500	30.4993	7.7593
14	0.0187	0.2500	75.0380	12.2591
15	0.0265	0.2610	46.9102	8.1422
16	0.0892	0.2686	18.6536	8.7073
17	0.0517	0.2658	30.9929	35.2892
18	0.0158	0.2658	101.7503	7.7775
19	0.0083	0.2658	192.5987	84.9444
20	0.0113	0.2658	141.9149	56.7007
21	0.0235	0.2686	70.8365	11.6571
22	0.0389	0.2287	29.7450	8.6340
23	0.0146	0.2287	79.5224	48.8909
24	0.0271	0.2287	42.8198	10.8788
25	0.0327	0.2287	35.4236	31.5685
26	0.0348	0.2287	33.3043	24.3271
27	0.0190	0.2287	60.8843	34.6719
28	0.0030	0.2287	389.6599	55.3616

(c)

	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
Região	1.0000	0.245982	36.1741	23.5803

(d)

Tabelas 6.10 - Resultados para o Caso D

UME	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.2786	0.0000	16.0371	12.0702
2	0.2743	0.3990	16.4013	39.4535
3	0.2374	0.2592	18.5335	37.5732
4	0.2991	0.1463	21.0871	8.0292
5	0.2697	0.1372	19.9496	15.6231
6	0.2389	0.4815	22.7692	24.0788
7	0.2049	0.1213	16.2941	12.9827
Média	0.2576	(a)		

Área	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.1959	0.2330	16.0371	19.8795
2	0.1234	0.2296	21.2996	47.1821
3	0.1213	0.1927	14.0386	27.2355
4	0.1897	0.2533	26.5318	9.3102
5	0.1650	0.2261	16.6332	20.2122
6	0.0883	0.2029	23.8816	20.7260
7	0.1165	0.1717	12.6527	12.0827

(b)

Átomo	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
1	0.1061	0.2315	7.8875	14.9954
2	0.0244	0.2432	29.1159	27.2369
3	0.0434	0.2315	19.2865	25.9384
4	0.0220	0.2315	38.0517	23.3350
5	0.0214	0.2296	40.9229	49.5273
6	0.0648	0.2296	13.5158	60.9541
7	0.0372	0.2296	23.5716	21.8128
8	0.0241	0.1927	23.5710	31.8411
9	0.0080	0.1927	70.7128	23.5767
10	0.0892	0.1927	6.3642	26.3213
11	0.0360	0.2556	27.1608	9.6905
12	0.0624	0.2502	16.8742	10.3448
13	0.0461	0.2556	21.2030	8.6328
14	0.0187	0.2502	56.2474	8.5338
15	0.0265	0.2556	36.9265	8.0809
16	0.0892	0.2208	9.0689	8.2625
17	0.0517	0.2323	13.8163	34.4935
18	0.0158	0.2323	45.3591	7.1893
19	0.0083	0.2323	85.8582	84.1486
20	0.0113	0.2056	43.6800	52.0535
21	0.0235	0.1954	26.0729	12.4138
22	0.0389	0.2056	12.6705	7.7543
23	0.0146	0.2056	33.8743	44.5119
24	0.0271	0.1717	10.9008	12.5602
25	0.0327	0.1717	9.0179	10.9713
26	0.0348	0.1717	8.4784	9.7280
27	0.0190	0.1717	15.4995	14.0747
28	0.0030	0.1717	99.1971	34.7644

(c)

Região	Ocupação	Desp. I.D.	T. Espera	T. Desloc.
	1.0000	0.22060	18.9700	21.3564

(d)

Para este Caso A, obteve-se os resultados de desempenho apresentados nas tabelas 6.7. Os valores obtidos a nível de região refletem com boa aproximação os níveis reais de desempenho, porém os valores para as UMEs e áreas de cobertura revelam uma não uniformidade no atendimento em toda a região, com áreas/UMEs com muito boa performance, e outras nem tanto. Especificamente, as áreas de cobertura 5 e 6, e suas respectivas UMEs, apresentam performance muito acima do desejado para os tempos de espera, e a área 2 apresenta elevado tempo de deslocamento. Quanto à ocupação das UMEs, observa-se que as três unidades insulares apresentam valores inferiores à média, enquanto que as UMEs do continente têm ocupação superior à média, sugerindo um desequilíbrio na demanda da Ilha em relação ao continente, o que é verificado pelas ocupações das áreas correspondentes.

Em função deste desequilíbrio, foi testada uma nova configuração, em que a Ilha foi dividida em duas áreas de cobertura e a parte continental em quatro áreas, conforme a Tabela 6.4. Neste Caso B é admitida a possibilidade de uma UME continental atuar como backup de átomos da Ilha.

As tabelas 6.8 apresentam os resultados deste teste, em que, embora o tempo de espera da região tenha sido reduzido em 25% - bastante significativo -, o desempenho piora muito nas áreas 1 e 2, na Ilha, onde a expectativa é de um desempenho melhor que a média. Novamente ocorreu desequilíbrio nas ocupações das UMEs, sendo que neste caso as mais beneficiadas foram as UMEs 5 e 6, que obtiveram grande redução em seus tempos de espera, com o mesmo acontecendo com suas respectivas áreas de cobertura.

Como esta alternativa não se mostrou de todo eficaz, partiu-se para uma nova configuração, aqui chamada Caso C, e apresentada na Tabela 6.5.

Nesta configuração, volta-se a ter três UMEs na Ilha e três no continente, sendo que desta vez é permitido à UME 1, da Ilha, atender como backup a chamados na área de cobertura 4, no continente. Os resultados, às tabelas 6.9, demonstram ser esta uma solução melhor que a do Caso B, ainda que os resultados não sejam totalmente satisfatórios.

O que se observa é um maior equilíbrio, em relação ao Caso A, nas performances por UME e por área de cobertura, notadamente no tempo de espera. Isto fez com que, embora não havendo grandes variações nas demais grandezas, fosse obtida uma redução de 22,6% no tempo de espera da região, e de 37,1% no tempo de espera da pior área de cobertura, bastando para isso efetuar pequenas alterações na política de despacho.

Para fins de verificação da performance da metodologia, e da sensibilidade da região analisada, foi ainda testada uma configuração com sete UMEs, três na Ilha e quatro no continente, dispostas conforme a Tabela 6.6. Chamada Caso D, esta

configuração apresentou performance muito melhor que as anteriores, com uma redução de 59% no tempo de espera e de 8,2% no tempo de deslocamento da região, em relação ao Caso A, conforme as Tabelas 6.10. Apesar de não haver alterações na performance da Ilha, a introdução de uma UME na parte continental, e a conseqüente reorganização das suas áreas de cobertura, proporcionou significativos benefícios aos átomos envolvidos. A decisão, então, de se efetivar a introdução da nova UME, depende da quantificação monetária dos benefícios obtidos, em relação aos custos envolvidos nesta operação.

Os Casos C e D, embora apresentem o melhor desempenho obtido nos testes para seis e sete UMEs, respectivamente, não permitem afirmar que as mesmas são soluções ótimas. A própria análise das configurações indica possibilidades de melhoria do desempenho, tanto a nível da região inteira como para as áreas de cobertura.

Muitas outras observações poderiam ainda ser apresentadas para exaurir a descrição analítica dos resultados obtidos nos testes, principalmente das performances para os átomos. Contudo, considera-se que isto fugiria ao escopo desta parte do trabalho, que é ilustrar o poder da ferramenta em retratar a performance do sistema, e a grande sensibilidade de análise adquirida pelo planejador, ampliando em muito os critérios e os horizontes de interpretação dos resultados.

Por outro lado, a aplicação prática do modelo revelou a necessidade de desenvolvimento de um modelo de localização que, em conjunto com o modelo hipercubo limitado, permita estabelecer, dada a quantidade de UMEs disponíveis, a configuração que proporciona o melhor desempenho global do sistema. Neste sentido, o trabalho desenvolvido por Gonçalves, Novaes e Albino (1994) constitui uma interessante linha de pesquisa.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. Conclusões

Neste trabalho objetivou-se encontrar e aplicar uma ferramenta que propiciasse maior consistência ao planejamento e análise de sistemas de atendimento de emergência a interrupções em redes urbanas de distribuição de energia elétrica.

Embora exista um trabalho neste sentido (CODI/ELETROBRÁS, 1984), utilizando filas do tipo M/M/C, a metodologia proposta acabou se revelando ineficaz porque não considera o fato da fila estar espacialmente distribuída e de haver limitação geográfica dos veículos. Em vista disso, essa metodologia não tem sido utilizada pelas concessionárias brasileiras.

Neste contexto, as pesquisas iniciais resultaram em duas alternativas de abordagem: via modelo de simulação ou via modelo hipercubo.

A abordagem por simulação tornaria possível verificar o efeito dos mais diversos tipos de situações, além de incluir todas as especificidades inerentes ao problema. Por outro lado, aliada à elaboração da heurística da simulação, existe a dificuldade de se obter situações de teste que reflitam efetivamente a dinâmica real do serviço de atendimento; para isso, seria necessário elaborar um sistema gerador aleatório de chamados, que respeitasse os parâmetros estatísticos reais de frequência e duração dos chamados, em regime permanente.

O modelo hipercubo difere da simulação por ser uma ferramenta analítica derivada da Teoria de Filas, portanto de cunho mais genérico, embora especialmente desenvolvida para problemas semelhantes ao estudado neste trabalho. Apresenta a vantagem de analisar situações de regime permanente, com facilidade de entrada dos parâmetros; contudo, as hipóteses de utilização do modelo fazem com que sejam efetuadas aproximações por vezes consideráveis. Paralelamente, existe a dificuldade de implementação da ferramenta, em que a montagem das equações de equilíbrio deve ser correspondente a cada configuração analisada - exigindo uma heurística específica para esta tarefa -, além do grande esforço computacional exigido para a solução das mesmas.

