

MODELOS ESTOCÁSTICOS DE SIMULAÇÃO

APLICADOS A

SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

ANTONIO CARLOS LAVELHA



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**CAMPINAS - SÃO PAULO
BRASIL**

L385m

4229/BC

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL**



COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO

UNICAMP AUTORIZAÇÃO PARA QUE A UNICAMP POSSA FORNECER, A PREÇO DE CUSTO, CÓPIAS DA TESE A INTERESSADOS

Nome do Aluno: ANTONIO CARLOS LAVELHA

Nº de Identificação: 765041

Endereço para Correspondência: RUA SINHARINHA FROTA, 379, CAPIVARI, S.P.

Curso: MATEMÁTICA APLICADA (ÁREA DE OTIMIZAÇÃO E PESQUISA OPERACIONAL)

Nome do Orientador: MÁRIO YOSHIKAZU MIYAKE

Título da Dissertação ou Tese: MODELOS ESTOCÁSTICOS DE SIMULAÇÃO APLICADOS A SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Data proposta para a Defesa: 06/11/81

(O Aluno deverá assinar um dos 3 itens abaixo)

1) Autorizo a Universidade Estadual de Campinas a partir desta data, a fornecer, a preço de custo, cópias de minha Dissertação ou Tese a interessados.

1/1
Data

assinatura do aluno

2) Autorizo a Universidade Estadual de Campinas, a fornecer, a partir de dois anos após esta data, a preço de custo, cópias de minha Dissertação ou Tese a interessados.

1/1
Data

assinatura do aluno

3) Solicito que a Universidade Estadual de Campinas me consulte, dois anos após esta data, quanto à minha autorização para o fornecimento de cópias de minha Dissertação ou Tese, a preço de custo, a interessados.

23/10/81
Data

A. Lavelha
assinatura do aluno

DE ACORDO

Mário Miyake
Orientador

MODELOS ESTOCÁSTICOS DE SIMULAÇÃO
APLICADOS A
SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Antonio Carlos Lavelha

Orientador: Mario Yoshikazu Miyake

Dissertação apresentada no Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, UNICAMP, como requisito para obtenção do título de Mestre em Matemática Aplicada, na Área de Otimização e Pesquisa Operacional.

AGOSTO, 1981

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais e à minha esposa Márcia Laura.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meus agradecimentos aos professores do IMECC Mário Y. Miyake e Miguel Taube Netto e ao Engº Luiz Augusto Castrillon de Aquino, pelo incentivo e apoio recebidos; aos colegas do CPqD Loreno, Tonoli, Paulo Cesar e Liyoiti, pelo companheirismo sempre presente; à M. Júlia, da FEC, pela dactilografia, e a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a execução deste trabalho.

CONTEÚDO

SUMÁRIO

PREFÁCIO

CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTOS DE COMUTAÇÃO TELEFÔNICA E DE SIMU	
LACÃO DE SISTEMAS	001
1.1 - INTRODUÇÃO	002
1.2 - COMUTAÇÃO TELEFÔNICA	002
1.2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	002
1.2.2 - COMUTAÇÃO TELEFÔNICA ESPACIAL	003
1.2.2.1 - PONTOS DE CONTATO	004
1.2.2.2 - LÓGICA DE COMANDO	005
1.2.3 - COMUTAÇÃO TELEFÔNICA TEMPORAL	006
1.2.4 - SINALIZAÇÃO	008
1.3 - SIMULAÇÃO DE SISTEMAS	009
1.3.1 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS	009
1.3.2 - SISTEMAS E MODELOS DE SIMULAÇÃO ...	011
1.3.3 - CONCEITUAÇÃO DE SIMULAÇÃO	013
1.3.4 - ETAPAS DE UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO ..	015
1.3.5 - CAUTELAS NO USO DE SIMULAÇÃO	017
CAPÍTULO 2 - NOÇÕES BÁSICAS DE TEORIA DO TRÁFEGO TELEFÔNI	
CO	019
2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	020
2.1.1 - CONCEITOS PRIMÁRIOS	021
2.1.2 - INTENSIDADE DO TRÁFEGO ESCOADO POR	
UM CONJUNTO DE ÓRGÃOS	021
2.1.3 - DEFINIÇÃO DE ERLANG COMO UNIDADE DE	
INTENSIDADE DE TRÁFEGO	022
2.1.4 - INTERPRETAÇÕES DA INTENSIDADE DE TRÁ	
FEGO	023
2.1.5 - INTENSIDADE DE TRÁFEGO OFERECIDO ..	024
2.1.6 - HORA DE MAIOR MOVIMENTO	025
2.2 - REDES E CENTRAIS TELEFÔNICAS. CONCEITOS RE	
LATIVOS A SEU DIMENSIONAMENTO	027

.../..

2.2.1 -	ALGUMAS DEFINIÇÕES RELATIVAS A REDES E CENTRAIS TELEFÔNICAS	027
2.2.2 -	ALGUMAS DEFINIÇÕES UTILIZADAS EM EN <u>GENHARIA</u> DE TRÁFEGO EM CENTRAIS TELE <u>FÔNICAS</u>	029
2.3 -	MODELOS MATEMÁTICOS DE TRÁFEGO	030
2.3.1 -	MODELOS DE ERLANG	031
2.3.1.1 -	LEI DE OCORRÊNCIA DE DEMANDA: PROCESSO DE POISSON	031
2.3.1.2 -	LEI DE DURAÇÃO DE SERVIÇO: DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL NE <u>GATIVA</u>	032
2.3.1.3 -	O MODELO DE ERLANG PARA SIS <u>TEMA</u> COM PERDA	033
2.3.1.4 -	O MODELO DE ERLANG PARA SIS <u>MA</u> COM ESPERA	035
2.3.2 -	OUTROS MODELOS DE TRÁFEGO	036
2.3.2.1 -	MODELO DE ENGSET COM PERDA .	036
2.3.2.2 -	MODELOS DE TRÁFEGO COM DURA <u>ÇÃO</u> DE SERVIÇO CONSTANTE ...	037
CAPÍTULO 3 - ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE DESEMPENHOS DE REDES DE COMUTAÇÃO DE CENTRAIS TELEFÔNICAS		
3.1 -	INTRODUÇÃO	040
3.2 -	DESCRIÇÃO DAS ESTRUTURAS DE COMUTAÇÃO ..	041
3.2.1 -	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA 1 DE COMUTA <u>ÇÃO</u>	041
3.2.2 -	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA 2 DE COMUTA <u>ÇÃO</u>	042
3.3 -	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	043
3.4 -	MODELO MATEMÁTICO ADOPTADO PARA A SIMULA <u>ÇÃO</u>	044
3.5 -	RESULTADOS OBTIDOS	056
3.5.1 -	VERIFICAÇÃO DO MODELO	056
3.5.2 -	PLANEJAMENTO TÁTICO	058

.../.

3.5.3 - ESTIMATIVA DA MÉDIA DAS RESPOSTAS DE SIMULAÇÃO	060
3.5.4 - INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA A MÉ DIA E PARA A VARIANÇA DAS RESPOSTAS DE SIMULAÇÃO	062
3.5.5 - RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO AS SOCIADO À ESTRUTURA 1 DE COMUTAÇÃO	064
3.5.6 - RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO AS SOCIADO À ESTRUTURA 2 DE COMUTAÇÃO	067
3.6 - COMPARAÇÃO DAS DUAS RESPOSTAS DE SIMULA ÇÃO	069
3.7 - OBSERVAÇÕES FINAIS	071
 CAPÍTULO 4 - DIMENSIONAMENTO DE UM ÓRGÃO DE CONTROLE DE UMA CENTRAL TELEFÔNICA AUTOMÁTICA	074
4.1 - INTRODUÇÃO	075
4.2 - DESCRIÇÃO DO ÓRGÃO DE CONTROLE NO TRATA MENTO DE UMA CHAMADA TELEFÔNICA	075
4.2.1 - DESCRIÇÃO GERAL	075
4.2.2 - DESCRIÇÃO COMPLETA DE UMA CHAMADA INTERNA	077
4.2.3 - DESCRIÇÃO COMPLETA DE UMA CHAMADA DE SAÍDA	078
4.2.4 - DESCRIÇÃO COMPLETA DE UMA CHAMADA DE ENTRADA	079
4.3 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO	080
4.4 - O MODELO ADOTADO PARA A SIMULAÇÃO	081
4.5 - DADOS DE ENTRADA E SAÍDA DE RESULTADOS DO PROGRAMA DE COMPUTADOR	089
4.6 - CONFIGURAÇÃO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS TÍPI CAS	090
4.7 - VERIFICAÇÃO DO MODELO	092
4.8 - PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO	094
4.9 - RESULTADOS OBTIDOS	099

.../.

4.10 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS	102
CAPÍTULO 5 - ESTIMATIVA DO GRAU DE SERVIÇO DA REDE DE COMU	
TAÇÃO DE UMA CENTRAL AUTOMÁTICA DE PEQUENO POR	
TE	105
5.1 - INTRODUÇÃO	106
5.2 - DESCRIÇÃO SUMÁRIA DA ESTRUTURA FÍSICA PRO	
POSTA PARA A CENTRAL	106
5.2.1 - INTRODUÇÃO	106
5.2.2 - ESTRUTURA DOS CAMINHOS INTERNOS DE	
VOZ	108
5.3 - DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE COMUTAÇÃO	111
5.3.1 - CONDIÇÕES A SEREM SATISFEITAS EM UMA	
CHAMADA INTERNA	113
5.3.2 - CONDIÇÕES A SEREM SATISFEITAS EM UMA	
CHAMADA DE ENTRADA	116
5.3.3 - CONDIÇÕES A SEREM SATISFEITAS EM UMA	
CHAMADA DE SAÍDA	118
5.4 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DO	
GRAU DE SERVIÇO DA REDE DE COMUTAÇÃO	119
5.5 - DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	121
5.5.1 - O OBJETO SISTEMA	121
5.5.2 - OS GERADORES DE CHAMADAS	124
5.5.3 - OS OBJETOS CHAMADAS	127
5.6 - DADOS NECESSÁRIOS PARA O MODELO E RESULTA	
DOS FORNECIDOS	137
5.7 - VERIFICAÇÃO DO MODELO	140
5.8 - PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO	144
5.8.1 - INTRODUÇÃO	144
5.8.2 - ESTIMATIVA DA MÉDIA DAS RESPOSTAS DE	
SIMULAÇÃO	145
5.8.3 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A MÉDIA	
DAS RESPOSTAS DE SIMULAÇÃO	146
5.8.4 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA VARIANÇA	
DA RESPOSTA DE SIMULAÇÃO	148

5.9 - RESULTADOS OBTIDOS	148
5.10 - COMENTÁRIOS FINAIS	151
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS	158
APÊNDICE A - NOÇÕES BÁSICAS DE SIMULA PARA APLICAÇÃO EM SI MULAÇÃO DE SISTEMAS	164
A.1 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS	165
A.2 - BLOCOS	165
A.3 - PROCEDURES	167
A.4 - CLASSES E VARIÁVEIS DE REFERÊNCIA	169
A.5 - HIERARQUIA PRÉ-DEFINIDA NO SISTEMA SIMULA	172
APÊNDICE B - PROCESSOS DOS MODELOS ASSOCIADOS ÀS DUAS ESTRU TURAS DE COMUTAÇÃO	176
B.1 - OBJETO SISTEMA	177
B.2 - CLASSE GERADOR DE CHAMADAS	178
B.3 - CLASSE CHAMADA (MODELO ASSOCIADO À ESTRUTU RA 1)	179
B.4 - CLASSE CHAMADA (MODELO ASSOCIADO À ESTRUTU RA 2)	182
APÊNDICE C - CLASSES DE OBJETOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO DO ÓRGÃO DE CONTROLE	185
C.1 - OBJETO SISTEMA	186
C.2 - GERADOR DE CHAMADAS	187
C.3 - CHAMADA	188
C.4 - VARREDOR	195
C.5 - LIBERADOR	196
APÊNDICE D - CLASSES DE OBJETOS DO MODELO DA REDE DE COMUTA ÇÃO DA CENTRAL	197

.../..

D.1 - OBJETO SISTEMA	198
D.2 - GERADOR DE OBJETOS CHAMADAS INTERNAS	199
D.3 - GERADOR DE OBJETOS CHAMADAS DE ENTRADA ...	200
D.4 - GERADOR DE OBJETOS CHAMADAS DE SAÍDA	201
D.5 - CHAMADA INTERNA	202
D.6 - CHAMADA DE ENTRADA	206
D.7 - CHAMADA DE SAÍDA	209
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	217

SUMÁRIO

A utilização de Simulação de Sistemas como ferramenta de auxílio em decisões tem crescido muito nos últimos anos. Neste trabalho são apresentados três casos de estudo de aplicações de modelos de simulação estocásticos em sistemas de comutação telefônica.

Os casos de estudo foram selecionados para mostrar como a lógica e o conhecimento de relações físicas e relações de tempo entre sub-sistemas que compõem um sistema, podem ser usados para desenvolver estruturas básicas com o propósito de modelamento.

PREFÁCIO

A utilização de Simulação de Sistemas, este que é um dos instrumentos mais poderosos disponíveis àqueles responsáveis pelo projeto e/ou operação de sistemas ou processos complexos, tem-se expandido muito nos últimos anos. Este fato é grande parte devido ao desenvolvimento acelerado que têm alcançado os computadores digitais, embora a modelagem e experimentação em simulação serem também fortemente baseadas em Ciência da Computação, Matemática, Probabilidade e Estatística, disciplinas estas que por sua vez têm progredido muito também. As aplicações de simulação são feitas em diversos campos de conhecimento. Este trabalho pretende apresentar alguns modelos de simulação, colhidos de experiências de uso de simulação em Telecomunicações, vividas por mim a partir de 1977.

Cabe aqui fazer um breve registro histórico. Meu interesse por Simulação de Sistemas data de meados de 1977, quando, como professor da UNICAMP, entrei pela primeira vez em contato com essa disciplina, através do Prof. Eliezer Arantes da Costa. Posteriormente, em fins de 1977, conheci o Eng^o Ricardo Oliveira Maciel, que era chefe da Área de Simulação (S-III), uma das áreas que compunham o Departamento de Sistemas do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Pe. Roberto Landell de Moura (CPqD), da Telebrás, então em sua sede provisória, em Campinas (em Julho de 1980, o CPqD mudou-se para a sua sede definitiva). No início de 1978 vim a fazer parte da Área S-III, então em regime de prestação de serviço (desde Julho de 1978 sou funcionário contratado do CPqD). Liderados pelo Eng^o Ricardo, grande entusiasta de simulação e da linguagem SIMULA, eu e alguns companheiros de trabalho, constituímos um grupo que tinha a missão de desenvolver modelos de simulação aplicados à Telecomunicações, utilizando SIMULA como ferramenta básica. Em fins de 1978, em virtude de uma reestruturação interna do CPqD, passei a integrar a Área de Desenvolvimento de "Software" (D-1) cujo chefe era o Eng^o Carlos Alberto de Simone Poyares (em Maio de 1980 houve nova reestruturação interna e essa área deixou de existir). Dentro dessa área, eu e mais os engenheiros Osvaldo Tonoli, Paulo Cesar Gonçalves Delgado e Liyoiti Sawamura, compúnhamos o Grupamento de "Software" de Simulação (SSI), cuja missão era desenvolver modelos matemáticos de simulação e modelos em tempo real, aplicados à

Telecomunicações. Atualmente sou integrante do Grupamento de Terminais e Redes, chefiado pelo Eng^o Luiz Augusto Castrillon de Aquino, que é um dos grupamentos da Coordenação das Áreas de Engenharia de Sistemas, uma das coordenações que compõem o Departamento de Comutação. As principais experiências foram em redes de comutação e órgãos de controle de centrais telefônicas temporais, controladas a programas armazenados (CPA's). São apresentados, neste trabalho, três casos de estudo.

No Capítulo 1 são apresentados alguns conceitos básicos de Comutação Telefônica e de Simulação, com o objetivo de dar uma visão geral nestas duas disciplinas. O Capítulo 2 apresenta uma revisão sumária da Teoria do Tráfego Telefônico, onde são mostrados os conceitos básicos e que são fundamentais na construção e compreensão dos modelos matemáticos associados às aplicações que foram feitas. O Capítulo 3 apresenta a simulação de dois sistemas distintos de comutação em uma central de comutação temporal, com o objetivo de comparar os desempenhos desses sistemas no tratamento de chamadas telefônicas. O Capítulo 4 apresenta o problema do dimensionamento, via simulação, de um órgão de controle de uma CPA. No Capítulo 5 estuda-se o bloqueio de uma rede de comutação de uma CPA de pequeno porte. O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões e comentários sobre este trabalho.

Todos os modelos matemáticos desenvolvidos foram implementados em computador utilizando-se a linguagem SIMULA e "rodados" no "DECsystem-10", da UNICAMP. SIMULA foi a linguagem adotada por ser extraordinariamente poderosa e especialmente voltada para aplicações em simulação de sistemas discretos, manipulação de textos e de listas. No Apêndice A são mostradas as principais características e os conceitos básicos dessa linguagem, que são úteis para o bom entendimento dos modelos. Também com o propósito de auxiliar na compreensão dos modelos apresentados nos Capítulos 3, 4 e 5, são apresentados os fluxogramas dos processos associados aos referidos modelos nos Apêndices B, C e D.

São colocadas referências nas principais fórmulas e conceitos, que são indicadas pelo(s) número(s) da(s) referência(s) entre colchetes ([]).

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS DE COMUTAÇÃO TELEFÔNICA E
DE SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

1.1 - INTRODUÇÃO

O uso de simulação de sistemas em computadores digitais tem-se expandido muito nos últimos anos, com aplicações em muitas disciplinas, como Telecomunicações, por exemplo. Este trabalho pretende apresentar algumas experiências de uso de simulação em sistemas discretos de Telecomunicações, vividas pelo autor, a partir do ano de 1977. Mais precisamente, podemos dizer que as aplicações foram feitas em comutação telefônica, onde frequentemente aparecem problemas de determinação de eficiências de redes de comutação, dimensionamento de órgãos de controle, etc.

Os modelos matemáticos utilizados nas diversas simulações que serão apresentados neste trabalho, foram implementados no "DECsystem-10" da UNICAMP, e na linguagem de programação SIMULA. Essa linguagem foi escolhida por ser extraordinariamente poderosa e especialmente voltada para simulação de sistemas discretos, manipulação de textos e de listas. No Apêndice A são mostradas as principais características e os conceitos básicos de SIMULA, que serão úteis para o entendimento dos modelos.

A seguir serão apresentadas algumas noções básicas de comutação telefônica e de simulação de sistemas, que são de grande utilidade na construção e compreensão dos modelos estocásticos de simulação que foram desenvolvidos.

1.2 - COMUTACÃO TELEFÔNICA

1.2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

As primeiras ligações telefônicas eram realizadas de ponto a ponto, com dois aparelhos telefônicos nas duas extremidades do mesmo circuito. Esta ligação direta é hoje bastante rara e somente usada a pequena distância, para usos particulares, por exemplo, na comunicação entre convés e máquina a bordo dos navios.

Com efeito, em uma rede onde existem n pontos a serem ligados, cada ponto deveria dispor de $(n-1)$ aparelhos telefônicos, e o número total de circuitos seria $n(n-1)/2$, o que já se

torna proibitivo quando n alcança algumas unidades.

Em um sistema de ligações diretas, os circuitos são, aliás, pouco ocupados. Como estes circuitos, notadamente os circuitos interurbanos, representam um grande investimento, é necessário dar-lhes a máxima ocupação compatível com a qualidade de serviço, usando-os para ligação entre dois aparelhos quaisquer da rede. Isto é possível graças à comutação, que permite ligar sucessivamente vários aparelhos na extremidade do mesmo circuito.

A referida ligação pode ser feita de dois modos:

- Comutação espacial, onde a ligação entre o aparelho e o circuito é materializado por uma conexão elétrica passando por um determinado percurso dentro da central de comutação. A quase totalidade das centrais de comutação hoje existentes funciona sobre este sistema.

A comutação espacial permite a transmissão tanto de sinais analógicos como de sinais digitais.

- Comutação temporal, onde o mesmo circuito é utilizado em sucessão cíclica pelos sinais digitais oriundos de vários aparelhos telefônicos.

Os sistemas de comutação temporal estão em fase de grande desenvolvimento nos principais países do mundo, em virtude da tendência atual da tecnologia ser favorável aos sistemas digitais, pois os problemas técnicos que têm aparecido têm recebido soluções favoráveis.

1.2.2 - COMUTAÇÃO TELEFÔNICA ESPACIAL

Uma central de comutação espacial é composta de duas categorias de órgãos, de características e funções bem diferentes.

A conexão entre os circuitos é feita através de pontos de contato. Estes pontos de contato servem tanto para estabelecer o circuito de conversação como para mandar as correntes de sinalização.

O fechamento e a abertura destes pontos de contato é

comandado manualmente ou por um sistema lógico automático.

1.2.2.1 - Pontos de Contato

Existe uma grande variedade nos pontos de contato usa
dos na comutação:

a) Os mais antigamente usados são constituídos por um soquete ("jack"), e um cordão terminado por uma pega ("plug") . Introduzindo a pega no soquete, realiza-se o contato entre os fios deste último e os fios do cordão.

b) Também para uso manual, usam-se chaves de 2 ou 3 po
sições, estáveis ou não, comandados por uma pequena alavanca, e botões de pressão, com a posição deprimida estável ou não, e com ou sem intertravamento mecânico. Em ambos os casos, as posições estáveis servem para o circuito de conversação e as instáveis para a sinalização.

c) Relés eletromagnéticos, constituídos por um circui
to magnético com uma parte móvel chamada armadura. O circuito magnético é energizado por um ou vários enrolamentos. A armadu
ra desloca pequenas molas que entram em contato. O feixe de mo
las pode incluir vários tipos de contato: "fecha" - o contato fecha o circuito quando o relé é energizado; "abre" - o contato abre o circuito quando o relé é energizado; "abre-fecha" - uma mola fica em contato com uma segunda quando o relé não está ener
gizado, e com uma terceira quando o relé está energizado; "esca
lonado" - o contato opera antes dos outros contatos do feixe.