Em sendo viáveis ambas as alternativas, optou-se pelo modelo hipercubo devido à sua abordagem estocástica do problema, mais condizente com a formação e a preferência do autor, e pela oportunidade de orientação mais dirigida. Também

contribuiu para a opção pelo modelo hipercubo a possibilidade de introdução de novas variáveis para a análise do desempenho dos sistemas de atendimento.

Os estudos para aplicação do modelo hipercubo ao problema do atendimento a interrupções em redes de energia elétrica logo revelaram que o modelo, em sua forma original, não considera casos em que há limitação geográfica das unidades móveis de emergência (UMEs), ou seja, não existe a possibilidade de um veículo atender todos os átomos de uma região, mesmo como backup de outros veículos. Por isso, surgiu a necessidade de se adaptar o modelo hipercubo a este tipo de situação.

Os resultados e conclusões destas adaptações de certa forma transcendem o escopo original de realização deste trabalho, voltado para a solução de um problema específico de distribuição de energia elétrica em regiões urbanas.

A adaptação do Modelo Hipercubo Geral (MHG) para o Modelo Hipercubo Limitado (MHL), apresentada neste trabalho, permitiu ampliar sobremaneira o seu universo de aplicação, uma vez que tornou possível o estudo também de sistemas de atendimento a emergências urbanas com limitação geográfica das UMEs.

Em outras palavras, a adaptação efetuada no modelo hipercubo assume um caráter eminentemente genérico, podendo ser utilizado para qualquer sistema de emergência urbana com limitação geográfica das UMEs, proporcionando uma série de vantagens na análise destes sistemas, entre as quais destacam-se:

- conhecimento da influência de cada UME ou área de cobertura na formação da fila de espera;
- cálculo preciso do tempo de deslocamento das UMEs;
- comprovação analítica de um fato que até então podia somente ser intuído pelo planejador ou observado estatisticamente: para um mesmo número de UMEs, o tempo de espera do sistema *varia* com a distribuição geográfica das mesmas e seus esquemas de preferência de despacho.

Portanto, o MHL, apesar do nome sugerir o contrário, é ainda mais abrangente que o MHG, já que é aplicável tanto a sistemas com limitação geográfica como a sistemas sem limitação¹, enquanto que o MHG só abrange sistemas sem limitação.

A adoção do MHL no estudo do atendimento a ocorrências em redes urbanas de distribuição de energia elétrica constitui significativo aprimoramento tecnológico no controle da qualidade do fornecimento, vindo preencher uma importante lacuna da atividade de gerenciamento dos Centros de Operação da Distribuição (CODs). Isto porque passa-se a dotar os mesmos de uma ferramenta eficaz de verificação do

¹ Exceto para o cálculo dos tempos de deslocamento por UME, em que continua válida a equação original (4.18).

desempenho do atendimento de emergência, que permite maior sensibilidade e precisão no planejamento e na análise dos sistemas, devido à introdução de novos critérios/parâmetros de controle, especialmente a carga de trabalho e a fração de despachos interáreas de cobertura das UMEs.

Assim sendo, consideram-se promissoras as perspectivas de utilização do MHL nas concessionárias brasileiras, sendo para isso necessário iniciar um trabalho de divulgação. Especificamente na Celesc pretende-se, já em 1995, utilizar o MHL para avaliar toda a área de concessão da Celesc, especialmente as regiões de maior concentração demográfica, e tornar o MHL ferramenta corrente no planejamento da melhoria da qualidade do Atendimento aos Consumidores.

O desenvolvimento do MHL, a partir do MHG, e sua aplicação, constitui uma das contribuições específicas deste trabalho de pesquisa ao aperfeiçoamento das metodologias de solução de problemas de cunho emergencial.

7.2. Recomendações

Tanto a forma geral quanto a limitada, ou ainda a forma aproximada do modelo hipercubo, como ferramentas de análise de serviços urbanos emergenciais, encontram grandes perspectivas de utilização no Brasil, onde tais sistemas não têm recebido um enfoque técnico adequado à sua complexidade. Assim, espera-se que este trabalho tenha contribuído para estabelecer a discussão e a utilização destas ferramentas no Brasil, proporcionando oportunidades para um encaminhamento efetivo dos grandes e reais problemas de atendimento emergencial nas cidades e estradas brasileiras.

A aplicação do modelo hipercubo, por outro lado, revelou a necessidade de se desenvolver um modelo que otimize a localização das UMEs e a montagem dos esquemas de preferência de despacho dos átomos da região analisada. Dado que o hipercubo é um modelo apenas de verificação, este outro modelo poderia atuar de forma complementar ao hipercubo, numa sistemática em que cada modelo seria executado alternadamente, com um modelo tendo como dados de entrada os resultados do outro, até que fossem encontrados valores ótimos para as variáveis de interesse, satisfeitos os critérios de otimização. Considera-se este um passo fundamental para a consolidação do modelo hipercubo no âmbito da análise e do planejamento dos sistemas emergenciais urbanos no Brasil.

Quanto às formas geral e limitada do modelo, principalmente a limitada, acredita-se que a sua performance computacional é passível de melhorias sensíveis, na medida em que forem utilizados métodos mais rápidos para a solução das equações de equilíbrio do modelo. Sendo este o principal "gargalo" atual do hipercubo, considera-se

necessário um esforço de pesquisa neste sentido, em que sejam testados métodos consagrados na literatura.

Finalmente, no que se refere ao problema abordado neste estudo, seria interessante uma eventual comparação dos resultados obtidos via MHL com resultados de um modelo de simulação, a fim de verificar a aderência de ambos aos valores reais obtidos pelo COD de Florianópolis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELTRAMI, Edward J. *Models for public systems analysis*. New York : Academic Press, 1977. 218 p.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. *Continuidade e qualidade dos serviços de energia elétrica no Brasil*. 1983. 49 p.
- CHRISTOFIDES, Nicos. *Graph theory: an algorithmic approach*. New York : Academic Press, 1975. 400 p.
- CODI (Comitê de Distribuição - Eletrobrás). *Métodos para determinação do número de turmas de manutenção de redes aéreas de distribuição: documento técnico nº 2.2.02.15.0*. 1984. 26 p.
- GONÇALVES, Miriam B., NOVAES, Antonio G., ALBINO, Jean C. C. *Modelo para localização de serviços emergenciais em rodovias*. XXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Florianópolis. 1994.
- KOLESAR, Peter, WALKER, Warren E. An algorithm for the dynamic relocation of fire companies. *Operations Research*. v. 22, n. 2, p. 249-274, 1974.
- LARSON, Richard C. Approximating the performance of urban emergency service systems. *Operations Research*. v. 23, n. 5, p. 845-868, set./out. 1975.
- , ODONI, Amedeo R. *Urban operations research*. New Jersey : Prentice-Hall, 1981. 573 p.
- , *Urban police patrol analysis*. Cambridge : The MIT Press, 1972. 289 p.

MIRCHANDANI, Pitu B., REILLY, John M. Spatial distribution design for fire fighting units. In: GHOSH, Avijit, RUSHTON, Gerard. *Spatial analysis and location-allocation models*. New York : Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985. p. 186-223.

MOROZOWSKI F^o, Marciano. *Matrizes esparsas em redes de potência: técnicas de operação*. Rio de Janeiro : LTC/FEESC, 1981. 172 p.

NOVAES, Antonio G. *Pesquisa Operacional e transportes: modelos probabilísticos*. São Paulo : Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda./Ed. da USP, 1975. 239 p.

ANEXOS

ANEXO 1 - DADOS E RESULTADOS - CASO A

ANEXO 2 - DADOS E RESULTADOS - CASO B

ANEXO 3 - DADOS E RESULTADOS - CASO C

ANEXO 4 - DADOS E RESULTADOS - CASO D

**ANEXO 5 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA ACUMULADA
DO TEMPO ENTRE CHEGADAS**

**ANEXO 6 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA ACUMULADA
DO TEMPO DE EXECUÇÃO DO REPARO**

Observações relativas aos Anexos:

- 1) O programa desenvolvido para implementação do MHL adota a terminologia interna da CELESC. Assim, onde se lê nos anexos "Turma", leia-se UME; para "Distrito", leia-se Área de cobertura; e para "Zona", leia-se Átomo.
- 2) Os dados da rede viária foram apresentados apenas no Anexo 1, pois a repetição é desnecessária.