Tais relés eletromagnéticos permitem a realização de lógicas bastante elaboradas, cujo método moderno de cálculo é a Álgebra de Boole.

d) Seletores rotativos. Nestes seletores, um certo nú
mero de escovas (geralmente 4 ou 5) giram sob o impulso de um motor, entrando em contato sucessivamente com uma série de con
tatos fixados sobre a periferia de um cilindro, e param quando a conexão desejada é realizada. Além do movimento de rotação, as escovas podem ter um movimento de translação segundo o eixo, de modo a entrar em contato com vários círculos de contatos, so
brepostos um ao outro.

e) Seletores de barras cruzadas ("crossbar"). Nestes seletores, os contatos estão dispostos na intersecção de retas paralelas a dois eixos perpendiculares Ox e Oy . As entradas estão nas retas perpendiculares $x=0$ e $y=0$. O fechamento de um contato situado na posição $x=a$ e $y=b$ realiza-se energizando as entradas $x=a$ e $y=b$. Depois, a entrada $x=a$ poderá ser liberada e o contato é mantido pela ação da entrada $y=b$.

f) Seletores de fios cruzados ("crosspoint"). A disposição dos contatos é a mesma que no caso do seletor de barras cruzadas, porém cada cruzamento comporta um relé miniaturizado, geralmente com 3 contatos. A conexão é realizada, energizando -se o relé de comando do ponto de contato desejado. A disposição dos circuitos impede fechar simultaneamente dois contatos da mesma linha.

g) Pontos de contato eletrônicos. Estes pontos de contato são geralmente realizados por meio de transistores PNP.

1.2.2.2 - Lógica de Comando

As operações necessárias para estabelecer uma comunicação e para rompê-la não são muito numerosas, e sucedem-se sempre na mesma sequência, de modo que a lógica necessária não é muito complicada.

a) No sistema manual, a lógica é constituída pelo cérebro do operador da mesa, ou do próprio assinante no caso dos aparelhos de botões (intercomunicador).

b) Na maioria dos sistemas automáticos atualmente em operação, usa-se uma lógica fixa ("prewired logic") realizada por relés, com 3 esquemas principais de operação:

b.1) Passo-a-passo ("step-by-step"). É o sistema mais intuitivo e mais antigo. Os algarismos ("digits") do número do assinante chamado, armazenados ou não em memória (registrador) ficam na forma decimal e são usados um depois do outro, na sequência natural.

b.2) Comando inverso. Neste esquema, usado somente no sistema "rotary", os algarismos são armazenados em um registrador. Os seletores do equipamento giram, mandam um impulso para o registra

dor a cada passo de uma unidade e param quando o registrador ti ver voltado à sua posição de repouso.

b.3) Marcação central. É o esquema mais moderno, sempre usado com os comutadores de barras cruzadas e de fios cruzados e, em alguns casos, com comutadores rotativos. Um órgão central, o mar cador, fecha simultaneamente todos os pontos de contato necessários para realizar a ligação.

c) A tecnologia orienta-se agora para os sistemas com lógica programável, onde o esquema lógico é proporcionado por um computador digital.

Como em todos os sistemas de computação programada a flexibilidade do sistema é excelente, permitindo oferecer novas facilidades. Por exemplo, para mudar o número de chamada de um assinante, não precisa mais dessoldar a linha e soldá-la sobre outros terminais, basta modificar o programa. A modificação po de ser feita pelo próprio assinante, mediante a emissão de um código conveniente.

Em compensação, é bem conhecido que a programação em tempo real é extremamente difícil, devido ao número elevadíssimo de sequências possíveis. De fato, no início da operação de uma central, as falhas devidas ao programa ("software") são mais numerosas que as devidas ao equipamento ("hardware").

A ligação entre um equipamento de operação extramamente rápida como o computador e circuitos cujos estados mudam lentamente (linhas de assinante, por exemplo), exige uma interface constituída por circuitos de lógica fixa, com memória, que são explorados ciclicamente pelo computador. Por exemplo, os registradores registram as variações de estado da linha, enquanto os marcadores transmitem à referida linha os comandos oriundos do computador.

A lógica programada é sempre usada com o esquema de comando central. Os pontos de contato operados podem ser selctores de barras cruzadas, de fios cruzados com microrelés, ou eletrônicos.

1.2.3 - COMUTAÇÃO TELEFÔNICA TEMPORAL

Quando vários canais telefônicos operam em modulação digital (PCM ou Δ), estes canais podem usar sucessivamente o mesmo circuito. Isto é o princípio do multiplex por divisão do tempo. Os pulsos oriundos dos vários canais são transmitidos em sequência no mesmo circuito. Naturalmente, há necessidade de um sincronismo rigoroso entre os dois equipamentos terminais.

Existem sistemas comerciais de 12, 24, 30, 60 e 120 canais.

Como os outros equipamentos de transmissão digital, estes multiplex oferecem vantagens importantes:

- Qualidade de transmissão praticamente independente da qualidade do circuito, graças à possibilidade de regenerar os pulsos quando a distorção aumenta demais.
- Pouca sensibilidade às interferências.
- Possibilidade de usar circuitos microeletrônicos, com conseguinte redução do preço, do peso e do desgaste do equipamento.
- Simplicidade e ausência de ajuste dos circuitos.

No caso do multiplex, as portas de um determinado canal são abertas simultaneamente do lado transmissão e do lado recepção. Porém, abrindo as portas de um canal de recepção em sincronismo com as de um canal de transmissão qualquer, estes dois canais vão ser interligados. Mudando o instante de abertura das portas, qualquer canal de recepção pode ser interligado com qualquer canal de emissão, de modo que este sistema constitui um comutador temporal.

Como o conversor analógico-digital é um equipamento bastante caro, não parece vantajoso usá-lo para cada linha de assinante. Por esta razão, os terminais de assinante são preferivelmente ligados a um concentrador. O número de canais que podem ser multiplexados por divisão de tempo sobre um par de fios de um cabo urbano é de 24 ou 30.

Para uma probabilidade de perda de 1%, as capacidades correspondentes são de 12 e 17 Erlangs, o que permite acomodar 100 a 150 assinantes residenciais. Os gastos com os conversores

são assim divididos por 4.

Se, como é geralmente o caso até hoje, os 24 canais são de novo transformados em sinais analógicos na chegada à central de comutação, a única vantagem (aliás não desprezível) é poder acomodar 100 ou 150 terminais de assinante sobre um par de fios.

Uma solução mais interessante consiste em armazenar os sinais digitais de todos os grupos de 24 canais em memórias, ler estas memórias em sequência a uma velocidade muito maior, e realizar a comutação temporal com os circuitos de saída, sem voltar ao sinal analógico. No lado recepção, as operações seriam inversas: armazenamento dos sinais a grande velocidade, leitura sucessiva pelos vários grupos de 24 ou 30 canais, transmissão por cabos aos concentradores, conversão digital - analógica, e transmissão aos assinantes.

Uma das vantagens fundamentais da comutação temporal é que as portas (que correspondem aos pontos de contato) podem ser realizadas por diodos de baixo custo.

Como futuramente será possível dispor de circuitos interurbanos de capacidade extremamente elevada (ondas milimétricas, "laser"), a comutação temporal aparece como o sistema do futuro.

1.2.4 - SINALIZAÇÃO

Qualquer que seja o processo de comutação usado, o estabelecimento correto de uma ligação telefônica necessita que cada uma das centrais interessadas receba do assinante chamador (em geral representado por A) ou de uma outra central todas as indicações necessárias à realização da conexão desejada e a sua ruptura.

As operações necessárias obedecem à seguinte sequência:

- O assinante chamador (A) anuncia à central de comutação o desejo de obter uma ligação.

- A central adverte que está pronta a receber uma chamada.

- O assinante indica o número desejado.

- A central verifica se todos os circuitos necessários, assim como o terminal do assinante chamado (em geral representado por B), estão livres.

- Se uma parte da ligação não está livre, a central adverte o chamador (A), e o processo é terminado (em alguns casos, o pedido fica em espera).

- Se a ligação até o assinante chamado (B) for conseguida, a central chama este último. O chamador (A) percebe esta chamada (retorno de chamada).

- Se o assinante chamado (B) não responde, o processo é terminado.

- Se o assinante chamado (B) responde, a ligação é estabelecida.

- No fim de conversação, um dos assinantes ligados, ou ambos, adverte (m) a central, a qual corta a ligação.

Essa troca de informações entre assinantes e centrais ou entre centrais é chamada de sinalização.

1.3 - SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

1.3.1 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

Simulação é uma das ferramentas de análise mais poderosas disponíveis àqueles responsáveis pelo projeto e operação de processos ou sistemas complexos. O conceito de simulação é simples e intuitivamente atraente. Possibilita ao usuário realizar experimentos com sistemas (reais ou propostos) onde seria impossível ou impraticável realizá-los. Os modelos de simulação estão fortemente baseados em Ciências da Computação, Matemática, Probabilidade e Estatística. Assim, torna-se indispensável ao analista de simulação um bom conhecimento nestas disciplinas. No entanto, um analista deve ter cuidado ao usar a simulação, pois, como todas as ferramentas poderosas que dependem muito de arte em sua aplicação, a simulação é capaz de dar resultados muito bons ou muito maus, dependendo de como é utilizada.

A simulação, como ferramenta de análise, tem-se desenvolvido muito nos últimos anos, e um dos fatores que mais tem contribuído para isso é o aperfeiçoamento dos computadores eletrônicos.

Uma definição atraente para simulação é aquela dada por Shannon [1]:

"Simulação é o processo de construir um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com esse modelo com o propósito de ou entender o comportamento do sistema ou de avaliar várias estratégias (dentro dos limites impostos por um critério ou conjunto de critérios) para a operação do sistema."

Consequentemente, o processo de simulação inclui ambos a construção do modelo e o uso analítico do modelo para estudar um problema. Por um modelo de um sistema real entende-se uma representação de um grupo de objetos ou idéias em alguma forma outra que não aquela da própria entidade, e aqui o tempo "real" é usado no sentido de "em existência ou capaz de se tornar em existência". Assim, sistemas que estão no estágio preliminar de planejamento podem ser modelados assim como aqueles já em existência.

Como se vê, simulação pode ou não envolver um modelo estocástico e experimentação de Monte Carlo, mas, neste presente trabalho, estuda-se algumas aplicações de simulação, e todas elas envolvem modelos estocásticos.

Muitas simulações úteis podem ser feitas somente com o auxílio de lápis e papel ou com a ajuda de uma calculadora eletrônica. Consequentemente, a modelagem em simulação é uma metodologia experimental e aplicada que visa a:

1. descrever o comportamento de sistemas;
2. construir teorias ou hipóteses considerando o comportamento observado;
3. usar estas teorias para prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos que serão produzidos pelas mudanças no sistema ou em seu método de operação.

1.3.2 - SISTEMAS E MODELOS DE SIMULAÇÃO

Uma definição apropriada para modelo é a dada por Shannon [1]:

"Um modelo é uma representação de um objeto, sistema, ou idéia em alguma forma outra que não aquela da própria entidade."

Nota-se então que um modelo de um objeto pode ser uma réplica exata desse objeto (embora executado em um material diferente e em uma escala diferente), ou pode ser uma abstração das propriedades salientes do objeto. Os modelos de simulação constituem apenas uma classe particular de modelos, embora muito importante.

Várias são as funções dos modelos, entre as quais se destacam:

1. um auxílio para o raciocínio;
2. um auxílio na comunicação;
3. propósitos de treinamento e instrução;
4. uma ferramenta de previsão;
5. um auxílio na experimentação.

É importante ressaltar que o termo "sistema" é usado em uma grande variedade de maneiras e significados; porém, para nós, sistema é conceituado como sendo um conjunto organizado de objetos estruturados de forma interativa ou interdependente. A fim de auxiliar a descrição de um sistema, é útil identificar nele:

- entidades: objetos de interesse no sistema;
- atributos: propriedades das entidades;
- atividades: processos desempenhados pelas entidades que causam mudanças no sistema;
- interações das entidades entre si e com o meio ambiente;
- estado do sistema: conjunto das entidades, atributos e atividades que existem em um dado instante de tempo.

As atividades que envolvem entidades do sistema são

chamadas endógenas; atividades que, provindas do meio ambiente, afetam o sistema, são chamadas exógenas. Um sistema para o qual as atividades exógenas podem ser desprezadas, é dito fechado; caso contrário, é dito aberto. Quando o resultado de uma atividade pode ser inteiramente descrito em termos de outras atividades que lhe afetam, tal atividade é dita determinística. Por outro lado, quando os efeitos de uma atividade variam aleatoriamente, a atividade é dita estocástica. A aleatoriedade de uma atividade pode ter origem endógena ou exógena.

A evolução de um sistema ao longo do tempo frequentemente pode ser descrita completamente através de um ente matemático chamado vetor que, neste caso, recebe o nome de vetor de estado. Assim, o estado de um sistema pode ser representado por uma função vetorial do tempo de forma $\vec{x} = \vec{x}(t)$. Se $\vec{x}(t)$ varia continuamente com o tempo, o sistema é dito contínuo. Se $\vec{x}(t)$ tem mudanças bruscas, em determinados instantes, o sistema é dito discreto.

Uma vez que o propósito dos estudos determina a natureza da informação, não existe um modelo único para cada sistema: diferentes modelos do mesmo sistema serão produzidos por diferentes analistas interessados em diferentes aspectos do sistema ou pelo mesmo analista à medida que sua compreensão do sistema vai aumentando.

Durante a modelagem, isto é, durante a fase de elaboração de um modelo, duas atividades interrelacionadas se alternam:

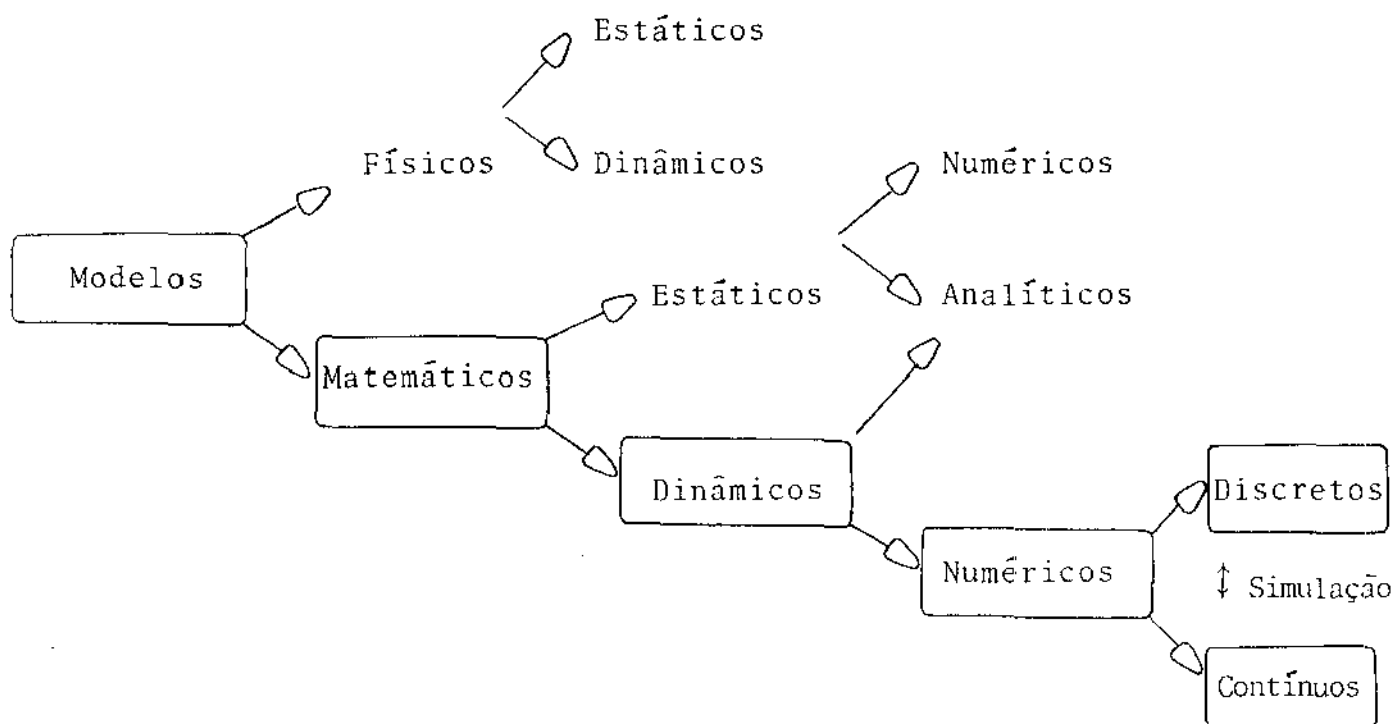
- estruturar o modelo, identificando suas entidades e interrelações;
- coletar dados sobre o sistema que se pretende modelar.

Podemos classificar os modelos em geral e modelos de simulação em particular em um grande número de maneiras. Infelizmente, nenhuma é completamente satisfatória, embora cada uma sirva a um propósito particular. Uma classificação pode ser:

- físicos e matemáticos;
- estáticos e dinâmicos;
- analíticos e numéricos;

- contínuos e discretos.

Esquemáticamente, teremos:



A técnica de simulação de sistemas em computadores é considerada como sendo uma técnica numérica usando modelos matemáticos dinâmicos; portanto, simulação de sistemas é um tipo de computação numérica. O computador é um excelente gerador de modelos dinâmicos de tal modo que:

- descrição do sistema: programa;
- linguagem: linguagem de programação (SIMULA, por exemplo);
- pessoa que analisa o sistema: programador;
- modelo dinâmico: execução do programa.

1.3.3 - CONCEITUAÇÃO DE SIMULAÇÃO

Simulação de sistemas pode ser definida como sendo a técnica de resolver problemas através do acompanhamento das mudanças ao longo do tempo de um modelo dinâmico do sistema.

Já que a técnica de simulação não pretende resolver

equações de um modelo analiticamente, um modelo matemático cons
truído para simulação é, usualmente, de natureza diferente dos
modelos usados para as técnicas analíticas. Assim, um modelo de
simulação deve ser construído como uma série de secções, sendo
que cada secção deve ser descrita matematicamente de maneira sim
ples e natural, sem se preocupar com a possível complexidade pe
lo fato de existirem muitas secções. Entretanto, as equações de
vem ser organizadas de maneira a permitir sua solução simultâ
nea.

Nos sistemas contínuos geralmente se usam equações di
ferenciais para descrever a interrelação das variáveis. Neste ca
so os computadores analógicos, em vez dos digitais, poderiam se
aplicar com muita propriedade. Entretanto, os computadores digi
tais podem também desempenhar as mesmas funções, dividindo - se
o tempo em pequenos intervalos para se poder integrar as equa
ções diferenciais com boa precisão.

Para os sistemas discretos, o interesse maior está no
evento, donde as equações devem estabelecer as condições lógicas
para que o evento possa ocorrer. A simulação, neste caso, consis
te em acompanhar as mudanças no estado do sistema, resultando nu
ma sucessão de eventos. Esta simulação é dita discreta. A simu
lação discreta pode adotar duas modalidades para o avanço do tem
po:

(a) simulação a intervalos regulares

Nessa modalidade, pequenos incrementos regulares
de tempo são provocados, verificando-se, a cada passo, se as
condições para execução dos eventos já foram satisfeitas.

(b) simulação evento a evento

Neste caso, decide-se sobre qual a sequência de
eventos a ser seguida e avança-se o tempo até o próximo evento
mais iminente.

De um modo geral, podemos dizer então que uma simula
ção é o exercício de um modelo de sistema com componentes que
são ativos em paralelo e também "sincronizados" por um dado con
ceito de "tempo de sistema". Linguagens de programação que têm
facilidades especiais para gerar tais modelos se denominam "lin

guagens de simulação", cujas qualidades básicas são:

- capacidade de descrição do sistema;
- capacidade de geração do modelo (compilador).

1.3.4 - ETAPAS DE UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO

As etapas normalmente seguidas para a realização de um estudo de simulação são:

1. Definição do Sistema - Determinação das fronteiras, restrições e medidas de eficiência a serem usadas ao se definir o sistema a ser estudado.
2. Formulação do Modelo - Redução ou abstração do sistema real a um diagrama de fluxo lógico.
3. Preparação dos Dados - Identificação dos dados necessários ao modelo, e sua redução a uma forma apropriada.
4. Tradução do Modelo - Descrição do modelo em uma linguagem aceitável pelo computador a ser utilizado.
5. Validação - Verificação a um certo nível de confiança aceitável que uma inferência tirada do modelo sobre o sistema real será correta.
6. Planejamento Estratégico - Projeto de um experimento que fornecerá a informação desejada.
7. Planejamento Tático - Determinação de como cada teste especificado no projeto experimental é para ser executado.
8. Experimentação - Execução da simulação para gerar os dados necessários para se fazer a análise.
9. Interpretação - Fazer inferências sobre os dados gerados pela simulação.
10. Implementação - Colocar o modelo e/ou os resultados em uso.
11. Documentação - Gravar as atividades de projeto e resultados assim como documentar o modelo e seu uso.

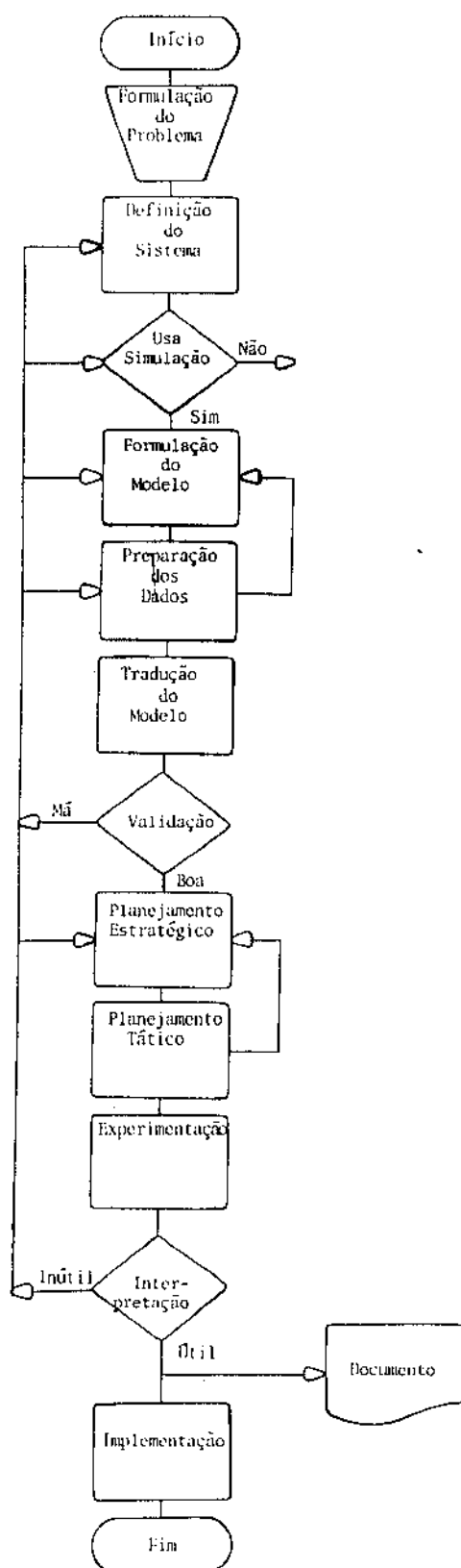


Fig. 1.1 - Etapas de um estudo de simulação

Os passos precedentes assumem que o problema pode ser melhor resolvido por simulação. No entanto, deve-se verificar se um modelo analítico simples é inadequado, antes de se considerar a possibilidade de uma simulação.

Algumas etapas são usadas interativamente. Às vezes um resultado insatisfatório em uma das fases obrigará a repetição de algumas fases anteriores. No entanto, nenhuma das fases deve ser omitida, sob o risco de se perder todo o trabalho realizado a partir da fase omitida. O fluxograma da Figura 1.1 ilustra a relação entre as fases.

1.3.5 - CAUTELAS NO USO DE SIMULAÇÃO

Simulação, como uma cirurgia, é uma técnica que tem mais "senões" que vantagens, devendo ser usada, portanto, com muita cautela, quando todas as outras técnicas alternativas se mostraram infrutíferas.

Alguns cuidados na hora de se optar pelo uso da simulação são:

- (a) a simulação não costuma fornecer uma ampla compreensão da natureza dos fenômenos que governam os sistemas que estão sendo simulados;
- (b) é muito difícil garantir que o modelo desenvolvido realmente representa o funcionamento do sistema;
- (c) o tipo de similaridade do modelo simulado e a realidade que se pretende simular não é da mesma natureza que, por exemplo, um túnel de vento ou uma escala reduzida de uma empresa. Nestes casos, a similaridade é garantida pelas mesmas leis físicas que regem o modelo e a realidade;
- (d) na simulação obtem-se apenas um amontoado de números e nunca relações algébricas, o que dificulta sua interpretação e a extrapolação de resultados;
- (e) os números resultantes da simulação devem ser encarados como dados experimentais a partir da amostagem com todos os problemas de determinação de

tamanho de amostra, condições iniciais e precisão do resultado;

- (f) os modelos de simulação costumam ser individualmente fáceis de conceituar, pois poucas abstrações, são, em geral, necessárias, razão pela qual a simulação pode ser, à primeira vista, a preferida sobre outros métodos de análise. Entretanto, o custo de projetar, programar, juntar dados e "rodar" um modelo de simulação são frequentemente muito maiores do que os antecipados. Em muitos casos, a simulação não seria selecionada, como técnica para análise, se estes custos fossem realisticamente avaliados "a priori";
- (g) a simulação, ao contrário da programação linear ou não linear, não é uma técnica voltada para a otimização de sistemas. Ela apenas permite reproduzir o funcionamento do sistema em condições selecionadas pelo analista, sem nenhuma indicação de qual seja o ponto ótimo de funcionamento do sistema.

Estudos de otimização via simulação exigem do analista experiente, a escolha de diferentes alternativas a serem testadas. Cabe ao analista a escolha da "melhor" alternativa entre aquelas testadas e, ainda, decidir se outras alternativas devem também ser testadas e quais.

CAPÍTULO 2

NOÇÕES BÁSICAS DE TEORIA DO
TRÁFEGO TELEFÔNICO

2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Quando se consideram automóveis circulando por uma rua e esperando diante de um semáforo, ou aviões esperando para aterrizar em uma pista de um aeroporto, se fala em tráfego urbano ou em tráfego aéreo. Do mesmo modo, se se consideram as chamadas telefônicas ocupando determinados órgãos de uma central e esperando pela liberação de outros, se fala em tráfego telefônico.

A teoria do tráfego é aplicável a qualquer fenômeno que implique um transporte e onde se possam distinguir: os "clientes", que apresentam certas necessidades (automóveis, aviões, chamadas telefônicas, etc) e os "servidores" que são capazes de atender a essas necessidades (ruas ou avenidas, pistas de aterrizagem, circuitos telefônicos, etc).

Ao se observar a circulação de veículos nas ruas, pode-se dizer, sem dúvida, que há pouco ou muito tráfego. Mas se se pretende comparar o tráfego de umas com outras é preciso ter matizado antes certos conceitos. Este é o primeiro problema a resolver: dar um critério de medida à idéia intuitiva do tráfego. Também se falará dos aborrecimentos, assim como das esperas e busca de ruas alternativas que acontecem em períodos de intenso movimento, mas não se poderá relacionar quantitativamente com o tráfego. A teoria do tráfego resolve este problema, estabelecendo uma correspondência entre o tráfego e os efeitos que produz no sistema encarregado de tratá-lo.

Muitos automobilistas opinam sobre a ordenação do tráfego, tendo em vista as necessidades, mas não dispõem de medidas objetivas nem de critérios para fixar uma solução ótima. Este é o objetivo último da teoria do tráfego: conhecendo as necessidades do tráfego e fixando alguns critérios de qualidade de serviço a prestar, determinar o sistema mais apropriado para tratá-lo.

Sendo a teoria do tráfego, como já foi dito, uma teoria geral, neste documento estará matizada por sua aplicação ao tráfego telefônico.

Neste capítulo se precisarão certos conceitos intuitivos; que junto a outras definições mais elaboradas, permitirão dar um tratamento matemático aos processos dedicados a cursar as cha

madras telefônicas.

2.1.1 - CONCEITOS PRIMÁRIOS

Órgão: é o aparato ou conjunto de aparatos que realizam uma determinada função. Exemplos: registrador, seletor, emissor , etc [37].

Ocupação: é o estado em que se encontra um órgão quando é utilizado, independentemente da causa de sua utilização. O evento correspondente ao começo da utilização se chamada tomada e o correspondente ao seu final, liberação [37].

Fonte: é todo elemento capaz de produzir uma ocupação . Exemplos: assinante, enlace, etc [37].

Chamada: não se define aqui por considerá-lo um conceito intuitivo. Basta dizer que uma chamada dá lugar a uma série de ocupações que se produzem de modo direto ou indireto por um assinante ou enlace. Estas ocupações se referem a cada um dos órgãos necessários para escoar (cursar) uma chamada, dependendo do tipo de central e de chamada. A grosso modo, poder-se-ia dizer que uma chamada é uma situação permitindo uma conversação [37,39].

Tentativa de chamada: é a demanda do estabelecimento de uma chamada. Esta pode ser satisfeita ou não [37].

Tempo de ocupação: é a duração total de uma ocupação [37].

2.1.2 - INTENSIDADE DO TRÁFEGO ESCOADO POR UM CONJUNTO DE ÓRGÃOS

Se define como intensidade do tráfego escoado instantâneo, em um conjunto homogêneo de órgãos, ao número n de elos que estão ocupados nesse instante.

A intensidade de tráfego, ou abreviadamente o tráfego, é uma função aleatória $n(t)$ do tempo. Seu valor médio, a' , em um intervalo de tempo $(0,T)$ é dado pela expressão:

$$a' = \frac{1}{T} \int_0^T n(t) dt \quad [37] ,$$

que mede a intensidade média do tráfego telefônico do conjunto de órgãos considerado no intervalo $(0,T)$, o que permite definir a intensidade média do tráfego pelo número médio de órgãos ocupados em um instante.

$\int_0^T n(t) dt$ representa a soma dos tempos de ocupação de todos os órgãos do conjunto considerado durante o intervalo de tempo $(0,T)$. Assim, se temos N órgãos:

$$\int_0^T n(t) dt = \sum_{i=1}^N \Delta t_i ,$$

sendo Δt_i o tempo de ocupação do órgão i . A esta quantidade se chama de volume de tráfego escoado, que dá uma boa medida da idéia intuitiva de quantidade de informação escoada, mas diz pouco do rendimento ou utilização do conjunto de órgãos, já que não precisa em quanto tempo foi escoada. Temos então que:

$$a' = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_i}{T} \quad [37] ,$$

que permite definir a intensidade média do tráfego escoado como a relação entre o volume de tráfego escoado durante o período $(0,T)$ e a duração T deste.

A intensidade de tráfego assim definida, por ser o quociente de tempos, é uma magnitude sem dimensões.

Se λ' é o número de chamadas escoadas por unidade de tempo e h é o tempo médio de ocupação por chamada escoada por um conjunto de N órgãos, o tráfego escoado será:

$$a' = \frac{h \cdot \lambda' \cdot T}{T} = h \cdot \lambda' \quad [37] .$$

2.1.3 - DEFINIÇÃO DE ERLANG COMO UNIDADE DE INTENSIDADE DE TRÁFEGO

Em um conjunto homogêneo de órgãos, agrupados para a exe

cução de uma mesma função, se diz que no intervalo $(0,T)$ se escoa uma intensidade média de a' Erlangs (ERL) quando nesse intervalo de tempo estão ocupados, em média, a' de seus órgãos. Assim, a intensidade de tráfego escoado será a' Erlangs se:

$$a' = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_i}{T} \quad [37] .$$

No caso de um único órgão:

$$T = t_{\text{ocupado}} + t_{\text{livre}}$$

e a intensidade de tráfego que pode escoar será sempre menor ou igual a 1, pois:

$$a' = \frac{t_{\text{ocupado}}}{t_{\text{ocupado}} + t_{\text{livre}}} \leq 1 \text{ ERL}$$

No caso de N órgãos, a intensidade de tráfego escoado será, por conseguinte:

$$a' = \frac{N \bar{t}_{\text{oc}}}{\bar{t}_{\text{oc}} + \bar{t}_{\text{liv}}} \leq N \text{ ERL} ,$$

sendo $\bar{t}_{\text{oc}}$ o tempo médio de ocupação por órgão, calculado como:

$$\bar{t}_{\text{oc}} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{\text{oc}})_i}{N} ,$$

e $\bar{t}_{\text{liv}}$ o tempo médio que cada órgão está livre, calculado como:

$$\bar{t}_{\text{liv}} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{\text{liv}})_i}{N}$$

2.1.4 - INTERPRETAÇÕES DA INTENSIDADE DE TRÁFEGO

Da mesma definição foi visto que o número que expressa a intensidade de tráfego escoado em ERL representa o número médio de órgãos ocupados em um dado instante.

Se $\underline{c}$ é o número de chamadas escoadas no período T e $\underline{h}$ é o tempo médio de ocupação por chamada, o tráfego escoado será:

$$a' = \frac{c \cdot h}{T} = \lambda' \cdot h \quad [37] \quad ,$$

sendo $\lambda' = c/T$ o número médio de chamadas escoadas por unidade de tempo.

Por conseguinte a' representa o número médio de chamadas escoadas durante a duração média de uma chamada escoada.

2.1.5 - INTENSIDADE DE TRÁFEGO OFERECIDO

Quando um assinante faz uma tentativa de chamada pode ocorrer que sua demanda não possa ser satisfeita por encontrar-se o assinante chamado ocupado, ou este não responder, ou estarem ocupados os órgãos de comutação por outras chamadas em curso. Neste caso se enviará ao assinante chamador um determinado tom para informá-lo da situação, mas não se chega a ocupar todos os órgãos de comutação.

Assim, se aprecia uma clara diferença entre as chamadas escoadas e as chamadas oferecidas. O número médio de tentativas por unidade de tempo, λ , é uma característica da comunidade de assinantes e depende exclusivamente destes. A diferença entre o número de chamadas oferecidas e o número de chamadas escoadas depende do número de órgãos postos à disposição dos assinantes. Com o fim de dispor de um meio de avaliação deste tráfego em potencial se define a intensidade média de tráfego oferecido como o número médio de tentativas de chamadas (escoadas ou não) que se produzem durante o tempo médio de ocupação de uma chamada escoada. Chamando de h este tempo médio de ocupação, medido na mesma unidade de tempo que λ , o tráfego oferecido em ERL será:

$$a = \lambda \cdot h \quad ,$$

isto é, coincide com o valor que expressaria o tráfego escoado em ERL se não se perdesse nenhuma chamada [37].

Se se considera λdt (λ constante) como a probabilidade de que se apresente uma chamada em um intervalo de tempo de duração dt e sendo h a duração média de uma chamada escoada, o número médio de chamadas que se apresentam em um intervalo de tempo de duração h será:

$$\int_0^h dt = \lambda \cdot h ,$$

que é, por definição, igual ao tráfego oferecido

$$a = \lambda \cdot h$$

e assim

$$\lambda = \frac{a}{h}$$

Se se tomar como unidade de tempo o tempo médio de ocupação, se tem $h=1$, e resulta:

$$\lambda = a ,$$

e a probabilidade de aparição de uma chamada em um intervalo de tempo de duração dt será agora:

$$adt \quad [37] .$$

2.1.6 - HORA DE MAIOR MOVIMENTO

Até agora se tem falado da intensidade de tráfego médio associado a um intervalo de tempo $(0,T)$. É chegado o momento de precisar a amplitude deste intervalo e os critérios para sua escolha, quando se pretende caracterizar com esta magnitude uma comunidade de assinantes sob este ponto de vista de tráfego.

Pensando em uma comunidade de assinantes, a aparição das chamadas não é regular no tempo. Assim posto, a intensidade de tráfego instantâneo oferecido será uma variável aleatória.

Caracterizar esta magnitude por sua média em um período extremamente largo como um mês ou um ano, seria muito pouco representativo pela quantidade de circunstâncias pelas quais pode passar essa comunidade: período de férias, festividades, etc. Em períodos de tempo muito curtos como uma semana ou um dia, se apresentam também circunstâncias que modificam profundamente o comportamento da comunidade: domingos, horas de descanso, etc. Tampouco seria representativa uma média de tais períodos.

Há que pensar pois, em períodos de observação mais curtos que proporcionem constância nos parâmetros da comunidade de assinantes e permitam a construção de um modelo estatístico para seu estudo. Uma recomendação do CCITT fixa este período em uma hora [38].

O conceito de "hora de maior movimento", abreviado como h.m.m., surge no momento em que esta caracterização da comunidade está orientada para um dimensionamento; em tal caso interessa situar-se nas piores condições (maior volume de tráfego).

Assim, de acordo com a definição estabelecida pelo CCITT, se entende por "hora de maior movimento", o período de 60 minutos consecutivos de maior volume de tráfego [38].

Surge agora um problema: como determinar o período que define a h.m.m. e que intensidade de tráfego atribuir-lhe?

Se se tomasse o período de 60 minutos consecutivos mais carregado de todo um ano, se tenderia a uma má caracterização da comunidade, pois nesse período de tempo pode ter havido circunstâncias estatísticas muito desfavoráveis, mas com uma frequência tão pequena que seria anti-econômico um dimensionamento por ela.

Fazendo uma observação diária, o período que define a hora de maior movimento e o volume de tráfego durante esta pode variar de um dia para outro. É pois mais prático obter a h.m.m. e seu tráfego como média de uma determinada amostra diária.

Assim, se define a "hora de maior movimento média" como o período de 60 minutos consecutivos no qual o volume de

tráfego total de uma amostra é o mais elevado.

Com o objetivo de contar com um método uniforme de a nálise dos dados numéricos, recomenda-se a adoção do seguinte método, fazendo as observações por períodos de um quarto de hora:

"se totalizam os valores dos volumes de tráfego obtidos durante o mesmo quarto de hora, de um certo número de dias consecutivos. A hora de maior movimento média se define então como o conjunto dos quatro quartos de hora consecutivos no qual o valor assim calculado é máximo [38]."

A intensidade de tráfego característica se obterá como média das intensidades de tráfego, no dito período, de cada um dos dias de amostra.

2.2 - REDES E CENTRAIS TELEFÔNICAS. CONCEITOS RELATIVOS A SEU DIMENSIONAMENTO

2.2.1 - ALGUMAS DEFINIÇÕES RELATIVAS A REDES E CENTRAIS TE LEFÔNICAS

O tratamento que recebem as chamadas dependem das características do sistema a que se oferecem. Porisso convém aqui estabelecer algumas definições relativas a tais sistemas.

Canal: um meio de comunicação unidirecional [39].

Par de canais complementares: dois canais, um em cada direção, que provê uma comunicação bidirecional [39].

Gomunicação: transferência de informações de acordo com convenções estabelecidas [39].

Conversação: troca de informações entre uma parte chamadora e uma parte chamada [39].

Seletor: um arranjo físico de pontos de cruzamento [39].

Ponto de cruzamento: um conjunto de contatos físicos ou lógicos que operam juntos para propiciar o escoamento de sii

nais e da voz nos canais em uma rede de comutação [39].

Rede de comutação: um arranjo de seletores cuja função é conectar entradas e saídas [39].

Circuito: um par de canais complementares entre dois pontos de referência [39].

Grupo de circuitos: um grupo de circuitos entre dois pontos de referência, que é tomado na engenharia de tráfego como uma unidade [39].

Rota: um grupo de circuitos particular ou grupos de circuitos interconectados entre dois pontos de referência usados para estabelecer um caminho para uma chamada [39].

Tronco: circuito de interligação entre duas centrais [39].

Congestionamento interno: condição chamada também de bloqueio interno, na qual não se pode realizar uma conexão entre uma entrada determinada de um sistema e qualquer saída convenientemente livre, devido à falta de caminhos entre os ditos pontos no sistema. Qualquer função que permita relacionar o grau de congestionamento no sistema com a intensidade de tráfego constituirá uma função de congestionamento [37].

Sistemas de perda: são aqueles sistemas de comutação em que as tentativas de chamada se frustam se não existe caminho livre para estabelecer imediatamente uma conexão desejada. Nestes sistemas se chama tráfego perdido à porção do tráfego oferecido que não se pode escoar devido ao congestionamento. Devido à existência de tal congestionamento convém definir o conceito de probabilidade de perda como a probabilidade de que uma tentativa de chamada que se produza seja perdida [37].

Sistemas de espera: sistemas de comutação em que às tentativas de chamada que se produzem quando não há caminhos para seu estabelecimento, se lhes concede a possibilidade de esperar até que se produza a liberação de um de seus caminhos. A probabilidade de espera é a probabilidade de que uma tentativa de chamada que se produza não possa ser completada imediatamente [37].

Espera média das chamadas que esperam: é a razão en

tre o tempo total de espera de todas as chamadas que esperam e o número destas [37].

Tempo médio de espera ou espera média: é a razão entre o tempo total de espera de todas as chamadas que tenham sofrido atraso e o número total de chamadas observadas (que esperaram ou não). Este tempo pode expressar-se também como o produto da espera média das chamadas que sofrem atraso pela probabilidade de espera [37].

Dois parâmetros de grande significado são utilizados para se avaliar o congestionamento de um sistema. São eles:

- a) Congestionamento em tempo, se mede pela razão entre o tempo durante o qual se produz a condição de congestionamento e o tempo total de observação do sistema, o que significa uma estimativa da probabilidade de que um observador exterior ao próprio sistema o encontre em estado de congestionamento [39].
- b) Congestionamento de chamadas, se expressa pela razão entre o número de tentativas de chamada que não são estabelecidas imediatamente e o número total de chamadas oferecidas ao sistema; esta razão de congestionamento é uma estimativa da probabilidade de perda de chamada em um sistema de perdas. Também é uma estimativa da probabilidade de espera em um sistema de espera [39].

Grau de serviço: uma série de parâmetros usados em engenharia de tráfego para prover uma medida de um plano adequado sob condições especificadas; pode ser expresso como a probabilidade de perda, probabilidade de espera, etc...[39].

2.2.2 - ALGUMAS DEFINIÇÕES UTILIZADAS EM ENGENHARIA DE TRÁFEGO EM CENTRAIS TELEFÔNICAS

Por sua utilidade em trabalhos de engenharia de tráfego, os seguintes conceitos são definidos.

Carga por órgão, chamada também de ocupação média, é a razão entre o tráfego escoado por um grupo de órgãos e o número destes [39].

Considerando uma rede de centrais telefônicas, ou ape

nas uma central, os tipos de tráfego, de acordo com sua procedência e destino são:

Tráfego originado, é o produzido pelas fontes de tráfego alocadas à rede considerada, sem ter em conta qual seja seu destino [39].

Tráfego terminado, é o que se destina à rede ou à central em consideração sem levar em conta sua procedência [39].

Tráfego interno, é o que se origina e termina na rede em consideração. A este tráfego se denomina algumas vezes de tráfego local [39].

Tráfego de saída, é o tráfego que passa através de uma rede considerada, seja ou não originado nela, com destino a outras redes [39].

Tráfego de entrada, é o que entra pela rede considerada, procedente de outras redes, seja qual for seu destino [39].

Tráfego de trânsito, é o que passa através da rede ou da central em particular que se considere, e não se origina nem termina nela [39].

2.3 - MODELOS MATEMÁTICOS DE TRÁFEGO

O sistema telefônico que estamos interessados em estudar consiste basicamente de um conjunto de fontes que geram requisições e um conjunto de órgãos encarregados de atendê-las. Para esse sistema, vamos construir um modelo probabilístico que é caracterizado essencialmente por:

a) Lei de ocorrência de demanda por serviço: caracterização do processo de aparição das chamadas.

b) Lei de duração do serviço: caracterização do tempo de retenção das chamadas.

c) Tratamento que o sistema dá às chamadas que não encontram livres imediatamente os recursos necessários para o seu encaminhamento.