ANEXO 1 - DADOS E RESULTADOS - CASO A**dados:**

28
6
35
29
01a1 2 0.357
02 1 3 0.082
03 1 2 0.146
04 1 2 0.074
05 2 3 0.072
06 2 3 0.218
07a2 3 0.125
08 3 2 0.081
09 3 2 0.027
10a3 2 0.300
11 4 6 0.121
12 4 5 0.210
13a4 6 0.155
14 4 5 0.063
15 4 6 0.089
16a5 4 0.300
17 5 6 0.174
18 5 6 0.053
19 5 6 0.028
20 5 6 0.038
21 5 4 0.079
22a6 5 0.131
23 6 5 0.049
24 6 5 0.091
25 6 5 0.110
26 6 5 0.117
27 6 5 0.064
28 6 5 0.010
99
01 01 2.20
02 02 1.80
03 03 5.00
04 04 4.00
05 05 5.50
06 06 10.0
07 07 4.00
08 08 3.00
09 09 1.50
10 10 8.00
11 11 1.50
12 12 1.00
13 13 2.00
14 14 1.00
15 15 1.00
16 16 3.00
17 17 6.50
18 18 1.00
19 19 3.50
20 20 3.50
21 21 1.00
22 22 2.00
23 23 3.00
24 24 2.00
25 25 3.00
26 26 3.50
27 27 4.00

28 28 1.50
 01 02 6.50
 01 04 8.50
 01 11 6.00
 01 12 4.20
 01 13 5.00
 02 03 6.50
 03 04 9.50
 03 07 7.50
 03 08 11.4
 04 05 7.50
 05 06 12.5
 06 07 22.0
 05 07 16.5
 07 10 32.5
 08 09 6.50
 09 10 6.50
 11 13 2.00
 12 13 5.00
 12 14 2.00
 13 14 4.50
 13 15 2.50
 14 15 4.00
 14 16 3.00
 15 16 5.50
 15 21 3.50
 15 24 4.00
 16 17 14.0
 16 18 1.50
 17 19 24.0
 17 20 15.0
 18 21 4.00
 20 21 26.5
 20 22 23.0
 20 23 13.0
 21 22 6.00
 22 23 21.0
 22 24 4.00
 23 26 23.5
 24 26 6.50
 25 26 3.50
 25 27 5.00
 26 27 5.00
 27a28 10.0

resultados:

Arquivo FLO6.DAD

Turma 1:	Zonas	Turma 2
	1	2
	2	3
	3	2
	4	2

Turma 2:	Zonas	Turma 2
	5	3
	6	3
	7	3

Turma 3:	Zonas	Turma 2
	8	2
	9	2
	10	2

Turma 4:	Zonas	Turma 2
	11	6
	12	5
	13	6
	14	5
	15	6

Turma 5:	Zonas	Turma 2
	16	4
	17	6
	18	6
	19	6
	20	6
	21	4

Turma 6:	Zonas	Turma 2
	22	5
	23	5
	24	5
	25	5
	26	5
	27	5
	28	5

Resultados para $M_i = 35$ minutos

Pq : 0.005409

Estado : 0 0 0 0 0 0	Pi : 0.151627
Estado : 1 0 0 0 0 0	Pi : 0.050640
Estado : 0 1 0 0 0 0	Pi : 0.042581
Estado : 0 0 1 0 0 0	Pi : 0.037861
Estado : 0 0 0 1 0 0	Pi : 0.053881
Estado : 0 0 0 0 1 0	Pi : 0.060203
Estado : 0 0 0 0 0 1	Pi : 0.052377
Estado : 1 1 0 0 0 0	Pi : 0.022155
Estado : 1 0 1 0 0 0	Pi : 0.013975
Estado : 1 0 0 1 0 0	Pi : 0.017995
Estado : 1 0 0 0 1 0	Pi : 0.020106
Estado : 1 0 0 0 0 1	Pi : 0.017493
Estado : 0 1 1 0 0 0	Pi : 0.020530
Estado : 0 1 0 1 0 0	Pi : 0.015131
Estado : 0 1 0 0 1 0	Pi : 0.016906
Estado : 0 1 0 0 0 1	Pi : 0.014709
Estado : 0 0 1 1 0 0	Pi : 0.013454
Estado : 0 0 1 0 1 0	Pi : 0.015033
Estado : 0 0 1 0 0 1	Pi : 0.013079
Estado : 0 0 0 1 1 0	Pi : 0.032088
Estado : 0 0 0 1 0 1	Pi : 0.024515
Estado : 0 0 0 0 1 1	Pi : 0.034770
Estado : 1 1 1 0 0 0	Pi : 0.010334
Estado : 1 1 0 1 0 0	Pi : 0.007873
Estado : 1 1 0 0 1 0	Pi : 0.008797

Estado : 1 1 0 0 0 1	Pi : 0.007653
Estado : 1 0 1 1 0 0	Pi : 0.004966
Estado : 1 0 1 0 1 0	Pi : 0.005549
Estado : 1 0 1 0 0 1	Pi : 0.004827
Estado : 1 0 0 1 1 0	Pi : 0.010717
Estado : 1 0 0 1 0 1	Pi : 0.008188
Estado : 1 0 0 0 1 1	Pi : 0.011612
Estado : 0 1 1 1 0 0	Pi : 0.007295
Estado : 0 1 1 0 1 0	Pi : 0.008151
Estado : 0 1 1 0 0 1	Pi : 0.007092
Estado : 0 1 0 1 1 0	Pi : 0.009011
Estado : 0 1 0 1 0 1	Pi : 0.006885
Estado : 0 1 0 0 1 1	Pi : 0.009764
Estado : 0 0 1 1 1 0	Pi : 0.008012
Estado : 0 0 1 1 0 1	Pi : 0.006122
Estado : 0 0 1 0 1 1	Pi : 0.008682
Estado : 0 0 0 1 1 1	Pi : 0.021782
Estado : 1 1 1 1 0 0	Pi : 0.003672
Estado : 1 1 1 0 1 0	Pi : 0.004103
Estado : 1 1 1 0 0 1	Pi : 0.003570
Estado : 1 1 0 1 1 0	Pi : 0.004689
Estado : 1 1 0 1 0 1	Pi : 0.003582
Estado : 1 1 0 0 1 1	Pi : 0.005080
Estado : 1 0 1 1 1 0	Pi : 0.002957
Estado : 1 0 1 1 0 1	Pi : 0.002260
Estado : 1 0 1 0 1 1	Pi : 0.003205
Estado : 1 0 0 1 1 1	Pi : 0.007274
Estado : 0 1 1 1 1 0	Pi : 0.004345
Estado : 0 1 1 1 0 1	Pi : 0.003319
Estado : 0 1 1 0 1 1	Pi : 0.004708
Estado : 0 1 0 1 1 1	Pi : 0.006117
Estado : 0 0 1 1 1 1	Pi : 0.005439
Estado : 1 1 1 1 1 0	Pi : 0.002187
Estado : 1 1 1 1 0 1	Pi : 0.001671
Estado : 1 1 1 0 1 1	Pi : 0.002370
Estado : 1 1 0 1 1 1	Pi : 0.003183
Estado : 1 0 1 1 1 1	Pi : 0.002008
Estado : 0 1 1 1 1 1	Pi : 0.002949
Estado : 1 1 1 1 1 1	Pi : 0.001484

Despachos Inter-districtais totais : 0.243529

Frequencias f_{nj} e tempos t_{nj} :

F 1 1 :	0.081431	t = 4.551724
F 1 2 :	0.018421	t = 13.448276
F 1 3 :	0.033302	t = 26.896551
F 1 4 :	0.016879	t = 17.586206
F 2 1 :	0.024692	t = 49.655170
F 2 3 :	0.010098	t = 22.758619
F 2 4 :	0.005118	t = 42.413792
F 2 5 :	0.016465	t = 34.137928
F 2 6 :	0.049853	t = 45.517239
F 2 7 :	0.028585	t = 8.275862
F 2 8 :	0.004672	t = 52.551720
F 2 9 :	0.001557	t = 66.000000
F 2 10 :	0.017303	t = 67.241379
F 3 2 :	0.005955	t = 70.137932
F 3 5 :	0.004938	t = 101.172417

F 3 6 : 0.014951 t = 112.758614
 F 3 7 : 0.008573 t = 67.241379
 F 3 8 : 0.019407 t = 26.896551
 F 3 9 : 0.006469 t = 13.448276
 F 3 10 : 0.071877 t = 16.551723
 F 4 11 : 0.026820 t = 4.137931
 F 4 12 : 0.047092 t = 10.344828
 F 4 13 : 0.034356 t = 4.137931
 F 4 14 : 0.014128 t = 9.310345
 F 4 15 : 0.019727 t = 5.172414
 F 4 16 : 0.025315 t = 15.517241
 F 4 21 : 0.006666 t = 12.413793
 F 5 12 : 0.015334 t = 10.344828
 F 5 14 : 0.004600 t = 6.206896
 F 5 16 : 0.063865 t = 6.206896
 F 5 17 : 0.037201 t = 28.965515
 F 5 18 : 0.011331 t = 3.103448
 F 5 19 : 0.005986 t = 78.620689
 F 5 20 : 0.008124 t = 59.999996
 F 5 21 : 0.016818 t = 11.379310
 F 5 22 : 0.009551 t = 23.793102
 F 5 23 : 0.003572 t = 67.241379
 F 5 24 : 0.006634 t = 19.655172
 F 5 25 : 0.008020 t = 40.344826
 F 5 26 : 0.008530 t = 33.103447
 F 5 27 : 0.004666 t = 43.448273
 F 5 28 : 0.000729 t = 64.137932
 F 6 11 : 0.009149 t = 25.862068
 F 6 13 : 0.011720 t = 21.724136
 F 6 15 : 0.006730 t = 16.551723
 F 6 17 : 0.014523 t = 52.758617
 F 6 18 : 0.004424 t = 20.689655
 F 6 19 : 0.002337 t = 102.413788
 F 6 20 : 0.003172 t = 47.586205
 F 6 22 : 0.029391 t = 4.137931
 F 6 23 : 0.010994 t = 43.448273
 F 6 24 : 0.020417 t = 8.275862
 F 6 25 : 0.024679 t = 28.965515
 F 6 26 : 0.026250 t = 21.724136
 F 6 27 : 0.014359 t = 32.068966
 F 6 28 : 0.002244 t = 52.758617

Performance Global :

Tempo de Espera = 46.7420

Tempo de Desl. = 23.2730

Performance das Turmas :

Turma	Ocupacao	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.2816	0.0000	15.9289	12.0702
2	0.2773	0.4007	16.3423	39.4873
3	0.2406	0.2604	18.5008	37.6654
4	0.3105	0.1837	40.3949	8.3252
5	0.3487	0.3007	68.6725	20.9750
6	0.3132	0.2886	76.2718	24.8510
Media	0.2953			

Performance por Distrito :

Distrito	Ocupacao	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.1959	0.2341	15.9289	19.9167
2	0.1234	0.2307	21.2818	47.2556
3	0.1213	0.1940	14.0086	27.2946
4	0.1897	0.2506	39.7530	9.2993
5	0.1998	0.2825	74.0784	21.9370
6	0.1700	0.2453	75.8141	24.0271

Performance das Zonas :

Zona	Ocupacao Gerada	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.1061	0.2327	7.8278	15.0462
2	0.0244	0.2443	28.8479	27.2981
3	0.0434	0.2327	19.1407	25.9338
4	0.0220	0.2327	37.7640	23.3630
5	0.0214	0.2307	40.8886	49.6034
6	0.0648	0.2307	13.5045	61.0305
7	0.0372	0.2307	23.5518	21.8798
8	0.0241	0.1940	23.5206	31.8742
9	0.0080	0.1940	70.5618	23.6445
10	0.0892	0.1940	6.3506	26.3866
11	0.0360	0.2544	40.2690	9.6638
12	0.0624	0.2456	25.6174	10.3448
13	0.0461	0.2544	31.4358	8.6113
14	0.0187	0.2456	85.3914	8.5480
15	0.0265	0.2544	54.7477	8.0669
16	0.0892	0.2839	26.1460	8.8498
17	0.0517	0.2808	48.1738	35.6459
18	0.0158	0.2808	158.1556	8.0412
19	0.0083	0.2808	299.3659	85.3011
20	0.0113	0.2808	220.5854	56.5146
21	0.0235	0.2839	99.2887	11.6730
22	0.0389	0.2453	47.2908	8.9585
23	0.0146	0.2453	126.4304	49.2837
24	0.0271	0.2453	68.0779	11.0667
25	0.0327	0.2453	56.3190	31.7564
26	0.0348	0.2453	52.9495	24.5150
27	0.0190	0.2453	96.7983	34.8598
28	0.0030	0.2453	619.5090	55.5495

Tempo de processamento = 265.8242 segundos.

ANEXO 2 - DADOS E RESULTADOS - CASO B

dados:

28
 6
 35
 29
 01a1 3 0.357
 02 1 3 0.082
 03 1 3 0.146
 04 1 3 0.074
 05 2 3 0.072
 06 2 3 0.218
 07a2 1 0.125
 08 2 3 0.081
 09 2 1 0.027
 10 2 1 0.3
 11 3 5 0.121
 12 3 4 0.21
 13a3 5 0.155
 14 4 3 0.063
 15 5 3 0.089
 16a4 5 0.3
 17 4 5 0.174
 18 4 5 0.053
 19 4 5 0.028
 20 5 3 0.038
 21a5 3 0.079
 22 6 5 0.131
 23 6 5 0.049
 24 6 5 0.091
 25 6 5 0.11
 26a6 5 0.117
 27 6 5 0.064
 28 6 5 0.01
 99

resultados:

Arquivo FLO6B.DAD

Turma 1:	Zonas	Turma 2
	1	3
	2	3
	3	3
	4	3

Turma 2:	Zonas	Turma 2
	5	3
	6	3
	7	1
	8	3
	9	1
	10	1

Turma 3:	Zonas	Turma 2
	11	5
	12	4
	13	5

Turma 4:	Zonas	Turma 2
	14	3
	16	5
	17	5
	18	5
	19	5

Turma 5:	Zonas	Turma 2
	15	3
	20	3
	21	3

Turma 6:	Zonas	Turma 2
	22	5
	23	5
	24	5
	25	5
	26	5
	27	5
	28	5

Resultados para $M_i = 35$ minutos

Pq : 0.005409

Estado : 0 0 0 0 0 0	Pi : 0.150815
Estado : 1 0 0 0 0 0	Pi : 0.055662
Estado : 0 1 0 0 0 0	Pi : 0.061307
Estado : 0 0 1 0 0 0	Pi : 0.052120
Estado : 0 0 0 1 0 0	Pi : 0.049931
Estado : 0 0 0 0 1 0	Pi : 0.032525
Estado : 0 0 0 0 0 1	Pi : 0.044405
Estado : 1 1 0 0 0 0	Pi : 0.029989
Estado : 1 0 1 0 0 0	Pi : 0.029720
Estado : 1 0 0 1 0 0	Pi : 0.018581
Estado : 1 0 0 0 1 0	Pi : 0.012231
Estado : 1 0 0 0 0 1	Pi : 0.016393
Estado : 0 1 1 0 0 0	Pi : 0.027426
Estado : 0 1 0 1 0 0	Pi : 0.020386
Estado : 0 1 0 0 1 0	Pi : 0.013354
Estado : 0 1 0 0 0 1	Pi : 0.018053
Estado : 0 0 1 1 0 0	Pi : 0.021349
Estado : 0 0 1 0 1 0	Pi : 0.017666
Estado : 0 0 1 0 0 1	Pi : 0.015479
Estado : 0 0 0 1 1 0	Pi : 0.018455
Estado : 0 0 0 1 0 1	Pi : 0.014773
Estado : 0 0 0 0 1 1	Pi : 0.016521
Estado : 1 1 1 0 0 0	Pi : 0.018945
Estado : 1 1 0 1 0 0	Pi : 0.010046
Estado : 1 1 0 0 1 0	Pi : 0.006641
Estado : 1 1 0 0 0 1	Pi : 0.008833
Estado : 1 0 1 1 0 0	Pi : 0.011864
Estado : 1 0 1 0 1 0	Pi : 0.009503
Estado : 1 0 1 0 0 1	Pi : 0.008808
Estado : 1 0 0 1 1 0	Pi : 0.006954
Estado : 1 0 0 1 0 1	Pi : 0.005499
Estado : 1 0 0 0 1 1	Pi : 0.006173
Estado : 0 1 1 1 0 0	Pi : 0.011042

Estado : 0 1 1 0 1 0	Pi : 0.008944
Estado : 0 1 1 0 0 1	Pi : 0.008134
Estado : 0 1 0 1 1 0	Pi : 0.007585
Estado : 0 1 0 1 0 1	Pi : 0.006032
Estado : 0 1 0 0 1 1	Pi : 0.006760
Estado : 0 0 1 1 1 0	Pi : 0.010755
Estado : 0 0 1 1 0 1	Pi : 0.006368
Estado : 0 0 1 0 1 1	Pi : 0.008044
Estado : 0 0 0 1 1 1	Pi : 0.007967
Estado : 1 1 1 1 0 0	Pi : 0.007506
Estado : 1 1 1 0 1 0	Pi : 0.005954
Estado : 1 1 1 0 0 1	Pi : 0.005612
Estado : 1 1 0 1 1 0	Pi : 0.003779
Estado : 1 1 0 1 0 1	Pi : 0.002973
Estado : 1 1 0 0 1 1	Pi : 0.003343
Estado : 1 0 1 1 1 0	Pi : 0.005731
Estado : 1 0 1 1 0 1	Pi : 0.003532
Estado : 1 0 1 0 1 1	Pi : 0.004363
Estado : 1 0 0 1 1 1	Pi : 0.002993
Estado : 0 1 1 1 1 0	Pi : 0.005412
Estado : 0 1 1 1 0 1	Pi : 0.003289
Estado : 0 1 1 0 1 1	Pi : 0.004096
Estado : 0 1 0 1 1 1	Pi : 0.003269
Estado : 0 0 1 1 1 1	Pi : 0.004433
Estado : 1 1 1 1 1 0	Pi : 0.003579
Estado : 1 1 1 1 0 1	Pi : 0.002233
Estado : 1 1 1 0 1 1	Pi : 0.002740
Estado : 1 1 0 1 1 1	Pi : 0.001625
Estado : 1 0 1 1 1 1	Pi : 0.002370
Estado : 0 1 1 1 1 1	Pi : 0.002236
Estado : 1 1 1 1 1 1	Pi : 0.001482

Despachos Inter-distritais totais : 0.249332

Frequencias f_{nj} e tempos t_{nj} :

F 1 1 :	0.078915	t = 4.551724
F 1 2 :	0.018126	t = 13.448276
F 1 3 :	0.032273	t = 26.896551
F 1 4 :	0.016358	t = 17.586206
F 1 7 :	0.009946	t = 49.655170
F 1 9 :	0.002148	t = 70.137932
F 1 10 :	0.023871	t = 83.586205
F 2 5 :	0.015710	t = 34.137928
F 2 6 :	0.047566	t = 45.517239
F 2 7 :	0.027212	t = 8.275862
F 2 8 :	0.017674	t = 52.551720
F 2 9 :	0.005878	t = 66.000000
F 2 10 :	0.065309	t = 67.241379
F 3 1 :	0.027209	t = 18.620689
F 3 2 :	0.006250	t = 32.068966
F 3 3 :	0.011128	t = 45.517239
F 3 4 :	0.005640	t = 36.206894
F 3 5 :	0.005693	t = 61.034481
F 3 6 :	0.017238	t = 86.896545
F 3 8 :	0.006405	t = 75.310349
F 3 11 :	0.025726	t = 4.137931
F 3 12 :	0.044831	t = 10.344828
F 3 13 :	0.032954	t = 4.137931

F 3 14 :	0.004404	t = 9.310345
F 3 15 :	0.005332	t = 5.172414
F 3 20 :	0.002277	t = 67.241379
F 3 21 :	0.004733	t = 12.413793
F 4 12 :	0.017595	t = 10.344828
F 4 14 :	0.014324	t = 6.206896
F 4 16 :	0.067560	t = 6.206896
F 4 17 :	0.039185	t = 28.965515
F 4 18 :	0.011936	t = 3.103448
F 4 19 :	0.006306	t = 78.620689
F 5 11 :	0.010244	t = 16.551723
F 5 13 :	0.013122	t = 12.413793
F 5 15 :	0.021125	t = 7.241379
F 5 16 :	0.021619	t = 11.379310
F 5 17 :	0.012539	t = 40.344826
F 5 18 :	0.003819	t = 8.275862
F 5 19 :	0.002018	t = 90.000000
F 5 20 :	0.009020	t = 54.827583
F 5 21 :	0.018751	t = 2.068965
F 5 22 :	0.008269	t = 12.413793
F 5 23 :	0.003093	t = 55.862068
F 5 24 :	0.005744	t = 15.517241
F 5 25 :	0.006943	t = 36.206894
F 5 26 :	0.007385	t = 28.965515
F 5 27 :	0.004040	t = 39.310345
F 5 28 :	0.000631	t = 59.999996
F 6 22 :	0.030673	t = 21.724136
F 6 23 :	0.011473	t = 48.620689
F 6 24 :	0.021307	t = 13.448276
F 6 25 :	0.025756	t = 7.241379
F 6 26 :	0.027395	t = 7.241379
F 6 27 :	0.014985	t = 10.344828
F 6 28 :	0.002341	t = 31.034481