2.3.1 - MODELOS DE ERLANG

Estudaremos dois modelos importantes em que ambos as sumem a mesma lei de ocorrência de demanda (processo de Poisson) e a mesma lei de duração de serviço (distribuição exponencial negativa), diferindo, porém, no tratamento dado às demandas bloqueadas: em um dos casos elas definitivamente não são aten didas e no outro elas aguardam por tratamento em fila.

2.3.1.1 - Lei de Ocorrência de Demanda: Processo de Poisson

Na teoria do congestionamento é de particular inte resse o processo de chegada aleatória de chamadas que é carac terizado por:

a) Em sub-intervalos de tempo suficientemente peque nos, somente uma chegada pode ocorrer. Em outras palavras, che gadas múltiplas não ocorrem simultaneamente.

b) A ocorrência de uma chamada em um dado sub - inter valo é independente do que tenha ocorrido em outros sub - inter valos. Em outras palavras, as chegadas são completamente alea tórias, com nenhuma dependência de uma chegada com outra.

c) Em um intervalo de tempo suficientemente pequeno, a probabilidade de uma chegada é diretamente proporcional ao comprimento do intervalo. Matematicamente, para um sub-interva lo de comprimento dt , a probabilidade de uma chegada será:

$$\lambda dt + o(dt) , \text{ onde } \lambda > 0 \text{ e } \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{o(dt)}{dt} = 0$$

Nessas condições, sendo $N(t)$ o número de chegadas no intervalo de tempo $(0,t)$ então

$$P[N(t)=j] = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^j}{j!} , \quad j=0,1,2,\dots$$

Essa é a lei de distribuição de Poisson. Temos que λ ,

constante positiva, é igual à taxa média de chegada de chamadas pois $E[N(t)] = \lambda t$. Se t é medido em segundos, então λ é expresso em chamadas por segundo. Portanto, λ tem o significado de número médio de requisições na unidade de tempo (taxa de chamadas) [11,34,37,40].

É interessante notar que a probabilidade de não ocorrer nenhuma chamada ($j=0$) em um período de tempo t é dada por $e^{-\lambda t}$. Então, $e^{-\lambda t}$ é a probabilidade de se esperar mais que t para a chegada de uma chamada. Consequentemente, a probabilidade de se esperar menos que t para a chegada de uma chamada é $1 - e^{-\lambda t}$, que corresponde exatamente à função distribuição exponencial negativa de uma variável aleatória. Em outras palavras, os intervalos de tempo para um processo aleatório de chegadas de chamadas é caracterizado pela lei de distribuição de probabilidade exponencial negativa. Podemos notar, então, que o intervalo de tempo médio entre chamadas é igual a $1/\lambda$.

2.3.1.2 - Lei de Duração de Serviço: Distribuição Exponencial Negativa

Chamadas oferecidas a uma rede de comunicação são de duração variável, requerendo tempos de serviço também variados. Esses tempos de serviço são comumente chamados de tempos de retenção. É conveniente considerar o tempo de retenção de uma chamada como sendo uma variável aleatória não negativa. Consideremos o caso onde os tempos de retenção das chamadas são caracterizadas por:

- a) A probabilidade de término em um intervalo de tempo suficientemente pequeno é diretamente proporcional ao comprimento do intervalo. Para um intervalo infinitesimal de tamanho dt , esta probabilidade é μdt , onde μ é uma constante positiva.
- b) A probabilidade de término de qualquer intervalo é independente do intervalo considerado.

A segunda hipótese confere um caracter aleatório ao tempo de retenção. Sob esta hipótese, a probabilidade de término é independente de quanto tempo a chamada esteja durando. Com

estas hipóteses, a probabilidade de não terminar no intervalo de tempo t é dada por

$$P[T > t] = e^{-\mu t},$$

onde T é o tempo de retenção. Assim, a função distribuição de probabilidade de T é:

$$F_T(t) = 1 - e^{-\mu t},$$

e a função densidade de probabilidade é

$$f_T(t) = \mu e^{-\mu t},$$

que é a função densidade de probabilidade exponencial negativa.

$$E(T) = \frac{1}{\mu},$$

e assim, para chamadas com tempo médio de retenção t_m ,

$$\mu = \frac{1}{t_m}.$$

Análises de tráfego em redes telefônicas têm revelado uma grande correspondência entre a distribuição exponencial negativa e os tempos de retenção de chamada observados. Por esta razão, a maior parte da engenharia de tráfego telefônico é baseada na suposição de que os tempos de retenção obedecem a uma distribuição exponencial negativa [11,34,37,40].

2.3.1.3 - O Modelo de Erlang para Sistema com Perda

Consideremos os seguintes fatos:

a) O sistema de perda é constituído de S órgãos de atendimento, isto é, uma requisição é atendida se houver órgão livre e se não houver é perdida. Temos então os estados $E_0, E_1, E_2, \dots, E_S$ e probabilidades $P(0), P(1), \dots, P(S)$, onde E_j é o estado correspondente a j órgãos ocupados e P_j é a probabilidade do sistema estar no estado E_j .

b) A ocorrência de requisições é caracterizada por um processo de Poisson, isto é:

$$P[N(t)=j] = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^j}{j!} , j=0,1,2,\dots$$

c) Os tempos de atendimento têm distribuição exponencial negativa com média $t_m=1/\mu$, independentemente uns dos outros e do processo de chegadas.

d) O sistema está em regime estacionário, isto é, a probabilidade de transição do estado E_j para E_{j+1} é igual à probabilidade de transição de E_{j+1} para E_j .

Estamos particularmente interessados em saber qual a probabilidade de uma requisição que chega ao sistema não ser atendida por falta de órgãos disponíveis. Pode ser mostrado que a probabilidade do sistema estar no Estado E_S , estado onde as requisições são perdidas, é:

$$P(S) = \frac{\frac{a^S}{S!}}{\sum_{K=0}^S \frac{a^K}{K!}} = B(S,a) ,$$

que é a fórmula de perda de Erlang conhecida como fórmula de Erlang B ou também como 1ª fórmula de Erlang, $E_{1,S}(a)$, onde $a=\lambda/\mu$ é o tráfego oferecido [34,40].

É importante sublinhar que a fórmula acima fornece tanto a fração de tempo que S canais estão ocupados, quanto a porcentagem de requisições que, ao chegarem ao sistema, encontram S órgãos ocupados, e assim são perdidas.

Outra grandeza importante, é o tráfego escoado a' , que é definido como o número médio de canais ocupados. Assim, pode ser mostrado que:

$$a' = a[1-B(S,a)] \quad [34,40].$$

Define-se, também, o tráfego perdido como sendo a diferença entre o tráfego oferecido e o tráfego escoado. Assim:

$$\text{tráfego perdido} = aB(S,a) \quad [34,40].$$

A taxa de utilização ou eficiência (η) é a razão entre o tráfego escoado e o número de órgãos. Assim:

$$\eta = \frac{a'}{S},$$

e é claro que $\eta \leq 1$ [34,40].

2.3.1.4 - O Modelo de Erlang para Sistema com Espera

O sistema possui as seguintes características:

a) Sistema de espera com S órgãos de atendimento em que as requisições que, ao chegarem, encontrarem todos os órgãos ocupados, esperam em uma fila sem prioridades, até que um órgão seja liberado, para então entrar em serviço.

b) A ocorrência de requisição é um processo de Poisson de média λ .

c) Os tempos de atendimento têm distribuição exponencial negativa de média $1/\mu$, independentemente uns dos outros e do processo de chegadas.

d) O sistema se encontra em regime estacionário.

Pode ser mostrado que

$$C(S,a) = \frac{\frac{a^S}{(S-1)!(S-a)}}{\sum_{K=0}^{S-1} \frac{a^K}{K!} + \frac{a^S}{(S-1)!(S-a)}}$$

que é a fórmula de Erlang C (também denominada 2ª fórmula de Erlang e denotada por $E_{2,S}(a)$) e que dá a probabilidade de que todos os órgãos estejam ocupados ou a probabilidade de ir para a fila [34,40].

Para este sistema temos que o tráfego escoado é igual ao tráfego oferecido, isto é, $a' = a$, e devemos ter que $a < S$.

São características importantes do modelo de Erlang com espera:

- a) Tempo de espera: valor esperado do tempo de espera de todas as requisições que estavam no sistema, dado por:

$$\frac{C(S,a)}{(1-\rho)S},$$

onde $\rho = a/S$ é o grau de utilização [34,40].

- b) A distribuição do tempo de espera (E) com disciplina de atendimento FIFO é:

$$P[E > t/E > 0] = e^{-(1-\rho)S\mu t} \quad [34,40].$$

2.3.2 - OUTROS MODELOS DE TRÁFEGO

Existe ainda uma série de outros modelos matemáticos de tráfego adequados a cada caso particular. Apresentaremos, a título de exemplo, dois modelos de tráfego aplicados a casos de grande importância prática.

2.3.2.1 - Modelo de Engset com Perda

Quando o número de fontes de requisição é relativamente pequeno não é mais correto considerar a demanda oferecida como totalmente aleatória (isto é, a lei de ocorrência de demanda não é mais "poissoniana"). Isto porque uma fonte que estiver sendo atendida não origina chamadas e, assim, a taxa de ocorrência de chamadas diminui conforme aumenta o número de requisições em atendimento.

Consideremos o caso de N fontes de tráfego servidas por S órgãos. O modelo de Engset se baseia nas seguintes hipóteses:

a) Lei de ocorrência de requisições: demandas aleatórias com taxa média igual a $(N-n)\lambda$, onde n é o número de fontes em atendimento e λ é uma constante positiva, isto é, as chamadas são geradas a uma taxa proporcional ao número de fontes livres.

b) Lei de duração de serviço: exponencial negativa com média igual a $1/\mu$.

c) As chamadas bloqueadas são perdidas.

Pode-se mostrar que a probabilidade de se ter os S órgãos ocupados é

$$E(N, S, \hat{a}) = \frac{\binom{N}{S} \hat{a}^S}{\sum_{j=0}^S \binom{N}{j} \hat{a}^j}$$

onde $\hat{a} = \lambda/\mu$, [11,40], e a probabilidade de que uma chamada seja perdida é

$$\pi = E(N-1, S, \hat{a}) = \frac{\binom{N-1}{S} \hat{a}^S}{\sum_{j=0}^S \binom{N-1}{j} \hat{a}^j} \quad [11,40].$$

E também:

$$\text{tráfego oferecido} = \frac{N\hat{a}}{1+\hat{a}(1-\pi)} \quad [11,40]$$

$$\text{e tráfego cursado} = \frac{N\hat{a}(1-\pi)}{1+\hat{a}(1-\pi)} \quad [11,40].$$

2.3.2.2 - Modelos de Tráfego com Duração de Serviço Constante

As hipóteses básicas que caracterizam esses modelos são:

a) Lei da ocorrência de chamadas: distribuição de Poisson.

b) A duração de serviço é constante e igual a τ .

Quanto ao tratamento dado às chamadas bloqueadas, temos:

c.1) Sistema de perda: neste caso o modelo se reduz ao de Erlang com perda, em que $\mu = 1/\tau$ [11,40].

c.2) Sistema de espera: resulta em um modelo bastante complexo e foi resolvido por Crommelin, que obteve os seguintes resultados aproximados [11, 40]:

- probabilidade de haver espera = $C(S,a)$, onde
 $a = \lambda\tau$

- tempo médio de espera =

$$= \frac{C(S,a)}{(1-\rho)\frac{S}{\tau}} \cdot \frac{S}{S+1} \cdot \frac{1-\rho^{S+1}}{1-\rho^S} \cdot \frac{1}{1+\rho}.$$

CAPÍTULO 3

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE DESEMPENHOS DE
REDES DE COMUTAÇÃO DE CENTRAIS TELEFÔNICAS

3.1 - INTRODUÇÃO

Na fase de projeto de uma central telefônica tempo_{ral} controlada a programas armazenados, foi proposta uma rede de comutação de canais, que é mostrada esquematicamente na Fig. 3.1.

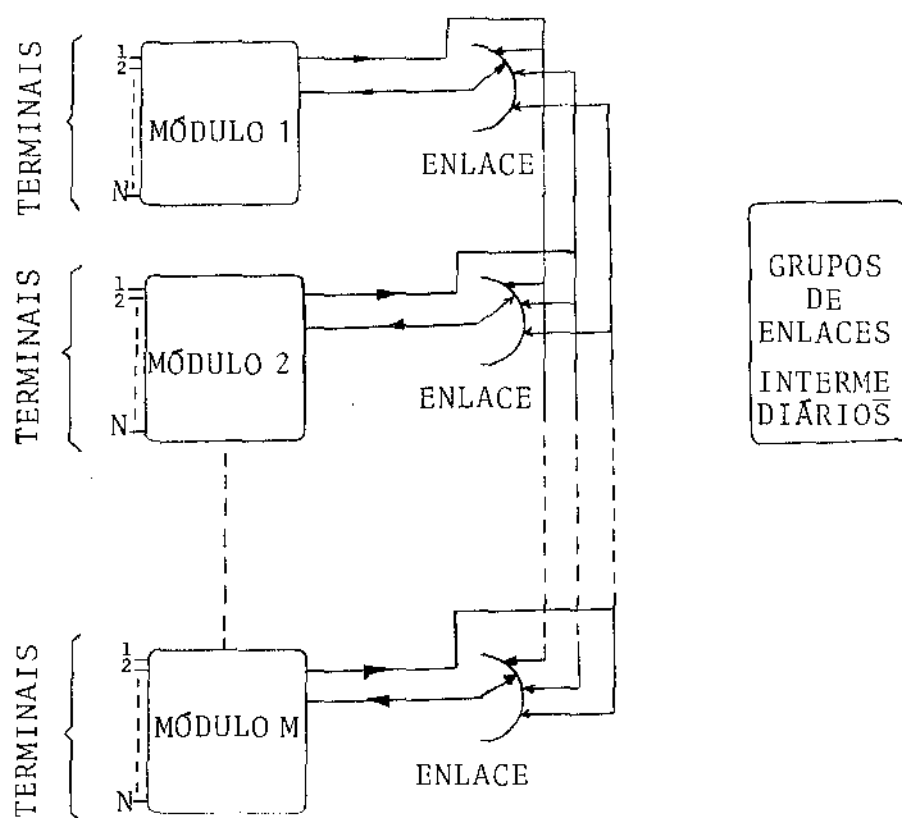


Fig. 3.1 - Diagrama Simplificado da Rede de Comutação da Central

Essa rede é constituída de um determinado número M de módulos (numerados de 1 a M) onde são ligados os terminais, em número de N_t por módulo. A cada módulo está associado um determinado número C de canais de comunicação, numerados de 1 até C . Esse grupo de C canais é denominado enlace do módulo. Existe também um determinado número G de grupos de enlaces intermediários (cada grupo com C canais numerados), que são utilizados na conexão entre terminais de módulos distintos. Foram propostas duas estruturas distintas de comutação, que utilizam os gru

pos de enlaces intermediários, e que serão descritas a seguir.

3.2 - DESCRIÇÃO DAS ESTRUTURAS DE COMUTAÇÃO

3.2.1 - DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA 1 DE COMUTAÇÃO

A primeira estrutura, que chamaremos de estrutura 1 de comutação, tem dois casos a considerar:

a) 1º caso: o terminal chamador (A) e o terminal chamado (B) são ligados em um mesmo módulo. Veja a Fig. 3.2 (o módulo de origem e o módulo de destino são os mesmos).

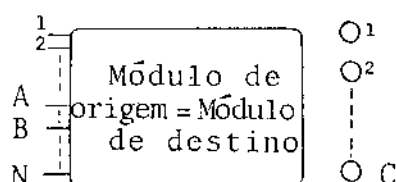


Fig. 3.2 - A e B pertencem a um mesmo módulo

Neste caso, para se estabelecer a conexão entre os terminais de A e de B, é necessário se encontrar dois canais quaisquer livres no enlace do módulo. Caso sejam encontrados, esses dois canais são ocupados durante todo o tempo de conversação de A e B. Se não foi encontrado nenhum canal livre ou se for encontrado somente um canal livre, está caracterizada uma perda de chamada.

b) 2º caso: o terminal chamador (A) está ligado a um módulo (módulo de origem) diferente do módulo (módulo do destino) onde está ligado o terminal chamado (B). Neste caso têm de ser utilizados os grupos de enlaces intermediários. Veja a Fig. 3.3, mostrada na página seguinte.

Neste caso, para se estabelecer uma conexão entre os terminais de A e de B, é necessário se encontrar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do enlace do módulo de origem e outro de um dos grupos de enlaces intermediários.

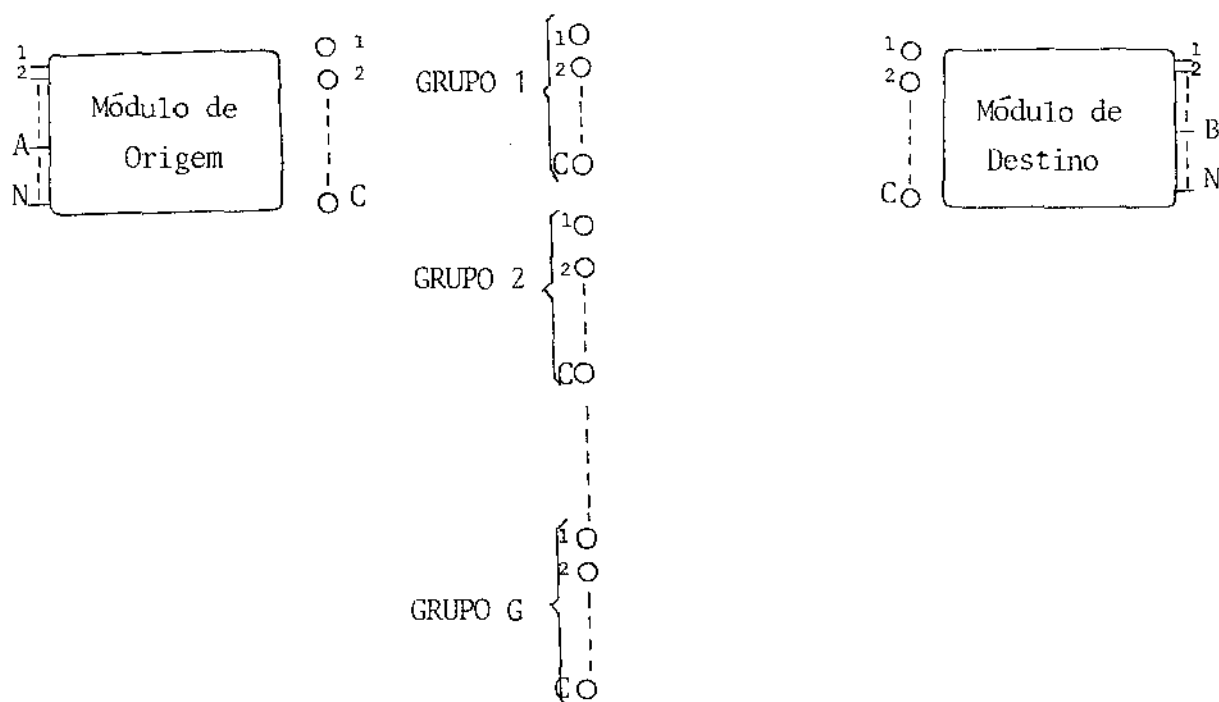


Fig. 3.3 - A e B pertencem a módulos distintos

Se tal par de canais não for encontrado, está caracterizada uma perda por congestionamento. Se, por outro lado, este par for encontrado, então toma-se os dois canais (um canal do enlace do módulo de origem e outro do grupo de enlaces em questão) e se busca um canal livre qualquer no enlace do módulo de destino. Se não houver esse tal canal, os dois canais são liberados e está caracterizada uma perda de chamada. Se o canal de enlace do módulo de destino for encontrado, ele é tomado e os três canais são retidos durante todo o tempo de conversação de A e B (um canal do enlace do módulo de origem, um canal do grupo de enlaces intermediários e um canal do enlace do módulo de destino).

3.2.2 - DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA 2 DE COMUTAÇÃO

Com relação à segunda estrutura, que chamaremos de estrutura 2 de comutação, temos também dois casos a considerar:

a) 1º caso: o terminal chamador (A) e o terminal chamado (B) são ligados a um mesmo módulo (veja a Fig. 3.2). Neste caso, para se estabelecer a conexão entre os terminais de A e B,

também é necessário se encontrar dois canais quaisquer livres no enlace do módulo. Caso sejam encontrados, esses dois canais são ocupados durante todo o tempo de conversação de A e B. Se não for encontrado o par de canais, está caracterizada uma perda de chamada.

b) 2º caso: o terminal chamador (A) está ligado a um módulo (módulo de origem) diferente do módulo (módulo de destino) onde está ligado o terminal chamado (B). Neste caso, também têm de ser utilizados os grupos de enlaces intermediários. Veja a Fig. 3.3.

Para se estabelecer uma conexão entre os terminais de A e B, primeiramente deve ser encontrado um canal livre qualquer no enlace do módulo de origem. Se não for encontrado, temos caracterizada uma perda de chamada. Suponha que esse canal seja encontrado, e seja i o seu número. Então, para a conexão ser possível, tem de estar livre o i-ésimo canal de um dos grupos de enlaces intermediários, pois, se não for encontrado tal canal, temos um caso de perda de chamada por congestionamento. Se o i-ésimo canal de um dos grupos intermediários estiver livre, basta encontrar um canal livre qualquer do enlace do módulo de destino. Se esse canal existir, os três canais são tomados, permanecendo retidos durante todo o tempo de conversação de A e B. Se não existir, está caracterizada uma perda de chamada.

3.3 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O sistema de comutação que se tem interesse prático em estudar considera que, para ambas as estruturas de comutação, se deva ter 16 módulos de terminais ($M=16$), 30 terminais ligados a cada módulo ($N_t=30$) e 30 canais de comunicação por módulo e por grupo de enlaces intermediários ($C=30$). Repare, então, que o número de terminais por módulo é igual ao número de canais do enlace do módulo e de cada grupo de enlaces intermediários, ou seja, que $N_t=C$.