Performance Global :

Tempo de Espera = 35.0811

Tempo de Desl. = 25.2575

Performance das Turmas :

Turma	Ocupacao	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.3211	0.1980	36.5748	24.2159
2	0.3280	0.0000	40.3777	48.1452
3	0.3361	0.4820	40.8920	23.6840
4	0.2894	0.1121	27.3835	15.0286
5	0.2529	0.6704	29.8699	20.2908
6	0.2542	0.0000	23.5187	15.8536
Media	0.2970			

Performance por Distrito :

Distrito	Ocupacao	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.1959	0.2564	37.5789	16.2148
2	0.2446	0.2669	40.3777	55.5992
3	0.1445	0.2835	37.5469	8.4518
4	0.1837	0.2417	26.4506	17.3217
5	0.0612	0.2015	44.1610	15.1167
6	0.1700	0.2123	23.5187	18.5244

Performance das Zonas :

Zona	Ocupacao Gerada	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.1061	0.2564	17.3421	8.1589
2	0.0244	0.2564	75.5015	18.2225
3	0.0434	0.2564	42.4049	31.6707
4	0.0220	0.2564	83.6638	22.3604
5	0.0214	0.2660	80.2901	41.2923
6	0.0648	0.2660	26.5178	56.5240
7	0.0372	0.2677	42.1937	19.3519
8	0.0241	0.2660	71.3689	58.6054
9	0.0080	0.2677	195.3414	67.1076
10	0.0892	0.2677	17.5807	71.6164
11	0.0360	0.2848	49.9303	7.6732
12	0.0624	0.2819	29.7986	10.3448
13	0.0461	0.2848	38.9779	6.4948
14	0.0187	0.2351	57.6980	6.9367
15	0.0265	0.2015	34.0718	6.8244
16	0.0892	0.2424	10.3390	7.4608
17	0.0517	0.2424	17.8258	31.7241
18	0.0158	0.2424	58.5225	4.3574
19	0.0083	0.2424	110.7747	81.3793
20	0.0113	0.2015	79.7998	57.3294
21	0.0235	0.2015	38.3847	4.1538
22	0.0389	0.2123	14.6704	19.7473
23	0.0146	0.2123	39.2208	50.1583
24	0.0271	0.2123	21.1189	13.8876
25	0.0327	0.2123	17.4711	13.3916
26	0.0348	0.2123	16.4258	11.8541
27	0.0190	0.2123	30.0284	16.4951
28	0.0030	0.2123	192.1817	37.1847

Tempo de processamento = 265.8791 segundos.

ANEXO 3 - DATOS E RESULTADOS - CASO C

dados:

28
 6
 35
 29
 01a1 2 0.357
 02 1 3 0.082
 03 1 2 0.146
 04 1 2 0.074
 05 2 3 0.072
 06 2 3 0.218
 07a2 3 0.125
 08 3 2 0.081
 09 3 2 0.027
 10a3 2 0.3
 11 4 1 0.121
 12 4 1 0.21
 13a4 1 0.155
 14 4 1 0.063
 15 4 6 0.089
 16a5 4 0.3
 17 5 6 0.174
 18 5 6 0.053
 19 5 6 0.028
 20 5 6 0.038
 21 5 4 0.079
 22a6 5 0.131
 23 6 5 0.049
 24 6 5 0.091
 25 6 5 0.11
 26 6 5 0.117
 27 6 5 0.064
 28 6 5 0.01
 99

resultados:

Arquivo FLO6C.DAD

Turma 1:	Zonas	Turma 2
	1	2
	2	3
	3	2
	4	2

Turma 2:	Zonas	Turma 2
	5	3
	6	3
	7	3

Turma 3:	Zonas	Turma 2
	8	2
	9	2
	10	2

Turma 4:	Zonas	Turma 2
	11	1
	12	1
	13	1
	14	1
	15	6

Turma 5:	Zonas	Turma 2
	16	4
	17	6
	18	6
	19	6
	20	6
	21	4

Turma 6:	Zonas	Turma 2
	22	5
	23	5
	24	5
	25	5
	26	5
	27	5
	28	5

Resultados para $M_i = 35$ minutos

Pq : 0.005409

Estado : 0 0 0 0 0 0	Pi : 0.151225
Estado : 1 0 0 0 0 0	Pi : 0.056105
Estado : 0 1 0 0 0 0	Pi : 0.043403
Estado : 0 0 1 0 0 0	Pi : 0.038028
Estado : 0 0 0 1 0 0	Pi : 0.053399
Estado : 0 0 0 0 1 0	Pi : 0.056788
Estado : 0 0 0 0 0 1	Pi : 0.049030
Estado : 1 1 0 0 0 0	Pi : 0.024991
Estado : 1 0 1 0 0 0	Pi : 0.015595
Estado : 1 0 0 1 0 0	Pi : 0.027919
Estado : 1 0 0 0 1 0	Pi : 0.021271
Estado : 1 0 0 0 0 1	Pi : 0.018291
Estado : 0 1 1 0 0 0	Pi : 0.020964
Estado : 0 1 0 1 0 0	Pi : 0.015616
Estado : 0 1 0 0 1 0	Pi : 0.016313
Estado : 0 1 0 0 0 1	Pi : 0.014082
Estado : 0 0 1 1 0 0	Pi : 0.013486
Estado : 0 0 1 0 1 0	Pi : 0.014283
Estado : 0 0 1 0 0 1	Pi : 0.012332
Estado : 0 0 0 1 1 0	Pi : 0.025940
Estado : 0 0 0 1 0 1	Pi : 0.018943
Estado : 0 0 0 0 1 1	Pi : 0.031137
Estado : 1 1 1 0 0 0	Pi : 0.011691
Estado : 1 1 0 1 0 0	Pi : 0.012142
Estado : 1 1 0 0 1 0	Pi : 0.009476
Estado : 1 1 0 0 0 1	Pi : 0.008150
Estado : 1 0 1 1 0 0	Pi : 0.007705
Estado : 1 0 1 0 1 0	Pi : 0.005913
Estado : 1 0 1 0 0 1	Pi : 0.005085
Estado : 1 0 0 1 1 0	Pi : 0.013362
Estado : 1 0 0 1 0 1	Pi : 0.009966

Estado : 1 0 0 0 1 1	Pi : 0.011707
Estado : 0 1 1 1 0 0	Pi : 0.007536
Estado : 0 1 1 0 1 0	Pi : 0.007879
Estado : 0 1 1 0 0 1	Pi : 0.006802
Estado : 0 1 0 1 1 0	Pi : 0.007573
Estado : 0 1 0 1 0 1	Pi : 0.005544
Estado : 0 1 0 0 1 1	Pi : 0.008949
Estado : 0 0 1 1 1 0	Pi : 0.006549
Estado : 0 0 1 1 0 1	Pi : 0.004785
Estado : 0 0 1 0 1 1	Pi : 0.007833
Estado : 0 0 0 1 1 1	Pi : 0.014943
Estado : 1 1 1 1 0 0	Pi : 0.005673
Estado : 1 1 1 0 1 0	Pi : 0.004433
Estado : 1 1 1 0 0 1	Pi : 0.003813
Estado : 1 1 0 1 1 0	Pi : 0.005808
Estado : 1 1 0 1 0 1	Pi : 0.004336
Estado : 1 1 0 0 1 1	Pi : 0.005217
Estado : 1 0 1 1 1 0	Pi : 0.003687
Estado : 1 0 1 1 0 1	Pi : 0.002751
Estado : 1 0 1 0 1 1	Pi : 0.003254
Estado : 1 0 0 1 1 1	Pi : 0.007738
Estado : 0 1 1 1 1 0	Pi : 0.003655
Estado : 0 1 1 1 0 1	Pi : 0.002675
Estado : 0 1 1 0 1 1	Pi : 0.004322
Estado : 0 1 0 1 1 1	Pi : 0.004366
Estado : 0 0 1 1 1 1	Pi : 0.003773
Estado : 1 1 1 1 1 0	Pi : 0.002714
Estado : 1 1 1 1 0 1	Pi : 0.002026
Estado : 1 1 1 0 1 1	Pi : 0.002440
Estado : 1 1 0 1 1 1	Pi : 0.003365
Estado : 1 0 1 1 1 1	Pi : 0.002135
Estado : 0 1 1 1 1 1	Pi : 0.002107
Estado : 1 1 1 1 1 1	Pi : 0.001572

Despachos Inter-distritais totais : 0.245982

Frequencias f_{nj} e tempos t_{nj} :

F 1 1 :	0.077564	t = 4.551724
F 1 2 :	0.017482	t = 13.448276
F 1 3 :	0.031721	t = 26.896551
F 1 4 :	0.016078	t = 17.586206
F 1 11 :	0.008994	t = 20.689655
F 1 12 :	0.015609	t = 16.965517
F 1 13 :	0.011521	t = 18.620689
F 1 14 :	0.004683	t = 21.103447
F 2 1 :	0.028559	t = 49.655170
F 2 3 :	0.011680	t = 22.758619
F 2 4 :	0.005920	t = 42.413792
F 2 5 :	0.016327	t = 34.137928
F 2 6 :	0.049433	t = 45.517239
F 2 7 :	0.028345	t = 8.275862
F 2 8 :	0.004696	t = 52.551720
F 2 9 :	0.001565	t = 66.000000
F 2 10 :	0.017394	t = 67.241379
F 3 2 :	0.006893	t = 70.137932
F 3 5 :	0.005077	t = 101.172417
F 3 6 :	0.015371	t = 112.758614
F 3 7 :	0.008813	t = 67.241379