O problema que surge é, conhecendo-se o tráfego originado por terminal na hora de maior movimento e o tempo médio de retenção dos canais em uma chamada, determinar a probabilidade

de se perder uma chamada por congestionamento na hora de maior movimento, para um dado número de grupos de enlaces intermediários (G), onde $G=2,3,\dots$. Ou seja, quer-se determinar o bloqueio interno da rede. Estima-se que o tráfego originado por terminal seja de 0,4 ERL e o tempo médio de retenção dos canais, supostamente igual ao tempo médio de conversação de A e B, seja igual a 90 s.

Os padrões internacionalmente aceitos de qualidade de serviço de centrais telefônicas, estabelecem que, nesse caso, a probabilidade de perda por congestionamento deve ser menor ou igual a $5 \cdot 10^{-4}$. Assim, deve-se determinar, via simulação, uma estimativa da probabilidade de perda de uma chamada por congestionamento e para qual valor de G cada estrutura de comutação (1 e 2) satisfaz o critério pré-estabelecido. Tal estimativa deve ser calculada como a porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento em relação ao total de chamadas oferecidas à rede.

É importante notar que devido ao fato que $N_t = C$, uma chamada só é considerada perdida por congestionamento quando não houver nenhum grupo de enlaces intermediários tal que haja o par de canais módulo de origem - grupo intermediário, anteriormente descrito, independentemente do tipo de estrutura de comutação. No caso de não se encontrar um canal livre no enlace do módulo de destino, quando A e B são de módulos distintos, a chamada é considerada perdida por B ocupado e não por congestionamento, pois a conexão não é possível pelo fato de B estar ocupado. No caso de A e B pertencerem a um mesmo módulo e não forem encontrados dois canais livres quaisquer, também a chamada é considerada perdida por B ocupado e não por congestionamento.

3.4 - MODELO MATEMÁTICO ADOTADO PARA A SIMULAÇÃO

O modelo matemático adotado, para ser implementado em computador, é constituído de duas classes de objeto: uma classe que gera objetos-chamada (classe gerador de chamadas) e uma classe de objetos-chamada (classe chamada). Ambas as classes estão embutidas dentro de um programa principal, o objeto sistema. Tal estrutura foi adotada, tendo em vista que a implementação desse

modelo em computador foi feita utilizando-se a linguagem SIMULA (veja o Apêndice A).

Existe apenas um objeto gerador de chamadas que é criado e ativado pelo objeto sistema no instante inicial da simulação. O gerador, no instante previsto para uma geração de chamada, escolhe aleatoriamente um número inteiro entre 1 e M (M é um atributo do objeto sistema), isto é, escolhe aleatoriamente um módulo de origem entre todos os módulos existentes no sistema, e gera uma chamada originada nesse módulo. Isso é feito pois é suposto que o tráfego originado se distribui equitativamente entre os M módulos. O próprio objeto chamada é que escolherá o módulo de destino que poderá, evidentemente, ser o próprio módulo de origem.

O intervalo de tempo entre geração de chamadas é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa, como já foi visto no Capítulo 2, cuja média é $1/\lambda$, ou seja, se T é o intervalo de tempo entre geração de chamadas, então a função densidade de probabilidade de T é

$$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0$$

λ é a taxa de geração de chamadas (dado em chamadas/unidade de tempo) e é função do tráfego originado por terminal, do número total de terminais e do tempo médio de conversação de A e B. Se a é o tráfego originado por terminal então o tráfego total originado pelos terminais é igual a $N_t Ma$, pois temos $N_t M$ terminais no sistema. Se t_m é o tempo médio de conversação então

$$\lambda = \frac{N_t Ma}{t_m}$$

Assim, após a geração de uma chamada, o gerador gera uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa de média $1/\lambda$ (seja T_0 o valor dessa variável) e verifica o instante desse evento, através do relógio do sistema, e seja t_0 esse instante. Quando o relógio do sistema estiver marcando $t_0 + T_0$ é chegando o momento de uma nova geração de chamada. Nesse interim permanece passivo, sem realizar ação alguma. Após a geração de uma

chamada incrementa o totalizador de chamadas geradas, que é um atributo do objeto sistema.

O gerador de chamadas é o mesmo tanto para a estrutura 1 quanto para a estrutura 2 de comutação, e gera e ativa chamadas durante todo o tempo previsto para a simulação. Para uma melhor compreensão de suas ações, é mostrado o seu fluxograma no Apêndice B.

As ações de um objeto chamada, pertencente à classe chamada, que correspondem às ações de um processo que verifica se existem as condições necessárias para a conexão de um terminal chamador (A) com um terminal chamado (B), dependem da estrutura de comutação. Para a estrutura 1 temos uma sequência de ações e para a estrutura 2, outra.

Os canais dos enlaces de cada módulo são representados no modelo por uma matriz de variáveis booleanas bidimensional $[C]_{M.C}$, pertencente ao objeto sistema, onde cada elemento dessa matriz é $c(i,j)$, e :

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$e \quad j = 1, 2, \dots, C,$$

ou seja, i é o número do módulo e j é o número do canal do enlace. A convenção adotada é:

$$c(i,j) = 1 \quad , \quad \text{canal livre;}$$

$$c(i,j) = 0 \quad , \quad \text{canal ocupado.}$$

Os canais associados a cada grupo de enlaces intermediários são representados por uma matriz bidimensional de variáveis booleanas $[E]_{G.C}$, pertencente ao objeto sistema, onde cada elemento é $e(k,j)$, e:

$$k = 1, 2, \dots, G$$

$$e \quad j = 1, 2, \dots, C,$$

ou seja: k é o número do grupo de enlaces intermediários e j é o número do canal desse grupo.

A convenção adotada também é:

$e(k,j) = 1$, canal livre;
 $e(k,j) = 0$, canal ocupado.

Pelo fato de C e E serem atributos do objeto sistema, ambas são acessíveis por qualquer objeto chamada.

Para a estrutura 1, um objeto chamada, uma vez gerado e ativado pelo gerador, busca um canal livre no módulo de origem (módulo este que corresponde a um parâmetro formal da chamada , parâmetro este que foi transmitido à chamada pelo gerador no instante da geração). Se não existir tal canal então a chamada escolherá um outro módulo de origem onde exista um canal livre, pois, se todos os canais de um determinado módulo estão ocupados, nenhuma chamada pode ser originada nesse módulo, pois $N_t=C$. A busca de canal livre é do tipo sequencial de início aleatório, isto é, sendo m o número do módulo de origem então a chamada sorteia um número inteiro aleatoriamente entre 1 e C . Seja k este número. Se $c(m,k)=1$ então o canal foi encontrado. Se $c(m,k)=0$, verifica o valor de $c(m,k+1)$ se $k=2,3,\dots,C-1$ ou $c(m,1)$ se $k=C$. Se $c(m,k+1)=0$ também, continua a busca até $c(m,k-1)$, se for preciso. Isto é, para se concluir que não há canal livre, têm de ser feitos um número C de testes. Veja a Fig. 3.4.

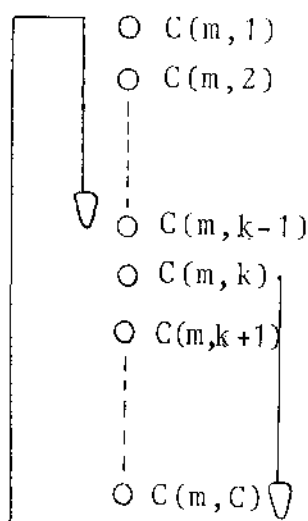


Fig. 3.4 - Busca Sequencial de Início Aleatório

Esse método de busca evita que os primeiros canais

$c(i,j)$ sejam sobrecarregados. Uma vez encontrado um canal livre, por exemplo $c(m,1)$, a chamada sorteia aleatoriamente um número inteiro, entre 1 e M, ou seja, escolhe aleatoriamente o módulo de destino, pois é suposto que as chamadas se distribuem equitativamente entre todos os M módulos. Se o número sorteado for igual a $\underline{m}$, ou seja, se o módulo de destino coincidir com o módulo de origem, a chamada faz $c(m,1)=0$ (ocupa o canal) e verifica se existe outro canal livre no enlace desse mesmo módulo. A busca desse outro canal também é do tipo sequencial de início aleatório. Se não existir, a chamada faz $c(m,1)=1$ (libera o canal que foi ocupado) e incrementa o contador de chamadas perdidas por B ocupado, contador este que é um atributo do objeto sistema, pois se $N_t=C$ e não existe outro canal livre nesse módulo, significa que o terminal chamado (B) está ocupado. Se existir outro canal livre, por exemplo $c(m,n)$, a chamada faz $c(m,n)=0$, isto é, ocupa-o também. Verifica, através do relógio do sistema, qual é o instante desse evento. Seja t_0 esse instante. Gera, em seguida, uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa de média t_m , onde t_m é o tempo médio de conversação de A e B, pois se V é o tempo de conversação de A e B, então, como mostrado no Capítulo 2, a função densidade de probabilidade de V é

$$f_V(t) = \frac{1}{t_m} e^{-\frac{1}{t_m}t}, \quad t > 0.$$

Seja v_0 o valor dessa variável aleatória gerada. Aguarda, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do sistema registre t_0+v_0 . Quando isso ocorrer faz $c(m,1)=1$ e $c(m,n)=1$, isto é, libera os dois canais que foram ocupados, e incrementa o contador de chamadas completadas, contador este que é um atributo do objeto sistema, e, em seguida, termina.

Se o módulo de destino for diferente do módulo de origem, isto é, se o número sorteado aleatoriamente pela chamada for diferente de m , a chamada irá verificar se existem dois canais do tipo $c(m,i)=1$ e $c(g,i)=1$, onde $i=1,2,\dots,C$ e $g=1,2,\dots,G$, ou seja, se existem dois canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do enlace do módulo de origem e um de um dos grupos de enlaces intermediários. Para cada g , a busca desse par também

é sequencial de início aleatório, isto é, se $\underline{m}$ é o número do módulo de origem então a chamada sorteia aleatoriamente um número inteiro entre 1 e C. Seja j o número sorteado. Se $c(m,j) = 1$, o par foi encontrado. Caso contrário, faz a verificação se $c(m,j+1) = 1$, se $j < C$, ou $c(m,1) = 1$ e $e(g,1) = 1$, se $j = C$. Se essas condições não forem verificadas, continua a busca até a $(j-1)$ -ésima, se for necessário, isto é, para se concluir que não há um par de canais livres e de mesma numeração, têm de ser feitos C testes para cada g , $g=1,2,\dots,G$. Veja a Fig. 3.5.

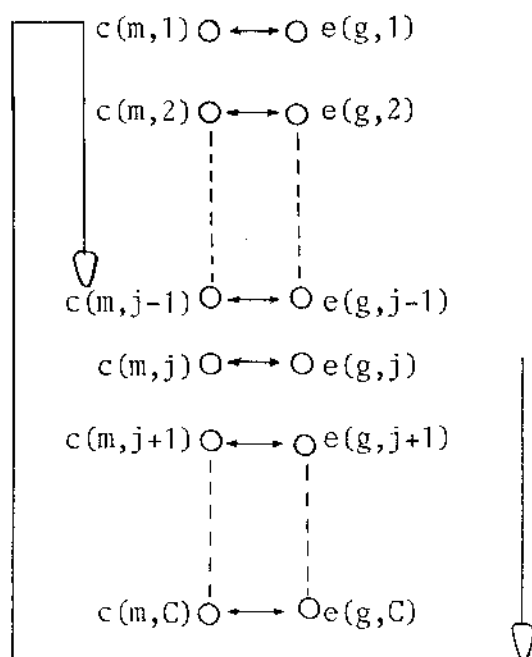


Fig. 3.5 - Busca de um Par de Canais Livres e de Mesma Numeração

Caso exista um par de canais livres e de mesma numeração, por exemplo $c(m,1) = 1$ e $e(g,1) = 1$, então a chamada faz $c(m,1) = 0$ e $e(g,1) = 0$, isto é, ocupa-os. Em seguida verifica se há uma variável do tipo $c(n,i) = 1$, onde $\underline{n}$ é o número do módulo de destino e $i = 1,2,\dots,C$, ou seja, verifica se há um canal livre qualquer no enlace do módulo de destino. A busca dessa variável também é do tipo sequencial de início aleatório. Se existir tal variável, digamos $c(n,k)$, a chamada faz $c(n,k) = 0$, isto é, ocupa-o também. Verifica, através do relógio do objeto sistema qual o instante desse evento. Seja t_0 esse instante. A seguir, gera uma variável aleatória com distribuição exponencial negati

va de média t_m . Seja v_0 o valor dessa variável aleatória. Permanece passiva, isto é, sem realizar ação nenhuma, até que o relógio do objeto sistema registre o instante $t_0 + v_0$, quando então faz $c(m,1)=1$, $e(m,1)=1$ e $c(n,k)=1$, incrementa o totalizador de chamadas completas (atributos do objeto sistema) e termina. Se não existir uma variável do tipo $c(n,i)=1$, $i=1,2,\dots,C$, faz $c(m,1)=1$ e $e(g,1)=1$, incrementa o totalizador de chamadas perdidas por B ocupado (atributo do objeto sistema), pois $N_t=C$, e termina. Se não existir um par de variáveis do tipo $c(m,i)=1$ e $e(g,i)=1$, onde $g=1,2,\dots,G$ e $i=1,2,\dots,C$, a chamada incrementa o totalizador de chamadas perdidas por congestionamento (atributo do objeto sistema) e termina.

Para se saber quantas chamadas ainda estão em processamento (em busca de condições para a conexão ou em conversação) e quantas ainda estão em conversação, ao se findar um tempo previsto para a simulação, o objeto possui os atributos correspondentes a chamadas em processamento e chamadas em conversação, que são variáveis inteiras incrementadas ou decrementadas por cada objeto chamada, nos instantes que forem necessários. Repare que foi considerado que se existir variáveis correspondentes aos canais que permitam a conexão dos terminais de A e B, a chamada é considerada bem sucedida, o que pode não ser verdade em um caso real, pois mesmo existindo as condições para a conexão dos terminais, o assinante chamado (B) pode estar ocupado. Mas a influência dessa suposição é desprezível. Para uma melhor compreensão das ações de um objeto chamada correspondente ao modelo associado à estrutura 1, é mostrado no Apêndice B, o fluxograma da classe chamada.

Para a estrutura 2 de comutação, o objeto chamada, ao ser gerado e ativado pelo gerador, recebe deste um parâmetro que indica qual é o número do módulo de origem. Busca, então, uma variável do tipo $c(m,i)=1$, onde m é o número do módulo de origem e $i=1,2,\dots,C$, isto é, busca um canal livre qualquer no enlace desse módulo. Essa busca é sequencial de início aleatório. Da mesma forma como na estrutura 1, se não existir uma variável $c(m,i)=1$, a chamada busca um inteiro t , tal que $c(t,j)=1$, $t = 1,2,\dots,M$ e $j=1,2,\dots,C$. A busca de tal variável também é sequencial de início aleatório. Se não existir tal variável t , a chamada incremen

ta o totalizador de chamadas que não deveriam ser geradas (atributo do objeto sistema), e termina. Suponhamos que haja uma variável $c(m,i)=1$. A chamada, então, sorteia aleatoriamente um número inteiro m entre 1 e M , ou seja, escolhe aleatoriamente o módulo de destino. Se $n=m$, ou seja, se o módulo de destino coincidir com o módulo de origem, as ações dessa chamada são as mesmas que aquelas correspondentes ao objeto chamada do modelo associado à estrutura 1 de comutação. Se $n \neq m$ (módulo de destino diferente do módulo de origem) e sendo $c(m,i)=1$ (o canal encontrado livre é o $c(m,i)$), a chamada irá verificar se existe algum g , $g=1,2,\dots,G$, tal que $e(g,i)=1$, ou seja, irá verificar se o i -ésimo canal de um dos grupos de enlaces intermediários está livre. Veja a Fig. 3.6.

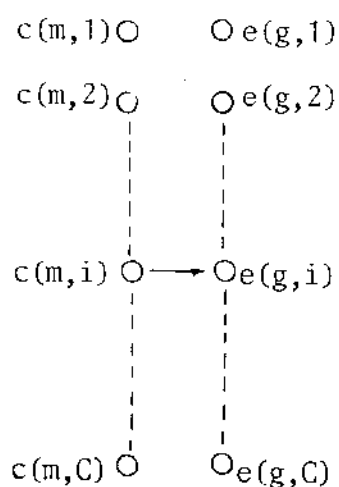


Fig. 3.6 - Busca da variável $e(g,i)$ da chamada associada à estrutura 2

Caso encontre essa variável, a chamada faz $c(m,i)=0$ e $e(g,i)=0$, ou seja, ocupa os dois canais, e verifica se existe uma variável do tipo $c(n,l)=1$, $l=1,2,\dots,C$, isto é, busca um canal livre qualquer no enlace do módulo de destino (busca seqüencial de início aleatório). Se existe tal variável, faz $c(n,l)=0$, e verifica, através do relógio do objeto sistema, qual é o instante desse evento. Seja t_0 esse instante. Gera, então, uma variável aleatória, com distribuição exponencial negativa de média t_m . Seja v_0 o valor dessa variável aleatória. Permanece passiva, isto é, sem realizar ação alguma, até que o relógio do objeto sistema registre t_0+v_0 , quando então faz $c(m,i)=1$, $e(g,i)=1$ e $c(n,l)=1$, incre

menta o totalizador de chamadas completadas (atributo do objeto sistema) e termina. Se não existir uma variável do tipo $c(n,1)=1$, a chamada faz $c(m,i)=1$ e $e(g,i)=1$, incrementa o totalizador de chamadas perdidas por B ocupado (atributo do objeto sistema), pois $N_t=C$, e termina. Caso não exista g , $g=1,2,\dots,G$, tal que $e(g,i)=1$, a chamada incrementa o totalizador de chamadas perdidas por congestionamento (atributo do objeto sistema) e termina.

Também neste caso, para se saber quantas chamadas ainda estão em processamento e destas, quantas ainda estão em conversão, ao se findar um tempo previsto para a simulação, o objeto sistema possui os atributos correspondentes a chamadas em processamento e chamadas em conversação, que são variáveis incrementadas ou decrementadas, conforme for o caso, por cada objeto chamada, nos instantes adequados. Também foi considerado que a chamada é bem sucedida se existem as variáveis correspondentes aos canais, que permitam a conexão dos terminais de A e B, o que pode não ser verdade em um caso real, pois mesmo existindo as condições para a conexão dos terminais, o assinante chamado (B) pode estar ocupado. Mas a influência dessa suposição é desprezível. Para uma melhor compreensão das ações de um objeto chamada correspondente ao modelo associado à estrutura 2, é mostrado no Apêndice B, o fluxograma da classe chamada.

O objeto sistema (isto é, o programa principal) armazena todas as variáveis e "procedures" globais utilizados pelos objetos-chamada, pelo gerador e por ele mesmo, quais sejam:

- M : número de módulos existentes;
- N_t : número de terminais ligados a cada módulo;
- A : número de canais de cada enlace;
- $[C]_{M.A}$: matriz de variáveis booleanas, $c(i,j)$, correspondentes aos canais associados aos módulos;
- $[E]_{G.A}$: matriz de variáveis booleanas, $e(i,j)$, correspondentes aos canais associados a cada grupo de enlaces intermediários;
- G : número de grupos de enlaces intermediários;
- a : tráfego oferecido por assinante;

- t_m : tempo médio de conversação (=tempo médio de retenção dos canais);
- t : taxa de geração de chamadas;
- T : tempo previsto de simulação;
- g : número total de chamadas geradas;
- ng : número total de chamadas que não deveriam ser geradas;
- d : número total de chamadas completadas;
- p : número total de chamadas perdidas por congestio namento;
- b : número total de chamadas perdidas por B ocupado;
- r : número total de chamadas ainda em processamento ao se findar o tempo previsto de simulação;
- v : número total de chamadas ainda em conversação ao se findar o tempo previsto de simulação;
- max : número máximo de canais ocupados;
- o : tempo total de ocupação de cada módulo;
- $[T]_{M.M}$: matriz de variáveis inteiras, $t(i,j)$, correspondentes às chamadas completadas de cada módulo de origem a cada módulo de destino;
- "procedures" de cálculos estatísticos auxiliares e impressão de resultados em relatório;
- s : valor inteiro para se iniciar os valores da sementes de todas as distribuições de probabilidade utilizadas;
- outras variáveis auxiliares.

O objeto sistema, uma vez ativado, solicita os dados de entrada necessários, inicia convenientemente todas as variáveis do sistema que têm de ser iniciadas, gera e ativa o gerador de chamadas e aguarda sem realizar ação alguma até que o seu relógio esteja marcando T , ou seja, o tempo previsto para simulação, quando então apresenta o relatório de todos os resultados desejados na simulação.

Os dados de entrada necessários para a simulação são os mesmos para ambos os modelos associados às duas estruturas de comutação, e devem ser fornecidos pelo usuário do programa de computador à medida que forem sendo pedidos pelo objeto sistema (programa principal). São eles:

- tempo de simulação: é o tempo que se quer simular o modelo e deve ser dado em segundos;
- número de módulos: número total de módulos do sistema;
- número de terminais por módulo;
- número de canais por enlace: número total de canais por enlace de cada módulo e de cada grupo de enlaces intermediários;
- número de grupos de enlaces intermediários;
- tráfego originado por terminal: dado em ERL e serve para o cálculo do intervalo de tempo médio entre geração de chamadas;
- tempo médio de conversação: é a média da distribuição do tempo de conversação e deve ser dado em segundos;
- valor para as sementes das distribuições: é um valor inteiro, escolhido aleatoriamente e independentemente em cada simulação, que serve para iniciar os valores das sementes de todas as distribuições de probabilidade utilizadas no modelo.

Tanto para o modelo associado à estrutura 1 quanto ao associado à estrutura 2 de comutação, são fornecidos, pelo objeto sistema, os seguintes resultados:

- taxa de geração de chamadas: esta taxa é função do tráfego originado por assinante, número de módulos do sistema e número de terminais por módulo, e é dada em chamadas/segundo;
- número total de chamadas geradas: total de chamadas geradas durante todo o tempo previsto para a simulação.

- número total de chamadas que não deveriam ser geradas no tempo previsto para a simulação;
- número total de chamadas completadas e a respectiva porcentagem em relação ao total de chamadas geradas;
- número total de chamadas perdidas por congestionamento e a respectiva porcentagem em relação ao total de chamadas geradas;
- número total de chamadas perdidas por B ocupado e a respectiva porcentagem em relação ao total de chamadas geradas;
- número total de chamadas em processamento e a respectiva porcentagem em relação ao total de chamadas geradas: as chamadas em processamento são as que estão em busca de canal ou ainda em conversação, quando se esgota o tempo previsto para a simulação;
- número total de chamadas em conversação e a respectiva porcentagem em relação ao total de chamadas em processamento, ao se findar o tempo de simulação;
- número máximo de canais dos enlaces dos módulos ocupados em um dado instante em todo o sistema, e a respectiva porcentagem em relação ao número total de canais dos módulos;
- número máximo de canais por enlace de cada módulo ocupados em um dado instante, e a respectiva porcentagem em relação ao número de canais por módulo;
- tempo total de ocupação dos módulos e o tráfego total por terminal nos módulos: o tempo total em que cada módulo foi ocupado (em segundos) durante todo o tempo de simulação com os correspondentes tráfegos totais por terminal nos módulos (originados e terminados). Apresenta-se, também, a média e o desvio padrão desses tráfegos;
- total de chamadas completadas de cada módulo de origem a cada módulo de destino.

No Apêndice B é apresentado em fluxograma do objeto

sistema (programa principal).

3.5 - RESULTADOS OBTIDOS

3.5.1 - VERIFICAÇÃO DO MODELO

Os modelos associados a ambas as estruturas de comutação foram sintetizadas em programas de computador (um programa para cada modelo) escritos em linguagem SIMULA (no Apêndice A estão mostradas as principais características dessa linguagem) e antes de passar para o plano de experimentação, teve de se fazer a verificação do modelo, para estabelecer a sua credibilidade. O estágio de verificação é aquele em que se verifica a estrutura lógica do modelo, se ele está programado corretamente.

Em ambos os modelos foram utilizados dois procedimentos de geração de variáveis aleatórias: um que gera variáveis aleatórias com distribuição exponencial negativa de média pré-determinada e outro que sorteia aleatoriamente números inteiros entre um limite inferior e um limite superior. Esses procedimentos estão implementados na própria linguagem SIMULA e embora não se fizesse necessário, foram previamente testados (teste do "Qui-quadrado" e Kolmogorov-Smirnov) antes de se verificar o modelo. Foram obtidos resultados excelentes, como era de se esperar.

Os testes para verificação dos modelos foram feitos considerando-se os seguintes parâmetros que correspondem à configuração do sistema que se quer estudar:

- número de módulos: 16 ;
- número de terminais por módulo: 30 ;
- número de canais por enlace de cada módulo e de cada grupo: 30 ;
- número de grupos de enlaces intermediários; $G \geq 2$, ou seja, para cada terno de parâmetros acima se fixa um valor de G (2,3,etc).

Outros parâmetros utilizados foram:

- tempo de simulação: após uma série de testes-piloto concluiu-se que um tempo de simulação significativo era de 4000s (um pouco mais que 3600s, que corresponde a uma h.m.m. real) para poder se desprezar o efeito das condições iniciais, pois foi suposto no modelo que todos os canais estão livres no início da simulação, o que não ocorre necessariamente em um sistema real no início da h.m.m.;

- tráfego originado por assinante (ERL): 0,4; este é um valor estimado de tráfego para a h.m.m. que se esperaria encontrar na realidade se um sistema análogo ao que se está estudando fosse implementado;

- tempo médio de conversação: 90s; este é um valor estimado de tempo de conversação e corresponde a uma média de tempos de retenção de canais considerando todos os casos possíveis que podem ocorrer em uma rede de comutação (chamada bem sucedida, B ocupado, B não responde, congestionamento, defeito, etc);

- valor para iniciar as sementes das distribuições de probabilidade: s; este valor é escolhido aleatoriamente e o modelo, através dele, gera sementes aleatórias e independentes umas de outras, sementes estas que são utilizadas na geração de variáveis aleatórias.

Considerando esses parâmetros de entrada e fazendo $G=2$ para o modelo associado à estrutura 1 e $G=2, 3$ e 4 para o modelo associado à estrutura 2, foram feitos os seguintes testes de verificação (variando-se s aleatoriamente a cada execução de programa):

- A taxa de geração de chamadas deveria ser de 2,13 chamadas por segundo e portanto o total de chamadas geradas em um período de 4000s deveria ser da ordem de 8533 chamadas: isso foi verificado em todas as execuções dos programas.

- Dever-se-ia ter, após cada período de simulação, a equação: $g = ng + d + p + b + r$, ou seja: total de chamadas geradas = total de chamadas que não deveriam ser geradas + total de chamadas completadas + total de chamadas perdidas por congestionamento + total de chamadas perdidas por B ocupado + total de chamadas ainda em processamento. E também: $ng\% + d\% + p\% + b\% + r\% = 100\%$.

Isso foi verificado em todas as execuções.

- Era de se esperar que o total de chamadas que não deveriam ser geradas fosse igual a zero ($ng=0$), como de fato se verificou em todas as execuções.

- Esperava-se uma porcentagem alta de máximo de canais ocupados em relação ao total de canais e de fato se verificou que essa porcentagem se situou no entorno de 90%.

- Verificou-se também que o número máximo de canais ocupados por enlace de cada módulo foi igual a 30 em todos os módulos e para todas as execuções, como era de se esperar, devido ao alto tráfego oferecido.

- Era de se esperar que o tráfego médio escoado por terminal fosse um pouco menor que 0,8 ERL pois cada terminal original, em média, 0,4 ERL. Isso de fato ocorreu em todas as execuções feitas.

- Pode-se verificar também, através da matriz das chamadas completadas de cada módulo de origem para cada módulo de destino, que as chamadas completadas estão distribuídas uniformemente entre todos os módulos, como era de se esperar, pois foi suposto que as chamadas geradas estão distribuídas uniformemente entre os módulos.

Obviamente todos os testes foram feitos após se corrigir todos os erros de compilação e execução dos programas, e após torná-los preparados para não executarem com dados de entrada incorretos. Feitos todos os testes, considerou-se o modelo satisfatoriamente verificado, e passou-se ao plano de experimentação para se obter os resultados desejados.

3.5.2 - PLANEJAMENTO TÁTICO

Uma vez que os modelos para ambas as estruturas de comutação foram verificados, podem ser usados para se fazer inferências sobre o sistema modelado. No caso em questão, o que se pretende é calcular a probabilidade de perda de uma chamada por congestionamento na h.m.m., quando se tem uma estimativa do tráfego oferecido ao sistema. Os modelos podem ser usados para se

fazer uma estimativa para o cálculo dessa probabilidade, ou seja, o bloqueio interno da rede pode ser estimado como $B=p/g$, isto é, o bloqueio B é o quociente entre o total de chamadas perdidas por congestionamento e o total de chamadas geradas (oferecidas à rede), após um período T de simulação, pois $ng=0$. Podemos dizer então que se está interessado nos efeitos estáticos, que no caso são representados pelos estados dos atributos do modelo, p e g , após T unidades de tempo de simulação terem-se passado.

Tanto para o modelo de simulação associado à estrutura 1 quanto para o modelo associado à estrutura 2 de comutação, fixados os parâmetros de configuração do sistema (M, N_t, A e G), a resposta $B(T)$ dos modelos pode ser vista como função de duas condições ambientais (ou parâmetros de entrada):

$$B(T) = B(a, t_m; s) ,$$

onde a é o tráfego oferecido por assinante, t_m é o tempo médio de conversação e s é um valor inteiro que serve para calcular as sementes das distribuições de probabilidade utilizadas nos modelos.

Pelo fato de os modelos serem estocásticos, a resposta $B(T)$ em um tempo de simulação T pode ser vista como uma variável aleatória para cada especificação permissível das condições ambientais. Por exemplo, nas condições em que se quer determinar o bloqueio interno da rede $a_0=0,4$ ERL e $t_{m0}=90s$, o conjunto de todas as respostas possíveis (cada uma sendo consequência de cada diferente valor atribuído a s) pode ser representado em um histograma de frequência, e assim se torna significativo presumir a existência de uma função densidade de probabilidade $f_B(x)$ e, naturalmente, uma função de distribuição cumulativa $F_B(x)$, para a resposta de simulação, assim como para respostas de simulação obtidas de outras condições ambientais.

Conclui-se, portanto, que a necessidade de se analisar a resposta dos modelos em questão se torna um problema estatístico, desde que ambos, o projeto e a análise da experimentação de simulação, tomam por base considerações estatísticas.

Pode-se notar que $B(T)$ é uma função contínua de cada uma das suas condições ambientais quantitativas, pois:

$$\lim_{\Delta t_m \rightarrow 0} [B(a, t_m + \Delta t_m; s) - B(a, t_m; s)] = 0$$

e

$$\lim_{\Delta a \rightarrow 0} [B(a + \Delta a, t_m; s) - B(a, t_m; s)] = 0 .$$

A variável s não produz tal comportamento na resposta dos modelos, e assim, é separada do conjunto de parâmetros de entrada, chamados de condições ambientais.

Considerando a condição de operação padrão $\vec{x}_0 = (a_0, t_{m_0})$ pode-se iterar os dois modelos de simulação N vezes nessa mesma condição e para sementes diferentes e selecionadas independentemente $s_1, s_2, \dots, s_N$. Assim, a j -ésima iteração produzirá uma resposta de simulação $B_j(T)$. O conjunto das N respostas, representada pelo vetor

$$B_1, B_2, \dots, B_N$$

ou

$$b_1, b_2, \dots, b_N$$

constitue uma amostra aleatória de tamanho N da função densidade de probabilidade $f_B(x)$ das respostas de simulação em $\vec{x}_0$.

3.5.3 - ESTIMATIVA DA MÉDIA DAS RESPOSTAS DE SIMULAÇÃO

A média das respostas de simulação em $\vec{x}_0$ é

$$E[B(T)] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_B(x) dx \equiv \mu$$

e a variância das respostas de simulação em $\vec{x}_0$ é

$$\text{Var}[B(T)] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f_B(x) dx \equiv \sigma^2$$

A estrutura dos modelos de simulação implica que $p_1, p_2, \dots, p_N$ constitui uma amostra aleatória de tamanho N de uma variável aleatória com distribuição binomial.

Para estimar os valores de μ e σ^2 devemos empregar a amostra aleatória $(b_1, b_2, \dots, b_N)$ das respostas de simulação. Assim, uma estimativa para a média real μ pode ser dada pela média aritmética das respostas independentes, ou seja

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N b_j \equiv \bar{b}$$

Como a estatística $\bar{\mu} \equiv \bar{b}$ depende de N , ela é apenas uma estimativa para μ .

Espera-se que $N\bar{\mu} = (b_1 + b_2 + \dots + b_N)$ tenha uma função densidade de probabilidade que pode ser aproximada pela distribuição normal, não importando a distribuição de b_j (veja o Teorema do Limite Central, [5]). Além do mais, desde que qualquer múltiplo de uma variável aleatória normalmente distribuída é também normalmente distribuída, a estatística

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} (N\bar{\mu}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N b_j$$

pode ser esperada ter uma distribuição aproximadamente normal, devido ao fato que os b_j são obtidos de observações independentes de uma função de probabilidade comum, $f_B(x)$.

Podemos verificar que a média da distribuição de $\bar{\mu}$ é μ também, ou seja

$$E[\bar{\mu}] = \mu.$$

A estatística $\bar{\mu}$ é, então, um estimador não tendencioso.

Desde que os b_j são supostamente independentes e, conseqüentemente, variáveis aleatórias não correlacionadas, a variância da distribuição de $\bar{\mu}$ é

$$\text{Var}(\bar{\mu}) = \frac{\sigma^2}{N}$$

e então, o estimador $\bar{\mu}$ é consistente, pois,

$$\forall \epsilon > 0 \lim_{N \rightarrow \infty} P[|\bar{\mu} - \mu| \leq \epsilon] = 1 .$$

3.5.4 - INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA A MÉDIA E A VARIANÇA DAS RESPOSTAS DE SIMULAÇÃO

Tendo em vista que o estimador $\bar{\mu}$ é aproximadamente distribuído normalmente, a variável aleatória

$$Z \equiv (\bar{\mu} - \mu) / (\sigma / \sqrt{N})$$

é a variável normal padrão de média zero e variância um, pois, pode ser mostrado que

$$E[Z] = 0$$

e
$$\text{Var}[Z] = 1 .$$

Assim, é possível localizar pontos $z_{\alpha/2}$ e $-z_{\alpha/2}$ tal que, para algum α entre 0 e 1 ,

$$P[-z_{\alpha/2} < Z < z_{\alpha/2}] = (1-\alpha)$$

de alguma tabela de distribuição normal ou de um cálculo numérico aproximado.

Nos nossos modelos, entretanto, não conhecemos σ nem sequer podemos fazer uma estimativa para ele pelo conhecimento do sistema, pois este se encontra em fase de projeto. Assim, um intervalo de confiança não pode ser computado e devemos, portanto, ter um estimador para σ também.

Um estimador para a variância σ^2 pode ser computado pela transformação da amostra aleatória, $(b_1, b_2, \dots, b_N)$, ou seja,

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (b_j - \bar{b})^2 ,$$

onde
$$\bar{b} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N b_j .$$

Novamente, S^2 é uma variável aleatória que possui a sua própria densidade de probabilidade e função de distribuição cumulativa e, conseqüentemente, as suas propriedades e momentos de distribuição.

Independentemente da forma de distribuição para as respostas $B(T)$ e da forma de distribuição de S^2 , pode ser mostrado que o valor médio de S^2 é

$$E[S^2] = \sigma^2 ,$$

ou seja, o estimador S^2 é não tendencioso.

Como se sabe, a variável aleatória

$$T = Z/(x^2/K)^{1/2} ,$$

onde Z é a variável normal padrão distribuída independentemente de x^2 , a variável "Qui-quadrado" com K graus de liberdade , tem a distribuição t de "Student" com K graus de liberdade.

Podemos definir, então a variável aleatória

$$T = \frac{(\bar{\mu} - \mu) / (\sigma / \sqrt{N})}{\{(N-1)S^2 / [\sigma^2 (N-1)]\}^{1/2}} = \frac{\bar{\mu} - \mu}{(S / \sqrt{N})} ,$$

onde S é a raiz quadrada positiva da estatística S^2 , e ela tem a distribuição t de "Student", com $(N-1)$ graus de liberdade.

Conseqüentemente, pode ser escrita a seguinte expressão de probabilidade:

$$P[-t_{K,\alpha/2} < T < t_{K,\alpha/2}] = (1-\alpha) ,$$

onde α está entre 0 e 1 e $t_{K,\alpha/2}$ é o valor à esquerda do qual

100(1-β)% da distribuição t de "Student" com K graus de liberdade reside.

Em particular, pode-se escrever que

$$P[\bar{\mu} - (S T_{N-1, \alpha/2} / \sqrt{N}) < \mu < \bar{\mu} + (S T_{N-1, \alpha/2} / \sqrt{N})] = (1-\alpha).$$

Fica determinado, então, o intervalo

$$(\bar{\mu} - S T_{N-1, \alpha/2} / \sqrt{N}) , \bar{\mu} + S t_{N-1, \alpha/2} / \sqrt{N})$$

para a média μ , a um grau de confiança de 1-α.

Desde que $(N-1)S^2/\sigma^2$ tem a distribuição "Qui-quadrado" com (N-1) graus de liberdade, um intervalo de confiança apropriado para a variância é definido pela equação probabilística:

$$P[(N-1)S^2/x^2_{N-1, \alpha/2} < \sigma^2 < (N-1)S^2/x^2_{N-1, 1-\alpha/2}]$$

onde $x^2_{N-1, \beta}$ é um número real tal que 100(1-β)% das variáveis x^2 de (N-1) graus de liberdade estão à sua esquerda.

3.5.5 - RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO ASSOCIADO À ESTRUTURA 1 DE COMUTAÇÃO

Para esse modelo fixou-se os valores dos parâmetros de configuração em M=16, N=30, A=30 e G=2, e colheu-se uma amostra de N=30 respostas de simulação, para as condições normais de operação $\vec{x}_0 = (a_0, t_{m_0}) = (0,4;90)$, que são mostradas na Tabela 3.1, a seguir (os resultados que interessam são as porcentagens de chamadas perdidas por congestionamento, ou seja, os valores de b_i dados em porcentagem).

As variáveis s_j , $j=1,2,\dots,30$, foram escolhidas aleatoriamente e independentemente, sem permitir nenhuma repetição.

Da Tabela 3.1 calculamos:

$$\bar{b} = \bar{\mu} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} b_i = 0,02758\% \text{ (média)}$$

ITERAÇÃO Nº1	TOTAL DE CHAMADAS GERADAS	PORCENTAGEM DE CHAMADAS COMPLETADAS	PORCENTAGEM DE CHAMADAS PERDIDAS POR CONGESTIONAMENTO (b ₁)	PORCENTAGEM DE CHAMADAS PERDIDAS POR B OCUPADO	PORCENTAGEM DE CHAMADAS EM PROCESSAMENTO	NÚMERO MÁXIMO DE CANAIS OCUPADOS
1	8661	94,56183	0,05773	4,00647	1,37398	422
2	8529	94,75906	0,02345	4,04502	1,17247	424
3	8547	94,88709	0,02340	3,83760	1,25190	432
4	8548	94,72391	0,01170	3,88395	1,38044	432
5	8522	95,23586	0,00000	3,43816	1,32598	426
6	8374	95,02030	0,01194	3,74970	1,21806	432
7	8498	94,52812	0,02353	4,22452	1,22382	434
8	8556	94,74053	0,02330	4,14914	1,08696	426
9	8460	95,01182	0,02364	3,75887	1,20567	432
10	8647	94,13669	0,03469	4,59119	1,23742	426
11	8612	94,51928	0,00000	4,27311	1,20762	420
12	8469	94,50939	0,00000	4,29803	1,19258	436
13	8526	94,59301	0,01173	4,44523	0,95004	426
14	8454	95,09108	0,01183	3,71422	1,18287	420
15	8361	95,19196	0,01196	3,52829	1,26779	428
16	8559	94,25167	0,04673	4,20610	1,49550	434
17	8592	94,65782	0,02328	3,96881	1,35009	434
18	8643	94,11084	0,04628	4,76686	1,07602	424
19	8470	95,25384	0,03542	3,64817	1,06257	420
20	8721	93,95712	0,02293	4,74716	1,27279	424
21	8585	94,68841	0,02330	4,05358	1,23471	438
22	8495	94,80871	0,03531	3,97881	1,11716	428
23	8706	94,07305	0,05743	4,72088	1,14863	438
24	8379	94,87060	0,00000	3,88202	1,24738	426
25	8560	94,50935	0,05841	4,06542	1,36682	434
26	8583	94,82698	0,05825	3,89141	1,22335	426
27	8626	94,00649	0,09274	4,62555	1,27521	424
28	8402	94,97739	0,00000	3,80862	1,21400	426
29	8418	94,68995	0,05940	4,18152	1,06914	446
30	8585	94,38556	0,00000	4,39138	1,22306	426

Tabela 3.1 - Resultados do Modelo Associado à
Estrutura 1 de Comutação

$$e \quad S^2 = \frac{1}{29} \left[\sum_{i=1}^{10} b_i^2 - 30 \bar{b}^2 \right] = 0,00054\%^2 \text{ (variança)}$$

Resulta, então, que o desvio padrão é $S=0,02334\%$. Escolhendo $(1-\alpha)=95\%$ e consultando uma tabela de distribuição t de "Student" reparamos que $t_{29;0,025}=2,0452$ e, então,

$$\frac{t_{29;0,025}}{\sqrt{30}} = 0,3734\%$$

$$e \quad \frac{St_{29;0,025}}{\sqrt{30}} = 0,00872\%.$$

Assim, usando o fato que

$$P[\bar{\mu} - St/\sqrt{N} < \mu < \bar{\mu} + St/\sqrt{N}] = 0,95 ,$$

resulta em

$$P[0,01887\% < \mu < 0,03629\%] = 0,95 ,$$

ou seja, o intervalo de confiança de 95% para a média de porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento é $(0,01887\% ; 0,03629\%)$.

Podemos também estimar um intervalo de confiança de $(1-\alpha)$ 100% para a variança da porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento, considerando que:

$$P[(N-1)S^2/x^2_{N-1,\alpha/2} < \sigma^2 < (N-1)S^2/x^2_{N-1,1-\alpha/2}] = (1-\alpha)$$

Para $1-\alpha = 0,95$, $N=30$ temos que

$$S^2 = 0,00054\%^2 , \quad x^2_{29;0,025}=45,722 , \quad x^2_{29;0,975}=16,047$$

Resulta então que

$$P[0,00035\% < \sigma^2 < 0,00098\%^2] = 0,95 ,$$

ou seja, o intervalo de confiança de 95% para a variança da porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento é $(0,00035\%^2 ; 0,00098\%^2)$.

3.5.6 - RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO ASSOCIADO À ESTRUTURA 2 DE COMUTAÇÃO

Para esse modelo, fixou-se os valores dos parâmetros de configuração $M=16$, $N_t=30$ e $A=30$, e considerou-se três casos de grupos intermediários, a saber, $G=2$, $G=3$ e $G=4$, colhendo a a mostras para as condições de operação normais $\vec{x}_0=(a, t_m)=(0,4;90)$ (variando-se aleatoriamente e independentemente os valores de s_j , sem permitir nenhuma repetição).

a) 1º caso: $G=2$, isto é, dois grupos de enlaces intermediários.

Para esse caso efetuou-se algumas execuções e a porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento situou-se no entorno de 4% e, portanto, não é necessário se calcular um intervalo de confiança para a média, pois a especificação para a perda por congestionamento é claramente violada ($5 \cdot 10^{-4}$).

b) 2º caso: $G=3$, isto é, três grupos de enlaces intermediários.