F 3 8 :	0.019382	t = 26.896551
F 3 9 :	0.006461	t = 13.448276
F 3 10 :	0.071785	t = 16.551723
F 4 11 :	0.026975	t = 4.137931
F 4 12 :	0.046816	t = 10.344828
F 4 13 :	0.034555	t = 4.137931
F 4 14 :	0.014045	t = 9.310345
F 4 15 :	0.019552	t = 5.172414
F 4 16 :	0.023950	t = 15.517241
F 4 21 :	0.006307	t = 12.413793
F 5 16 :	0.065229	t = 6.206896
F 5 17 :	0.037977	t = 28.965515
F 5 18 :	0.011568	t = 3.103448
F 5 19 :	0.006111	t = 78.620689
F 5 20 :	0.008294	t = 59.999996
F 5 21 :	0.017177	t = 11.379310
F 5 22 :	0.008908	t = 23.793102
F 5 23 :	0.003332	t = 67.241379
F 5 24 :	0.006188	t = 19.655172
F 5 25 :	0.007480	t = 40.344826
F 5 26 :	0.007956	t = 33.103447
F 5 27 :	0.004352	t = 43.448273
F 5 28 :	0.000680	t = 64.137932
F 6 15 :	0.006905	t = 16.551723
F 6 17 :	0.013747	t = 52.758617
F 6 18 :	0.004187	t = 20.689655
F 6 19 :	0.002212	t = 102.413788
F 6 20 :	0.003002	t = 47.586205
F 6 22 :	0.030034	t = 4.137931
F 6 23 :	0.011234	t = 43.448273
F 6 24 :	0.020863	t = 8.275862
F 6 25 :	0.025219	t = 28.965515
F 6 26 :	0.026824	t = 21.724136
F 6 27 :	0.014673	t = 32.068966
F 6 28 :	0.002293	t = 52.758617

Performance Global :

Tempo de Espera = 36.1741
 Tempo de Desl. = 23.5803

Performance das Turmas :

Turma	Ocupacao	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.3257	0.2222	31.9416	13.5492
2	0.2850	0.4259	23.0578	39.6338
3	0.2429	0.2702	21.6568	38.2656
4	0.3092	0.1757	33.5329	8.2505
5	0.3259	0.2100	48.5314	21.9691
6	0.2889	0.1864	55.7422	24.7242
Media	0.2963			

Performance por Distrito :

Distrito	Ocupacao	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.1959	0.2708	29.6967	21.1466
2	0.1234	0.2372	23.6404	47.6747
3	0.1213	0.1950	14.7722	27.3417
4	0.1897	0.2516	35.8987	9.7511
5	0.1998	0.2673	49.2705	21.7540
6	0.1700	0.2287	47.6856	23.7904

Performance das Zonas :

Zona	Ocupacao Gerada	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.1061	0.2691	14.8991	16.6896
2	0.0244	0.2828	48.6391	29.4796
3	0.0434	0.2691	36.4313	25.7830
4	0.0220	0.2691	71.8780	24.2676
5	0.0214	0.2372	45.4202	50.0375
6	0.0648	0.2372	15.0012	61.4659
7	0.0372	0.2372	26.1620	22.2616
8	0.0241	0.1950	24.8028	31.9006
9	0.0080	0.1950	74.4083	23.6985
10	0.0892	0.1950	6.6967	26.4387
11	0.0360	0.2500	39.0694	8.2766
12	0.0624	0.2500	22.5114	12.0003
13	0.0461	0.2500	30.4993	7.7593
14	0.0187	0.2500	75.0380	12.2591
15	0.0265	0.2610	46.9102	8.1422
16	0.0892	0.2686	18.6536	8.7073
17	0.0517	0.2658	30.9929	35.2892
18	0.0158	0.2658	101.7503	7.7775
19	0.0083	0.2658	192.5987	84.9444
20	0.0113	0.2658	141.9149	56.7007
21	0.0235	0.2686	70.8365	11.6571
22	0.0389	0.2287	29.7450	8.6340
23	0.0146	0.2287	79.5224	48.8909
24	0.0271	0.2287	42.8198	10.8788
25	0.0327	0.2287	35.4236	31.5685
26	0.0348	0.2287	33.3043	24.3271
27	0.0190	0.2287	60.8843	34.6719
28	0.0030	0.2287	389.6599	55.3616

Tempo de processamento = 265.7692 segundos.

ANEXO 4 - DADOS E RESULTADOS - CASO D

dados:

28
 7
 35
 29
 01a1 2 0.357
 02 1 3 0.082
 03 1 2 0.146
 04 1 2 0.074
 05 2 3 0.072
 06 2 3 0.218
 07a2 3 0.125
 08 3 2 0.081
 09 3 2 0.027
 10a3 2 0.3
 11 4 6 0.121
 12 4 5 0.21
 13a4 6 0.155
 14 4 5 0.063
 15 4 6 0.089
 16a5 4 0.3
 17 5 6 0.174
 18 5 6 0.053
 19 5 6 0.028
 20 6 7 0.038
 21 6 4 0.079
 22a6 7 0.131
 23 6 7 0.049
 24 7 6 0.091
 25 7 6 0.11
 26a7 6 0.117
 27 7 6 0.064
 28 7 6 0.01
 99

resultados:

Arquivo FLO7.DAD

Turma 1:	Zonas	Turma 2
	1	2
	2	3
	3	2
	4	2

Turma 2:	Zonas	Turma 2
	5	3
	6	3
	7	3

Turma 3:	Zonas	Turma 2
	8	2
	9	2
	10	2

Turma 4:	Zonas	Turma 2
	11	6
	12	5
	13	6
	14	5
	15	6

Turma 5:	Zonas	Turma 2
	16	4
	17	6
	18	6
	19	6

Turma 6:	Zonas	Turma 2
	20	7
	21	4
	22	7
	23	7

Turma 7:	Zonas	Turma 2
	24	6
	25	6
	26	6
	27	6
	28	6

Resultados para Mi = 35 minutos

Pq : 0.001217

Estado : 0 0 0 0 0 0 0 0	Pi : 0.149289
Estado : 1 0 0 0 0 0 0 0	Pi : 0.049859
Estado : 0 1 0 0 0 0 0 0	Pi : 0.041924
Estado : 0 0 1 0 0 0 0 0	Pi : 0.037277
Estado : 0 0 0 1 0 0 0 0	Pi : 0.051612
Estado : 0 0 0 0 1 0 0 0	Pi : 0.045601
Estado : 0 0 0 0 0 1 0 0	Pi : 0.033666
Estado : 0 0 0 0 0 0 1 0	Pi : 0.033015
Estado : 1 1 0 0 0 0 0 0	Pi : 0.021813
Estado : 1 0 1 0 0 0 0 0	Pi : 0.013759
Estado : 1 0 0 1 0 0 0 0	Pi : 0.017237
Estado : 1 0 0 0 1 0 0 0	Pi : 0.015230
Estado : 1 0 0 0 0 1 0 0	Pi : 0.011244
Estado : 1 0 0 0 0 0 1 0	Pi : 0.011026
Estado : 0 1 1 0 0 0 0 0	Pi : 0.020214
Estado : 0 1 0 1 0 0 0 0	Pi : 0.014494
Estado : 0 1 0 0 1 0 0 0	Pi : 0.012806
Estado : 0 1 0 0 0 1 0 0	Pi : 0.009454
Estado : 0 1 0 0 0 0 1 0	Pi : 0.009271
Estado : 0 0 1 1 0 0 0 0	Pi : 0.012887
Estado : 0 0 1 0 1 0 0 0	Pi : 0.011386
Estado : 0 0 1 0 0 1 0 0	Pi : 0.008406
Estado : 0 0 1 0 0 0 1 0	Pi : 0.008244
Estado : 0 0 0 1 1 0 0 0	Pi : 0.023481
Estado : 0 0 0 1 0 1 0 0	Pi : 0.017671
Estado : 0 0 0 1 0 0 1 0	Pi : 0.011561
Estado : 0 0 0 0 1 1 0 0	Pi : 0.013689
Estado : 0 0 0 0 1 0 1 0	Pi : 0.010160