Neste caso também verificou-se, após algumas execuções independentes, que a especificação para a perda por congestionamento é violada, pois a porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento situou-se no entorno de 0,7%. Portanto, não se faz necessário calcular um intervalo de confiança para a média das respostas de simulação.

c) 3º caso: $G=4$, isto é, quatro grupos de enlaces intermediários.

Neste caso, colheu-se uma amostra de $N=30$ respostas de simulação, como é mostrado na Tabela 3.2.

Da Tabela 3.2 calculamos

$$\bar{b} = \bar{\mu} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} b_i = 0,03466\% \text{ (média)}$$

$$c \quad S^2 = \frac{1}{29} \left[\sum_{i=1}^{30} b_i^2 - 30\bar{b}^2 \right] = 0,00039\%^2 \text{ (variança)}$$

Resulta, então, que o desvio padrão é $S=0,01963\%$. Escolhendo $(1-\alpha)=95\%$ e consultando uma tabela de distribuição t de "Student" reparamos que $t_{29;0,025}=2,0452$ e, então,

ITERAÇÃO Nºi	TOTAL DE CHAMADAS GERADAS	PORCENTAGEM DE CHAMADAS COMPLETADAS	PORCENTAGEM DE CHAMADAS PERDIDAS POR CONGESTIONAMENTO (b _i)	PORCENTAGEM DE CHAMADAS PERDIDAS POR B OCUPADO	PORCENTAGEM DE CHAMADAS EM PROCESSAMENTO	NÚMERO MÁXIMO DE CANAIS OCUPADOS
1	8661	94,44637	0,04618	4,14502	1,36243	430
2	8529	95,07562	0,01172	3,69328	1,21937	424
3	8547	94,27869	0,04680	4,45770	1,21680	442
4	8548	94,59523	0,03510	4,05943	1,31025	426
5	8522	95,23586	0,01173	3,42643	1,32598	426
6	8374	94,42321	0,03583	4,31096	1,23000	426
7	8626	93,68189	0,05796	4,86900	1,39114	446
8	8556	94,51847	0,01169	4,24264	1,22721	436
9	8460	95,14184	0,01182	3,62884	1,21749	424
10	8647	94,32173	0,01156	4,37146	1,29525	426
11	8612	94,41477	0,06967	4,29633	1,21923	430
12	8469	94,52119	0,04723	4,17995	1,25162	440
13	8526	94,90969	0,03519	4,10509	0,95004	428
14	8454	94,81902	0,04731	4,03359	1,10007	416
15	8361	95,22784	0,03588	3,52829	1,20799	436
16	8559	94,02968	0,05842	4,49819	1,41372	430
17	8592	94,47160	0,01164	4,16667	1,35009	434
18	8643	94,26125	0,02314	4,61645	1,09916	432
19	8470	95,25384	0,01181	3,63636	1,09799	422
20	8721	93,93418	0,01147	4,74716	1,30719	432
21	8585	94,33896	0,05824	4,30984	1,29295	430
22	8495	94,53796	0,02354	4,22602	1,21248	420
23	8706	93,98116	0,05743	4,83575	1,12566	430
24	8578	94,62579	0,05829	4,04523	1,27069	430
25	8560	94,71963	0,03505	3,96028	1,28505	446
26	8583	94,44250	0,04660	4,31085	1,20005	422
27	8626	94,37746	0,06956	4,28936	1,26362	428
28	8402	95,17972	0,01190	3,40395	1,40443	436
29	8418	94,97505	0,02376	3,84890	1,15229	440
30	8585	94,00117	0,02330	4,69423	1,28130	430

Tabela 3.2 - Resultados do Modelo Associado à
Estrutura 2 de Comutação

$$\frac{t_{29;0,025}}{\sqrt{30}} = 0,3734\%$$

e
$$\frac{S t_{29;0,025}}{\sqrt{30}} = 0,00872\%.$$

Assim, podemos escrever que:

$$P[\bar{\mu} - St/\sqrt{N} < \mu < \bar{\mu} + St/\sqrt{N}] = 0,95 ,$$

o que resulta, no caso em questão, que

$$P[0,02733\% < \mu < 0,04199\%] = 0,95 ,$$

ou seja, o intervalo de confiança de 95% para a média da porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento é (0,02733% ; 0,04199%).

Podemos também estimar um intervalo de confiança de $(1-\alpha)100\%$ para a variança da porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento, considerando que:

$$P[(N-1)S^2/x^2_{N-1,\alpha/2} < \sigma^2 < (N-1)S^2/x^2_{N-1,1-\alpha/2}] = (1-\alpha).$$

Para $1-\alpha=0,95$ e $N=30$, temos que:

$$S^2=0,00039\%^2, \quad x^2_{29;0,025}=45,722 \quad \text{e} \quad x^2_{29;0,975}=16,047.$$

Resulta então que:

$$P[0,00024\%^2 < \sigma^2 < 0,00070\%^2] = 0,95 ,$$

ou seja, o intervalo de confiança de 95% para a variança de porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento é $(0,00024\%^2 ; 0,00070\%^2)$.

3.6 - COMPARAÇÃO DAS DUAS RESPOSTAS DE SIMULAÇÃO

Podemos comparar a resposta obtida do modelo associa

do a estrutura 1 com 2 grupos de enlaces intermediários, com a resposta obtida do modelo associado a estrutura 2 com 4 grupos de enlaces intermediários.

Sendo B_1 a resposta associada ao modelo da estrutura 1 acima referido, e B_2 a resposta do modelo da estrutura 2, elas podem ser comparadas por meio do teste de hipótese nula

$$H_0 : \Delta = E(B_1 - B_2) = 0 .$$

Para que isso seja feito, as variâncias σ^2 de ambas as respostas devem ser conhecidas. Não é o nosso caso; entretanto, podemos supor que a variância seja a mesma para B_1 e B_2 e estimá-la por S^2 , onde

$$S^2 = (S_1^2 + S_2^2)/2 ,$$

sendo S_j^2 a estimativa da variância para B_j e S_2^2 , a estimativa da variância para B_2 . Lembramos que S_1^2 e S_2^2 são cada uma delas, estatísticas computadas de uma amostra aleatória independente, e, portanto, variáveis aleatórias independentes. Cada uma foi obtida de uma amostra de tamanho N .

Cada uma das médias de respostas $\bar{B}_j$, $j=1,2$, tem distribuição normal com média μ e variância σ^2/N , e assim, devido a sua independência, a estatística

$$D^* = (\bar{B}_1 - \bar{B}_2)$$

tem a distribuição normal com média 0 e variância $(2\sigma^2/N)$, implicando que a hipótese nula $H_0 : \Delta=0$ [isto é, $E(B_1)=E(B_2)$], é verdadeira. Além do mais, D^* e S^2 são variáveis aleatórias independentes, desde que cada uma é uma combinação linear das variáveis mutuamente independentes $\bar{B}_1$, $\bar{B}_2$, S_1^2 e S_2^2 . Pode-se notar que

$$T \equiv \frac{D^* / (2\sigma^2/N)^{1/2}}{\{2(N-1)S^2 / [\sigma^2(2N-2)]\}^{1/2}} = \frac{D^*}{(2S^2/N)^{1/2}}$$

tem distribuição t de "Student" de $(2N-2)$ graus de liberdade. Consequentemente, um teste apropriado para o teste de hipótese nula $H_0: \Delta=0$ é rejeitá-la quando a estatística $|T|$ excede t_α , aquele valor tal que a probabilidade de uma variável t de "Student" de $(2N-2)$ graus de liberdade excede (em valor absoluto) t_α é α (convencionalmente $\alpha=0,05$ ou $\alpha=0,01$).

No nosso caso temos que

$$\bar{b}_1 = 0,02758, S_1^2 = 0,00054,$$

$$\bar{b}_2 = 0,03466, S_2^2 = 0,00039,$$

e $N=30$, ou seja, $2N-2 = 58$.

Portanto,

$$S^2 = 0,00046, \text{ e}$$

$$T = -1,27492 \Rightarrow |T| = 1,27492$$

Consultando uma tabela de valores de distribuição t de "Student", reparamos que

$$t_{58;0,10} = 1,2963$$

$$\text{e } t_{58;0,25} = 0,6787$$

Como $|T| = 1,27492$, então devemos rejeitar a hipótese de que as médias das respostas de simulação associadas aos dois modelos sejam iguais, tanto para um grau de confiança de 99% quanto para um de 95% ($\mu_1=E(b_1)$ e $\mu_2=E(b_2)$).

3.7 - OBSERVAÇÕES FINAIS

Através dos resultados obtidos, e considerando ambos os modelos suficientemente fiéis à realidade, isto é, considerando válidas todas as hipóteses feitas, pode-se dizer que a rede com a estrutura 1 de comutação e com dois grupos de enlaces intermediários, satisfaz o critério de perdas por congestionamento na h.m.m., enquanto que a rede com a estrutura 2 de comu

tação só satisfaz esse critério com quatro grupos de enlaces intermediários. Tal conclusão é baseada no cálculo da estatística

$$|t| = \left| \frac{(\bar{\mu}_i - \mu_i)}{S_i} \sqrt{N} \right|, \quad i=1,2,$$

onde $\bar{\mu}_i$ é a média obtida de N iterações do modelo i e S_i é a raiz quadrada positiva de S_i^2 . Assim, para o modelo associado à estrutura 1 com dois grupos de enlaces intermediários, tem-se que

$$\bar{\mu}_1 = 0,02758\%$$

$$e \quad S = 0,02334\%,$$

o que resulta que, se fizermos a hipótese $H_0: \mu_1 = 0,05\%$ e como $N = 30$, $|t| = 5,26$, e então $|t| > t_{0,01}$, e assim rejeitamos H_0 em favor de

$$H_1: \mu_1 < 0,05\%,$$

ou seja, a hipótese de que a média real μ exceda o valor de 0,05% é rejeitada com 99% de grau de confiança. Lembrando que o critério de qualidade de serviço é que a probabilidade de perda de uma chamada por congestionamento deve ser menor ou igual a 0,05%, esse modelo satisfaz o critério. Para o modelo associado à estrutura 2 com quatro grupos de enlaces intermediários, tem-se que

$$\bar{\mu}_2 = 0,03466\%$$

$$e \quad S = 0,01963\%,$$

o que resulta que, se fizermos a hipótese $H_0: \mu_2 = 0,05\%$ e como $N = 50$, $|t| = 4,28$, e então $|t| > t_{0,01}$, e assim rejeitamos H_0 em favor de

$$H_1: \mu_2 < 0,05\%,$$

ou seja, a hipótese de que a média real μ exceda o valor de 0,05% é rejeitada com 99% de grau de confiança. Assim, esse modelo também satisfaz o critério de qualidade de serviço.

Para se escolher uma das duas estruturas de comutação,

baseados nos resultados obtidos pelos modelos, devem ser levados em conta outros fatores, tais como custo, facilidade de implementação, confiabilidade, etc., pois as estimativas da probabilidade de perda por congestionamento para ambos os modelos não têm diferenças significativas. Mas, se o critério que determinasse a escolha de uma das estruturas fosse o de considerar a estrutura melhor aquela cuja estimativa de perda por congestionamento dada pelo modelo associado fosse a menor, a estrutura escolhida seria a estrutura 1 com dois grupos de enlaces intermediários.

Também a título de verificação dos modelos, realizou-se posteriormente uma série de iterações dos modelos da estrutura 1 com dois grupos de enlaces intermediários e da estrutura 2 com quatro grupos de enlaces intermediários, fixando-se os parâmetros de entrada outros que não o tráfego oferecido. Variou-se este em um entorno do tráfego oferecido padrão $a_0 = 0,4$ ERL, ou seja, considerando o intervalo $(a_0 - \Delta a_0, a_0 + \Delta a_0)$, $\Delta a_0 = 0,02$ ERL. Para ambos os modelos verificou-se que a porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento é crescente em tal intervalo.

CAPÍTULO 4

DIMENSIONAMENTO DE UM ÓRGÃO DE CONTROLE DE
UMA CENTRAL TELEFÔNICA AUTOMÁTICA

4.1 - INTRODUÇÃO

Durante a fase de projeto de um sistema de comutação temporal controlado a programas armazenados, surgiu a idéia de se criar um modelo que simulasse o funcionamento de um determinado órgão de controle desse sistema, órgão esse que possui registros que são utilizados no tratamento de uma chamada telefônica.

Devido a certas características internas e externas ao sistema, é bastante complexo um tratamento analítico para o problema do dimensionamento do referido órgão de controle. Em virtude desse fato, optou-se pela construção de um modelo de simulação que foi implementado em linguagem SIMULA e utilizou-se o "DECsystem-10", da UNICAMP, para a obtenção dos resultados numéricos desejados.

4.2 - DESCRIÇÃO DO ÓRGÃO DE CONTROLE NO TRATAMENTO DE UMA CHAMADA DA TELEFÔNICA

4.2.1 - DESCRIÇÃO GERAL

O sistema de comutação consiste de quatro conjuntos de canais de comunicação, denominados concentradores de linha (CL), onde são ligados os terminais de assinante (veja item 1.2.3), sendo que cada concentrador possui C canais. Os concentradores têm acessibilidade plena a dois órgãos de controle, denominados órgãos de controle de assinantes (OCA), e que possuem registros que são utilizados para armazenar informações dos assinantes chamadores e chamados, no tratamento de uma chamada.

Na Figura 4.1 estão esquematizados os concentradores e os órgãos de controle, e as respectivas filas associadas a eles e cuja utilidade será descrita posteriormente.

Cada órgão de controle (OCA 1 e OCA 2) possui n registros, que são posições de memória utilizadas nas fases de conexão e liberação de uma chamada. A maneira como são utilizados esses registros depende do tipo de chamada. Por exemplo, para uma chamada interna efetiva, isto é, aquela cujos assinantes

chamador e chamado entraram em conversação, são ocupados 2 registros até que seja feita a conexão do assinante chamador (A) com o chamado (B).

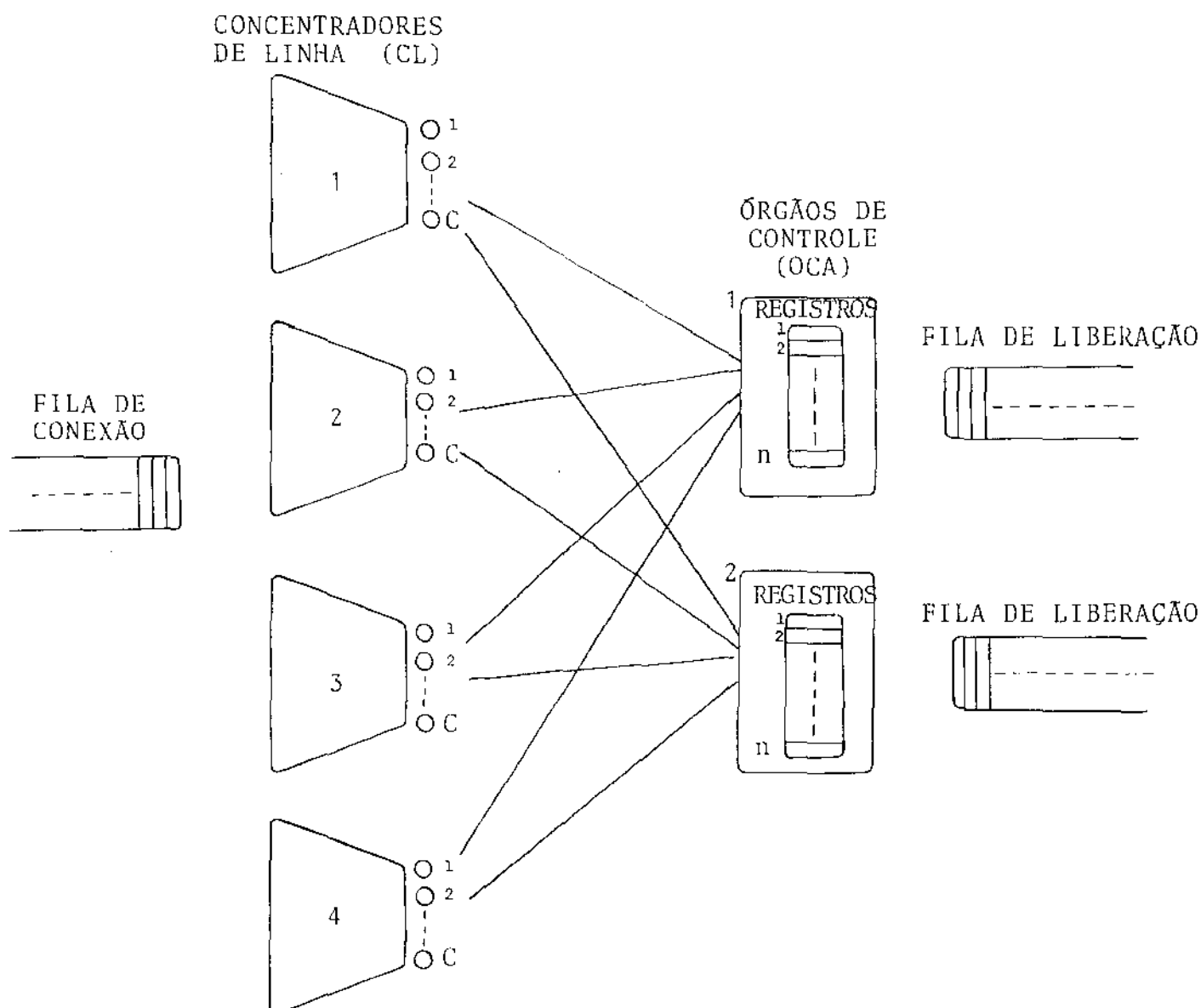


Fig. 4.1 - Esquema Simplificado do Sistema

Estes registros são ocupados por um certo tempo de conexão, suposto constante, ao fim do qual a conversação pode ser iniciada, e eles são liberados. Quando os assinantes repõem o fone no gancho (término da conversação), novamente 2 outros registros são tomados durante um certo tempo de liberação, também suposto constante. Para uma chamada de entrada ou de saída efetivas, somente 1 registro é ocupado na fase de conexão, durante um certo

tempo de conexão constante, e é liberado durante toda a conversação, e na fase de liberação dos assinantes novamente só 1 registro é tomado (tempo de liberação constante). O diagrama de tempo da Figura 4.2 ilustra o que foi dito.

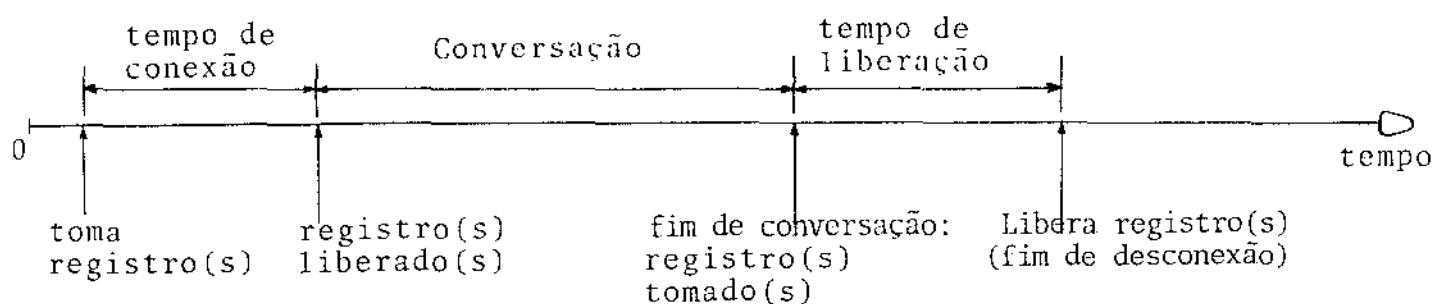


Fig. 4.2 - Fases de uma chamada efetiva

Se no instante de fim de conversação, ou seja, no instante de início de liberação, não houver registro livre, a chamada aguarda em uma fila de liberação até que se libere 1 ou 2 registros, conforme for o caso.

Se as chamadas não forem efetivas, ou seja, não haja conversação dos assinantes chamadores e chamados, teremos um outro comportamento. A seguir serão descritas cada classe de chamada: interna, de entrada e de saída, com todos os possíveis casos que podem ocorrer (desligamento prematuro, assinante B ocupado, assinante B não responde, etc.) e seus efeitos no sistema.

4.2.2 - DESCRIÇÃO COMPLETA DE UMA CHAMADA INTERNA

Quando um assinante da central tira o fone do gancho este fato é identificado por um órgão da central que sabe, portanto, qual é o número do terminal desse assinante chamador (A). Nesse momento deve haver um canal de concentração e um registro livre em um dos OCA, para serem alocados ao chamador (A). Caso essas condições não sejam satisfeitas, o número do terminal de A é colocado em uma fila, chamada de fila de conexão (veja Fig. 4.1), até que um canal se libere e haja um registro livre. Somente após existir um registro e um canal livres a central avisa A que ele pode iniciar a discagem do número de lista do assinante chamado (B), através do envio, por um órgão apro

priado, de um tom, conhecido como tom de discar. O canal e o registro são tomados. O assinante A inicia, então, a discagem do número de lista de B, podendo repor o fone no gancho (desligar) a qualquer momento antes que se complete a discagem, ou mesmo imediatamente após completá-la. Diz-se, então, que pode haver desligamento prematuro. Nesse caso, o canal e o registro são liberados. Não havendo desligamento prematuro, a central identifica, através do número de lista de B, que se trata de uma chamada interna e escolhe aleatoriamente um OCA que cuidará do assinante B. Não havendo nenhum registro livre nesse órgão de controle escolhido (chamado de OCA lado B), o canal e o registro (do OCA lado A) são liberados, e envia-se um tom indicando congestionamento (tom de congestionamento) ao assinante A. Existindo registro livre, este é tomado até que se complete a conexão de A com B. Vencido esse tempo, a central escolhe aleatoriamente um CL para o lado B e verifica se há canal livre nesse CL. Não havendo canal livre, o registro e o canal que foram ocupados são liberados e é enviado um tom apropriado, informando a A que não se pode fazer a ligação. O mesmo é feito se o terminal de B estiver ocupado ou B não atender dentro de um certo tempo. Se B atender, os 2 registros são liberados e após o tempo de conversação dos assinantes, ou seja, quando um deles repor o fone no gancho, a central escolhe um OCA para o lado que desligou primeiro, e verifica se há registro livre. Não havendo registro livre, coloca o número do terminal do assinante em uma fila, fila de liberação associada ao OCA em questão, até que se libere um registro, quando então toma o registro durante um certo tempo de liberação. Findo esse tempo libera o registro e o canal associados ao lado que desligou primeiro. Faz o mesmo para o outro lado, isto é, aguarda, se necessário, até haver um registro livre. Quando houver um registro livre, toma-o por um certo tempo de liberação, findo o qual libera o registro e o canal associados a esse lado.