Estado : 0 0 0 0 0 1 1 Pi : 0.013402
Estado : 1 1 1 0 0 0 0 Pi : 0.010174
Estado : 1 1 0 1 0 0 0 Pi : 0.007541
Estado : 1 1 0 0 1 0 0 Pi : 0.006663
Estado : 1 1 0 0 0 1 0 Pi : 0.004919
Estado : 1 1 0 0 0 0 1 Pi : 0.004824
Estado : 1 0 1 1 0 0 0 Pi : 0.004757
Estado : 1 0 1 0 1 0 0 Pi : 0.004203
Estado : 1 0 1 0 0 1 0 Pi : 0.003103
Estado : 1 0 1 0 0 0 1 Pi : 0.003043
Estado : 1 0 0 1 1 0 0 Pi : 0.007842
Estado : 1 0 0 1 0 1 0 Pi : 0.005902
Estado : 1 0 0 1 0 0 1 Pi : 0.003861
Estado : 1 0 0 0 1 1 0 Pi : 0.004572
Estado : 1 0 0 0 1 0 1 Pi : 0.003393
Estado : 1 0 0 0 0 1 1 Pi : 0.004476
Estado : 0 1 1 1 0 0 0 Pi : 0.006988
Estado : 0 1 1 0 1 0 0 Pi : 0.006174
Estado : 0 1 1 0 0 1 0 Pi : 0.004558
Estado : 0 1 1 0 0 0 1 Pi : 0.004470
Estado : 0 1 0 1 1 0 0 Pi : 0.006594
Estado : 0 1 0 1 0 1 0 Pi : 0.004962
Estado : 0 1 0 1 0 0 1 Pi : 0.003247
Estado : 0 1 0 0 1 1 0 Pi : 0.003844
Estado : 0 1 0 0 1 0 1 Pi : 0.002853
Estado : 0 1 0 0 0 1 1 Pi : 0.003764
Estado : 0 0 1 1 1 0 0 Pi : 0.005863
Estado : 0 0 1 1 0 1 0 Pi : 0.004412
Estado : 0 0 1 1 0 0 1 Pi : 0.002887
Estado : 0 0 1 0 1 1 0 Pi : 0.003418
Estado : 0 0 1 0 1 0 1 Pi : 0.002537
Estado : 0 0 1 0 0 1 1 Pi : 0.003347
Estado : 0 0 0 1 1 1 0 Pi : 0.009720
Estado : 0 0 0 1 1 0 1 Pi : 0.005292
Estado : 0 0 0 1 0 1 1 Pi : 0.006432
Estado : 0 0 0 0 1 1 1 Pi : 0.005067
Estado : 1 1 1 1 0 0 0 Pi : 0.003517
Estado : 1 1 1 0 1 0 0 Pi : 0.003108
Estado : 1 1 1 0 0 1 0 Pi : 0.002294
Estado : 1 1 1 0 0 0 1 Pi : 0.002250
Estado : 1 1 0 1 1 0 0 Pi : 0.003431
Estado : 1 1 0 1 0 1 0 Pi : 0.002582
Estado : 1 1 0 1 0 0 1 Pi : 0.001689
Estado : 1 1 0 0 1 1 0 Pi : 0.002000
Estado : 1 1 0 0 1 0 1 Pi : 0.001485
Estado : 1 1 0 0 0 1 1 Pi : 0.001958
Estado : 1 0 1 1 1 0 0 Pi : 0.002164
Estado : 1 0 1 1 0 1 0 Pi : 0.001629
Estado : 1 0 1 1 0 0 1 Pi : 0.001066
Estado : 1 0 1 0 1 1 0 Pi : 0.001262
Estado : 1 0 1 0 1 0 1 Pi : 0.000936
Estado : 1 0 1 0 0 1 1 Pi : 0.001235
Estado : 1 0 0 1 1 1 0 Pi : 0.003246
Estado : 1 0 0 1 1 0 1 Pi : 0.001767
Estado : 1 0 0 1 0 1 1 Pi : 0.002148
Estado : 1 0 0 0 1 1 1 Pi : 0.001692
Estado : 0 1 1 1 1 0 0 Pi : 0.003179
Estado : 0 1 1 1 0 1 0 Pi : 0.002393
Estado : 0 1 1 1 0 0 1 Pi : 0.001565
Estado : 0 1 1 0 1 1 0 Pi : 0.001853
Estado : 0 1 1 0 1 0 1 Pi : 0.001376
Estado : 0 1 1 0 0 1 1 Pi : 0.001815
Estado : 0 1 0 1 1 1 0 Pi : 0.002730

Estado : 0 1 0 1 1 0 1 Pi : 0.001486
 Estado : 0 1 0 1 0 1 1 Pi : 0.001806
 Estado : 0 1 0 0 1 1 1 Pi : 0.001423
 Estado : 0 0 1 1 1 1 0 Pi : 0.002427
 Estado : 0 0 1 1 1 0 1 Pi : 0.001321
 Estado : 0 0 1 1 0 1 1 Pi : 0.001606
 Estado : 0 0 1 0 1 1 1 Pi : 0.001265
 Estado : 0 0 0 1 1 1 1 Pi : 0.003403
 Estado : 1 1 1 1 1 0 0 Pi : 0.001600
 Estado : 1 1 1 1 0 1 0 Pi : 0.001204
 Estado : 1 1 1 1 0 0 1 Pi : 0.000788
 Estado : 1 1 1 0 1 1 0 Pi : 0.000933
 Estado : 1 1 1 0 1 0 1 Pi : 0.000692
 Estado : 1 1 1 0 0 1 1 Pi : 0.000913
 Estado : 1 1 0 1 1 1 0 Pi : 0.001420
 Estado : 1 1 0 1 1 0 1 Pi : 0.000773
 Estado : 1 1 0 1 0 1 1 Pi : 0.000940
 Estado : 1 1 0 0 1 1 1 Pi : 0.000740
 Estado : 1 0 1 1 1 1 0 Pi : 0.000896
 Estado : 1 0 1 1 1 0 1 Pi : 0.000488
 Estado : 1 0 1 1 0 1 1 Pi : 0.000593
 Estado : 1 0 1 0 1 1 1 Pi : 0.000467
 Estado : 1 0 0 1 1 1 1 Pi : 0.001137
 Estado : 0 1 1 1 1 1 0 Pi : 0.001316
 Estado : 0 1 1 1 1 0 1 Pi : 0.000716
 Estado : 0 1 1 1 0 1 1 Pi : 0.000871
 Estado : 0 1 1 0 1 1 1 Pi : 0.000686
 Estado : 0 1 0 1 1 1 1 Pi : 0.000956
 Estado : 0 0 1 1 1 1 1 Pi : 0.000850
 Estado : 1 1 1 1 1 1 0 Pi : 0.000662
 Estado : 1 1 1 1 1 0 1 Pi : 0.000361
 Estado : 1 1 1 1 0 1 1 Pi : 0.000438
 Estado : 1 1 1 0 1 1 1 Pi : 0.000345
 Estado : 1 1 0 1 1 1 1 Pi : 0.000497
 Estado : 1 0 1 1 1 1 1 Pi : 0.000314
 Estado : 0 1 1 1 1 1 1 Pi : 0.000461
 Estado : 1 1 1 1 1 1 1 Pi : 0.000232

Despachos Inter-distritais totais : 0.220601

Frequencias f_{nj} e tempos t_{nj} :

F 1 1 :	0.081551	t = 4.551724
F 1 2 :	0.018447	t = 13.448276
F 1 3 :	0.033351	t = 26.896551
F 1 4 :	0.016904	t = 17.586206
F 2 1 :	0.024573	t = 49.655170
F 2 3 :	0.010049	t = 22.758619
F 2 4 :	0.005094	t = 42.413792
F 2 5 :	0.016489	t = 34.137928
F 2 6 :	0.049927	t = 45.517239
F 2 7 :	0.028628	t = 8.275862
F 2 8 :	0.004641	t = 52.551720
F 2 9 :	0.001547	t = 66.000000
F 2 10 :	0.017188	t = 67.241379
F 3 2 :	0.005929	t = 70.137932
F 3 5 :	0.004914	t = 101.172417
F 3 6 :	0.014877	t = 112.758614
F 3 7 :	0.008531	t = 67.241379

F 3 8 :	0.019438	t = 26.896551
F 3 9 :	0.006479	t = 13.448276
F 3 10 :	0.071992	t = 16.551723
F 4 11 :	0.026776	t = 4.137931
F 4 12 :	0.046806	t = 10.344828
F 4 13 :	0.034299	t = 4.137931
F 4 14 :	0.014042	t = 9.310345
F 4 15 :	0.019694	t = 5.172414
F 4 16 :	0.019689	t = 15.517241
F 4 21 :	0.004588	t = 12.413793
F 5 12 :	0.015619	t = 10.344828
F 5 14 :	0.004686	t = 6.206896
F 5 16 :	0.069490	t = 6.206896
F 5 17 :	0.039707	t = 28.965515
F 5 18 :	0.012095	t = 3.103448
F 5 19 :	0.006390	t = 78.620689
F 6 11 :	0.009193	t = 25.862068
F 6 13 :	0.011777	t = 21.724136
F 6 15 :	0.006762	t = 16.551723
F 6 17 :	0.012017	t = 52.758617
F 6 18 :	0.003660	t = 20.689655
F 6 19 :	0.001934	t = 102.413788
F 6 20 :	0.008973	t = 47.586205
F 6 21 :	0.018896	t = 12.413793
F 6 22 :	0.030934	t = 4.137931
F 6 23 :	0.011571	t = 43.448273
F 6 24 :	0.004645	t = 8.275862
F 6 25 :	0.005614	t = 28.965515
F 6 26 :	0.005972	t = 21.724136
F 6 27 :	0.003266	t = 32.068966
F 6 28 :	0.000510	t = 52.758617
F 7 20 :	0.002323	t = 69.310341
F 7 22 :	0.008008	t = 21.724136
F 7 23 :	0.002995	t = 48.620689
F 7 24 :	0.022407	t = 13.448276
F 7 25 :	0.027085	t = 7.241379
F 7 26 :	0.028809	t = 7.241379
F 7 27 :	0.015759	t = 10.344828
F 7 28 :	0.002462	t = 31.034481

Performance Global :

Tempo de Espera = 18.9700
 Tempo de Desl. = 21.3564

Performance das Turmas :

Turma	Ocupacao	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.2786	0.0000	16.0371	12.0702
2	0.2743	0.3990	16.4013	39.4535
3	0.2374	0.2592	18.5335	37.5732
4	0.2991	0.1463	21.0871	8.0292
5	0.2697	0.1372	19.9496	15.6231
6	0.2389	0.4815	22.7692	24.0788
7	0.2049	0.1213	16.2941	12.9827
Media	0.2576			

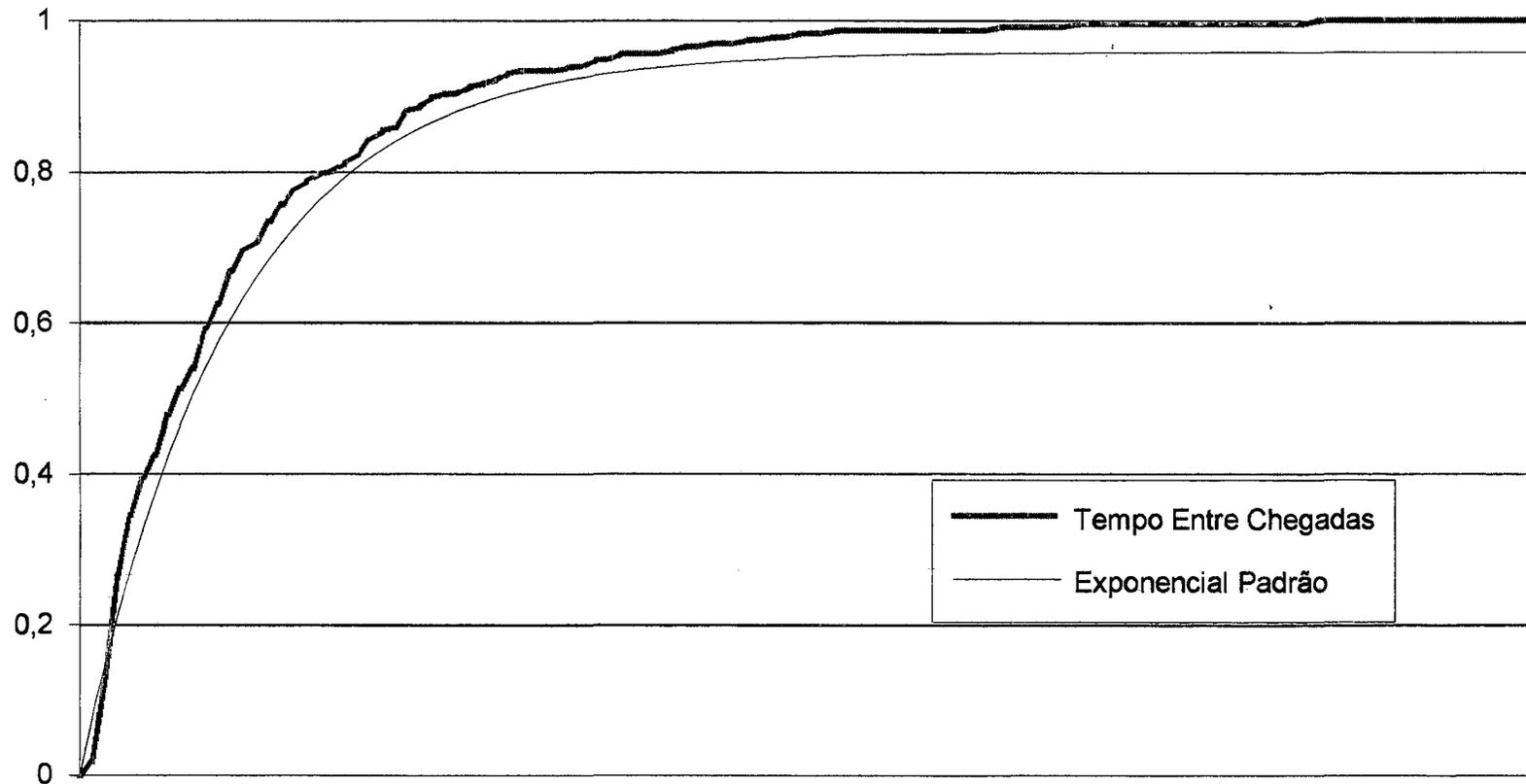
Performance por Distrito :

Distrito	Ocupacao	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.1959	0.2330	16.0371	19.8795
2	0.1234	0.2296	21.2996	47.1821
3	0.1213	0.1927	14.0386	27.2355
4	0.1897	0.2533	26.5318	9.3102
5	0.1650	0.2261	16.6332	20.2122
6	0.0883	0.2029	23.8816	20.7260
7	0.1165	0.1717	12.6527	12.0827

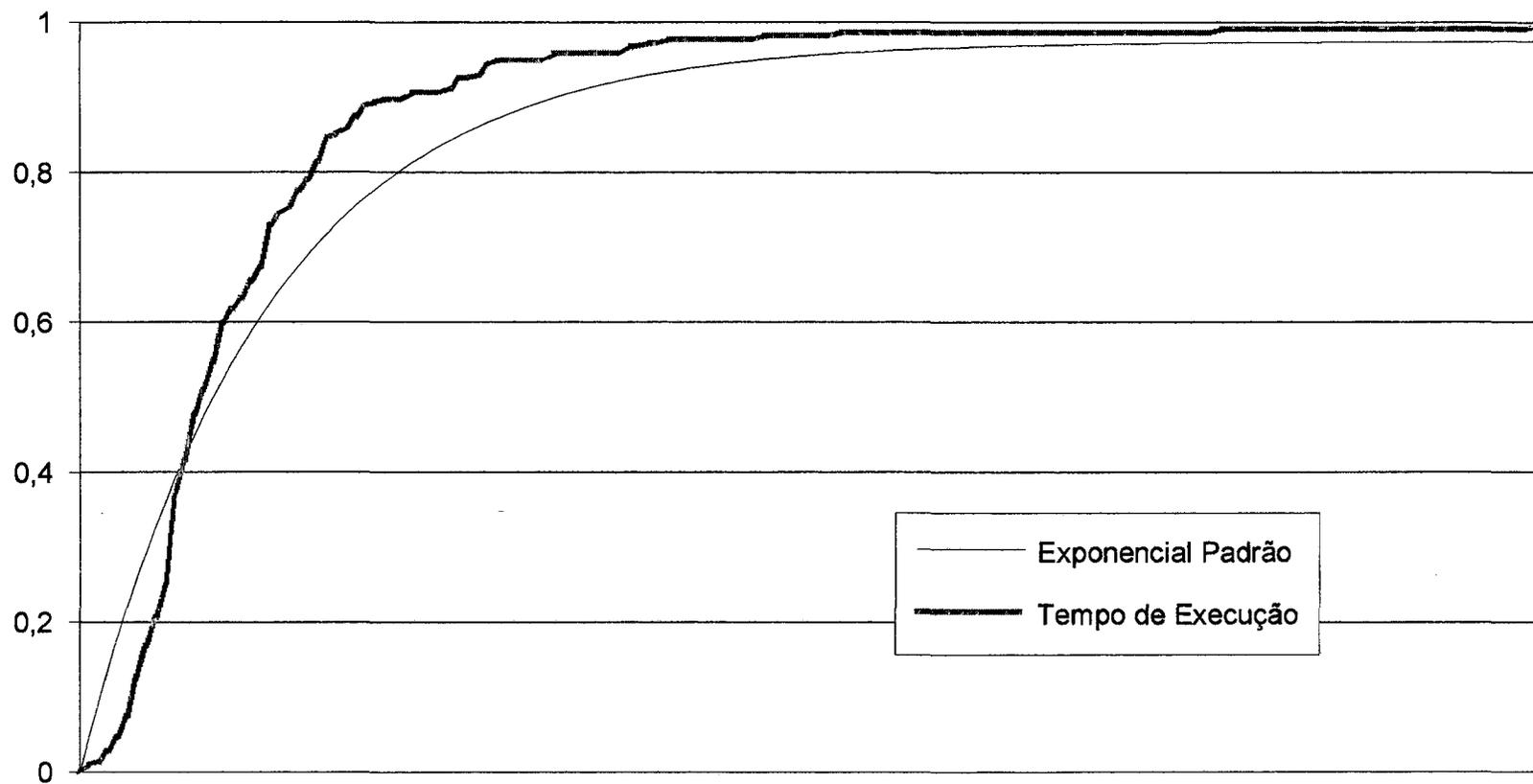
Performance das Zonas :

Zona	Ocupacao Gerada	Despachos Inter Distritais	Tempo de Espera	Tempo de Deslocamento
1	0.1061	0.2315	7.8875	14.9954
2	0.0244	0.2432	29.1159	27.2369
3	0.0434	0.2315	19.2865	25.9384
4	0.0220	0.2315	38.0517	23.3350
5	0.0214	0.2296	40.9229	49.5273
6	0.0648	0.2296	13.5158	60.9541
7	0.0372	0.2296	23.5716	21.8128
8	0.0241	0.1927	23.5710	31.8411
9	0.0080	0.1927	70.7128	23.5767
10	0.0892	0.1927	6.3642	26.3213
11	0.0360	0.2556	27.1608	9.6905
12	0.0624	0.2502	16.8742	10.3448
13	0.0461	0.2556	21.2030	8.6328
14	0.0187	0.2502	56.2474	8.5338
15	0.0265	0.2556	36.9265	8.0809
16	0.0892	0.2208	9.0689	8.2625
17	0.0517	0.2323	13.8163	34.4935
18	0.0158	0.2323	45.3591	7.1893
19	0.0083	0.2323	85.8582	84.1486
20	0.0113	0.2056	43.6800	52.0535
21	0.0235	0.1954	26.0729	12.4138
22	0.0389	0.2056	12.6705	7.7543
23	0.0146	0.2056	33.8743	44.5119
24	0.0271	0.1717	10.9008	12.5602
25	0.0327	0.1717	9.0179	10.9713
26	0.0348	0.1717	8.4784	9.7280
27	0.0190	0.1717	15.4995	14.0747
28	0.0030	0.1717	99.1971	34.7644

Tempo de processamento = 6592.8022 segundos.

ANEXO 5 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DO TEMPO ENTRE CHEGADAS

Obs.: A Curva Exponencial Padrão foi traçada com o valor esperado obtido dos dados reais.

ANEXO 6 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DO TEMPO DE EXECUÇÃO DO REPARO

Obs.: A Curva Exponencial Padrão foi traçada com o valor esperado obtido dos dados reais.