4.2.3 - DESCRIÇÃO COMPLETA DE UMA CHAMADA DE SAÍDA

As ações da central para uma chamada de saída são as mesmas que aquelas correspondentes a uma chamada interna, até o momento em que o assinante chamador (A) completou a discagem

do número de lista do assinante chamado (B), sendo possível então saber se tratar de uma chamada de saída. Quando a central verifica que se trata de uma chamada de saída, busca um tronco livre. Não existindo nenhum tronco livre, libera o canal e o registro que foram ocupados e avisa A, através de um tom apropriado (tom de congestionamento de tronco), que não se pode completar a ligação. Existindo tronco livre, este é tomado e a central se comunica com a central de destino, enviando a este o número de lista de B. Esse tempo de comunicação entre as centrais é chamado de tempo de sinalização. Vencido esse tempo, a central é informada se B atendeu ou não. Se B não atendeu, o canal e o registro que foram ocupados são liberados, e A é avisado que não se pode completar a ligação, através de um tom apropriado. Se B atender, o registro do OCA que foi ocupado é liberado. Findo o tempo de conversação de A e B, a central escolhe aleatoriamente um OCA. Se não houver registro livre nesse órgão de controle, coloca o número do terminal de A na fila de liberação correspondente até que um registro se libere. Uma vez tomado um registro desse OCA, este permanece ocupado por um certo tempo de liberação. Vencido esse tempo, o canal e o registro são liberados.

4.2.4 - DESCRIÇÃO COMPLETA DE UMA CHAMADA DE ENTRADA

Uma vez que a central detecte a existência de uma chamada de entrada, ela escolhe um OCA, aleatoriamente. Não havendo registro livre nesse OCA escolhido, a chamada de entrada não pode prosseguir, fato este que é comunicado à central onde está ligado o assinante que originou essa chamada. Existindo registro livre este é tomado por um certo tempo de conexão (constante). Vencido esse tempo a central escolhe aleatoriamente um CL e verifica se há canal livre nesse concentrador escolhido. Não havendo canal o registro é liberado e a chamada não pode prosseguir. Havendo canal pode ocorrer que B esteja ocupado ou não atenda. Nesses casos a chamada também não pode prosseguir, e o registro é liberado. Havendo canal livre e B atendendo, o registro é liberado e após o tempo de conversação dos assinantes, a central escolhe aleatoriamente um OCA. Se não houver registro livre nesse órgão de controle escolhido, coloca o

número do terminal chamado (B) na fila de liberação correspondente, e ele fica na fila até que um registro se desocupe. Em caso de haver registro livre, este é tomado durante um certo tempo de liberação (constante). Vencido esse tempo, o canal e o registro são liberados.

4.3 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO

Para a central em questão deve-se ter $C=60$, ou seja, 60 canais de comunicação alocados a cada CL. É possível se estimar também outros parâmetros relevantes para essa central. Quer-se determinar o número de registros de cada órgão de controle (OCA) para se satisfazer certos padrões de qualidade de serviço, na hora de maior movimento. Mais precisamente, conhecidos os valores de:

- taxa de chamadas (chamadas/unidade de tempo) oferecidas à central;
- porcentagem de chamadas internas;
- porcentagem de chamadas de entrada;
- porcentagem de chamadas de saída;
- número de dígitos a discar em uma chamada interna ou de saída;
- tempo médio para a central receber o primeiro dígito, isto é, tempo médio de reação do assinante para iniciar a discagem após receber o tom de discar;
- temporização interdigital, isto é, tempo entre discagem de dígitos consecutivos;
- tempo médio de conversação em chamada interna;
- tempo médio de conversação em chamada de entrada ou de saída;
- tempo de conexão em uma chamada interna, de entrada ou de saída;
- tempo gasto para a liberação de uma chamada;
- probabilidade de B estar livre;
- probabilidade de haver desligamento prematuro em uma chamada interna ou de saída;
- probabilidade de B atender a uma chamada;

- tempo de atendimento de B;
- temporização em chamadas não atendidas;
- tempo médio para seleccionar um tronco em uma chamada de saída;
- probabilidade de haver saída livre;
- tempo médio de sinalização em uma chamada de saída;
- probabilidade de escolha de cada órgão de controle (OCA),

quer-se determinar o número mínimo de registros de cada OCA, n , para que a probabilidade de uma chamada (interna ou de saída) esperar mais que um certo tempo crítico θ para receber o tom de discar seja menor que um certo valor γ . Matematicamente, sendo E o tempo para o assinante chamador, que origina uma chamada interna ou de saída, receber o tom de discar, deve-se ter:

$$P[E > \theta] < \gamma.$$

O tráfego é suposto ser poissoniano, isto é, o intervalo de tempo entre chegada de chamadas é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa, assim como a duração de uma chamada (veja Capítulo 2).

4.4 - O MODELO ADOTADO PARA A SIMULAÇÃO

O modelo dinâmico escolhido para a simulação é constituído de um objeto sistema (programa principal) e embutidos neste, uma classe de objetos geradores de chamada, uma classe de objetos-chamada, um processo que trata a fila de conexão, um processo que trata a fila de liberação associada ao OCA número 1 e um processo que trata a fila de liberação associada ao OCA número 2. O processo que trata a fila de conexão é o objeto chamado de varredor. Os processos que tratam as filas de liberação são os objetos chamados de liberadores.

Constituem atributos do objeto sistema, todas as variáveis relacionadas com os parâmetros do sistema (parâmetros de configuração, taxa de chamadas, tempos de conversação, número de canais, etc.), a fila de conexão, a fila de liberação as

sociada ao OCA número 1, a fila de liberação associada ao OCA número 2, o vetor de variáveis inteiras $L(i)$ que indica o número de canais livres de cada CL número i ($i=1,2,3$, e 4) e o vetor $R(j)$ de variáveis inteiras, que indica o número de registros livres de cada OCA ($j=1,2$).

Os parâmetros do sistema são:

- T : tempo de simulação: é o tempo total previsto para uma rodada de simulação;
- C : número de canais de comunicação de cada CL;
- n : número de registros de cada OCA;
- s : número inteiro utilizado para se iniciar as sementes de todas as variáveis aleatórias utilizadas no modelo;
- x_1 : taxa de chamadas (número de chamadas por unidade de tempo);
- x_2 : porcentagem de chamadas internas;
- x_3 : porcentagem de chamadas de entrada;
- x_4 : porcentagem de chamadas de saída;
- d : número de dígitos a discar em uma chamada interna ou de saída;
- x_5 : tempo médio de conversação em uma chamada interna;
- x_6 : tempo médio de conversação em uma chamada de entrada ou de saída;
- x_7 : tempo de conexão em uma chamada;
- x_8 : tempo gasto para a liberação de uma chamada;
- p : probabilidade de escolha do OCA número 1;
- x_9 : tempo para a central receber o primeiro dígito;
- x_{10} : temporização interdigital;
- x_{11} : probabilidade de B estar livre;
- x_{12} : probabilidade de haver desligamento prematuro;
- x_{13} : tempo para atendimento de B;
- x_{14} : probabilidade de B atender;

- x_{15} : probabilidade do lado A desligar primeiro;
- x_{16} : temporização em chamadas não atendidas;
- x_{17} : tempo gasto para seleção de troncos;
- x_{18} : probabilidade de haver saída livre em uma chamada de saída;
- x_{19} : tempo de sinalização em uma chamada de saída;
- θ : tempo crítico de permanência na fila de conexão;
- outras variáveis auxiliares.

As variáveis x_i , $i=1,2,\dots,19$, constituem as condições ambientais do sistema, $\vec{x}$.

Ao ser ativado (no instante da execução do programa), o objeto sistema lê os dados de entrada que estão em um arquivo e os armazena nas posições apropriadas (os dados de entrada são os parâmetros de configuração do sistema e os parâmetros de condições ambientais), cria a fila de conexão, cria as filas de liberação, cria e ativa um objeto gerador de chamadas, cria o varredor, cria os dois liberadores, aguarda o tempo previsto para a simulação e apresenta o relatório de resultados obtidos em um arquivo de dados. No Apêndice C é apresentado o fluxograma do objeto sistema.

O objeto gerador de chamadas, no instante previsto para a geração de uma chamada, gera uma variável aleatória Y que pode assumir somente dois valores: 1 ou 2, e é tal que:

$$P[Y = 1] = (x_2 + x_4)/100$$

e
$$P[Y = 2] = x_3/100 .$$

Essa variável aleatória é, portanto, função de x_2 , x_3 e x_4 .

Se $Y=1$, gera e ativa um objeto chamada interna/saída e se $Y=2$, gera e ativa um objeto chamada de entrada. Incrementa, a seguir, o totalizador de chamadas geradas, e, através do relógio do objeto sistema, verifica o instante desse evento. Seja t_0 esse instante. Gera, então, uma variável aleatória G com distribuição exponencial negativa de média igual a $1/x_1$, onde x_1 é a taxa de chamadas. Seja g_0 o valor dessa variável aleatória

ria. Permanece então, passivo, isto é, sem realizar ação alguma até que o relógio do sistema esteja registrando $t_0 + g_0$, quando é chegado o instante de nova geração de chamada. Isso é feito pois é suposto que o intervalo de tempo entre geração de chamadas (G) é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa

$$(f_G(t) = \frac{1}{x_1} e^{-\frac{1}{x_1}t}, \quad t > 0).$$

O gerador gera e ativa chamadas durante todo o tempo previsto para a simulação e o seu fluxograma é mostrado no Apêndice C.

A chamada, ao ser gerada e ativada, verifica qual foi a classe a ela atribuída pelo gerador. Se for interna ou de saída, entra na fila de conexão e fica aguardando o "aviso" do varredor para que possa sair dessa fila. Ao chegar o aviso, gera um número inteiro aleatório entre 1 e 4. Seja j esse número. Se $L(j) > 0$, ou seja, se houver canal livre no CL escolhido, decrementa o valor de $L(j)$, ou seja, ocupa um canal. A seguir, gera uma variável aleatória I que pode assumir somente 2 valores: 1 ou 2, e corresponde ao número de cada OCA. Essa variável é tal que:

$$P[I = 1] = p$$

$$\text{e} \quad P[I = 2] = 1-p.$$

Seja $I=j$ ($j=1,2$). Se $R(j) > 0$, ou seja, se existir registro livre, decrementa o valor de $R(j)$, isto é, ocupa um registro. Sai da fila de conexão e, através do relógio do objeto sistema, calcula quanto tempo permaneceu nessa fila e informa este fato ao objeto sistema. Sendo t_0 o instante desse evento, permanece passiva até que o relógio registre $t_0 + x_9$, onde x_9 é o tempo de envio do 1º dígito (suposto constante). Nesse instante, gera uma variável aleatória R que pode assumir somente 2 valores: 1 ou 2, e é tal que:

$$P[R = 1] = x_{12}$$

$$\text{e} \quad P[R = 2] = 1-x_{12}$$

Se $R=2$, isto é, se não houve desligamento prematuro, aguarda até que o relógio do sistema esteja marcando $t_0+x_9+x_{10}$, onde x_{10} é a temporização interdigital (suposta constante). Nesse instante, repete o procedimento de verificação de desligamento prematuro. Faz o mesmo a cada fim de temporização interdigital. Se não houver desligamento prematuro, e então o relógio do sistema estará marcando $t_0+x_9+dx_{10}$, onde d é o número de dígitos a discar, verifica qual é o tipo de chamada, informação esta que lhe foi dada pelo objeto sistema, consistindo de um parâmetro formal. Se esse parâmetro for igual a 1, ou seja, se a chamada for tipo interna, gera uma variável aleatória I , que é tal que:

$$P[I = 1] = p$$

e
$$P[I = 2] = 1-p .$$

Seja $I=i$ (isso corresponde à escolha do OCA do lado B). Se $R(i) > 0$, ou seja, se existe registro livre nesse OCA, decrementa o valor de $R(i)$, ou seja, ocupa um registro. Se o relógio estiver marcando t_1 , por exemplo, aguarda passivamente até que ele esteja marcando t_1+x_7 , onde x_7 é o tempo de conexão de uma chamada (suposto constante), e gera então um número inteiro aleatório K , onde $K=1,2,3,4$. Se $L(K) > 0$, ou seja, se existe canal livre no CL escolhido, decrementa o valor de $L(K)$, ou seja, ocupa um canal. Gera, a seguir, uma variável aleatória L que pode assumir somente 2 valores: 1 ou 2, e é tal que:

$$P[L = 1] = x_{11}$$

e
$$P[L = 2] = 1-x_{11} .$$

Se $L=1$, isto é, se B está livre, e o relógio do sistema registra o instante t_2 , aguarda passivamente até que ele registre t_2+x_{13} , onde x_{13} é o tempo de atendimento de B. Nesse instante, gera uma variável aleatória A que pode assumir somente 2 valores: 1 ou 2, e é tal que:

$$P[A = 1] = x_{14}$$

e
$$P[A = 2] = 1-x_{14} .$$

SE $A=1$, isto é, se B atende à chamada, incrementa o contador de chamadas completadas, incrementa os valores de $R(j)$ e $R(i)$, ou seja, libera os registros dos OCA's que foram ocupados e gera uma variável aleatória V com distribuição exponencial negativa com média igual a x_5 (tempo médio de conversação em uma chamada interna). Seja v_1 o valor dessa variável e t_3 o instante desse evento. Aguarda, então, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do sistema registre t_3+v_1 . Gera, nesse instante, uma variável aleatória M , que pode assumir somente 2 valores: 1 ou 2, e é tal que:

$$P[M = 1] = x_{15}$$

e
$$P[M = 2] = 1-x_{15} .$$

Se $M=1$ (A desliga primeiro), gera uma variável aleatória I tal que:

$$P[I = 1] = p$$

e
$$P[I = 2] = 1-p .$$

Seja $I=1$ ($I=1,2$), por exemplo. Se $R(1) > 0$, decrementa o seu valor, isto é, ocupa um registro do OCA para o lado A. Se $R(1) = 0$, entra na fila de liberação e permanece nela até que o liberador correspondente a essa fila a avise. Após ocupar o registro, gera uma variável aleatória U com distribuição uniforme entre $0,9x_8$ e $1,1x_8$ (o tempo de liberação é suposto ter essas características). Seja $U=u_0$, por exemplo. Se o relógio está registrando t_4 , fica passiva até que o relógio do sistema registre t_4+u_0 , quando então incrementa o valor de $R(1)$, isto é, libera o registro, e incrementa o valor de $L(j)$, isto é, libera o canal do CL. Realiza um procedimento análogo para o lado B e após incrementar o valor de $L(K)$ e liberar o registro correspondente a esse lado, termina. Para as chamadas tipo de saída e de entrada são realizadas ações semelhantes, que podem ser melhor estudadas através do fluxograma da classe chamada que se encontra no Apêndice C.

É importante ressaltar que o objeto chamada utiliza os seguintes procedimentos estatísticos: p_1 , p_2 , p_3 e p_4 , que

são atributos do objeto sistema:

- a) p_1
 - cálculo do número de canais ocupados do CL em questão;
- b) p_2
 - incremento do número de chamadas em conversação;
 - número máximo de chamadas em conversação;
- c) p_3
 - liberação do registro do OCA em questão;
 - atualização do número de registros ocupados para conexão e liberação;
- d) p_4
 - incremento do número de registros ocupados no OCA (1 ou 2) para conexão/liberação;
 - número máximo de registros ocupados no OCA (1 ou 2) para conexão/liberação;
 - número máximo de registros ocupados nos OCA's 1 e 2;
 - cálculo do número máximo de registros ocupados nos 2 OCA's;
 - registro dos instantes de ocorrência do máximo e o número de chamadas em conversação nesses instantes.

A chamada também utiliza os seguintes procedimentos, p_5 e p_6 , que são seus atributos:

- e) p_5
 - registro do número de chamadas que aguardaram mais que o tempo crítico para receber o tom de discar, na fila de conexão;
 - registro do tempo total de permanência das chamadadas na fila de conexão;
 - atualização dos 5 maiores tempos de permanência na fila de conexão;

f) p_6

- registro do número de chamadas que aguardam mais que um certo tempo crítico nas filas de liberação;
- registro do tempo total de permanência nas filas de liberação;
- registro dos 5 maiores tempos de permanência em cada fila de liberação (uma do OCA 1 e outra do OCA 2).

O varredor, durante todo o tempo previsto para a simulação, verifica periodicamente se a fila de conexão está vazia ou não. No instante de verificação, verifica se a fila de conexão, que é um atributo do objeto sistema, está vazia. Se essa fila não estiver vazia, avisa à 1ª chamada dessa fila para que esta possa verificar se pode ou não sair, ou seja, ativa a 1ª chamada. Verifica, a seguir, o instante desse evento, através do relógio do objeto sistema. Seja t_0 esse instante. Quando o relógio estiver registrando $t_0 + t_v$, onde t_v é o período de varredura (supostamente constante), torna a verificar o estado da fila. Se a fila estiver vazia em um instante t_0 , aguarda o instante $t_0 + t_v$ para tornar a verificar o estado da fila de conexão. O fluxograma mostrado no Apêndice C apresenta as ações do varredor.

Os liberadores associados às filas de liberação do OCA 1 e do OCA 2, durante todo o tempo previsto para a simulação, verifica periodicamente se a fila de liberação correspondente está vazia ou não e se $R(j) > 0$, $j=1,2$, ou seja, se há registro livre do OCA correspondente. No instante de verificação, supondo que o relógio esteja marcando t_0 , se a fila não estiver vazia e existir registro livre, ativa a 1ª chamada da fila, isto é, avisa que ela pode sair da fila. Aguarda, então, até que o relógio esteja marcando $t_0 + t_1$, onde t_1 , constante, é o seu período de varredura. Se as 2 condições não forem satisfeitas, aguarda até que o relógio do sistema esteja registrando $t_0 + t_1$, para fazer nova verificação. As ações do liberador são mostradas no Apêndice C, também. Foi suposto que $t_v = 10^{-6}$ s e $t_1 = 10^{-6}$ s devido às ordens de grandeza dos tempos envolvidos no modelo.

4.5 - DADOS DE ENTRADA E SAÍDA DE RESULTADOS DO PROGRAMA DE COMPUTADOR

Constituem dados de entrada para o programa de computador, os valores de : T , C , n , s , d , p , θ e x_j , onde $j=1,2,\dots,19$, que devem ser colocados em um arquivo de dados e, no instante de execução, o objeto sistema lê esses dados, armazenando-os em locais apropriados. O valor de T deve ser tal que se possa considerar o sistema em regime. Os valores de C , n , d , p e θ constituem os parâmetros de configuração. Os valores de x_j constituem os parâmetros de condições ambientais $\vec{x}$. O valor de s serve para dar o valor inicial das sementes de todas as variáveis aleatórias do modelo, e deve ser variado a cada execução, sendo escolhido aleatoriamente e independentemente, isto é, para N execuções do programa devem ser escolhidos $s_1, s_2, \dots, s_N$ aleatoriamente, sem permitir repetições.

Após o tempo T de simulação, o objeto sistema apresenta os seguintes resultados, que são colocados em um relatório e apresentado em um arquivo de dados:

- número total de chamadas geradas: total de chamadas criadas durante todo o tempo de simulação;
- número total de chamadas internas, de entrada e de saída geradas;
- número de chamadas internas e número de chamadas de saída que receberam o tom de discar;
- número de chamadas completadas de cada tipo: internas, de entrada e de saída;
- total de chamadas ainda em conversação vencido o tempo previsto para a simulação;
- total de chamadas perdidas por desligamento prematuro, por falta de registro, por falta de canal, por B ocupado, não atendidas e perdidas por congestionamento de troncos;
- número máximo de registros ocupados no OCA número 1 para conexão e liberação de chamadas;
- número máximo de registros ocupados no OCA número 2 para conexão e liberação de chamadas;
- número máximo de registros ocupados no OCA número

1 e no OCA número 2;

- número máximo de registros ocupados nos 2 OCA's;

OBS: é através desses números máximos que se pode verificar quantos registros deve possuir cada OCA para que a especificação pré - estabelecida seja cumprida.

- número máximo de chamadas na fila de conexão;
- os 5 maiores tempos de permanência na fila de conexão e o tempo médio de permanência nessa fila;
- número total de chamadas que esperaram mais que o tempo crítico θ para receber o tom de discar: através desse resultado vê-se se a especificação é satisfeita ($P[E > \theta] < \gamma$);
- os 5 maiores tempos de permanência nas filas de liberação dos 2 OCA's e o tempo médio de permanência nessas filas;
- número de chamadas que passaram pelas 2 filas de liberação;
- chamadas que permaneceram mais que 1s nas filas de liberação;
- número máximo de chamadas em conversação;
- número máximo de canais ocupados em cada CL: esse resultado dá uma idéia de como é a ocupação dos 4 CL's;
- chamadas em fase de numeração quando se terminou o tempo de simulação previsto.

4.6 - CONFIGURAÇÃO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS TÍPICAS

Os parâmetros de configuração do sistema típico que se quer simular correspondem a

- . $C=60$, isto é, cada CL com 60 canais de comunicação;
- . $d=6$, isto é, o número de dígitos a serem discados em uma chamada interna ou de saída é igual a 6;
- . $p=50\%$, isto é, cada OCA é escolhido com probabilidade igual a 0,5.

Os parâmetros de condições ambientais desse sistema típico correspondem a:

- . $x_1 = 2,67$ chamadas/segundo;
- . $x_2 = 25\%$;
- . $x_3 = 37,5\%$;
- . $x_4 = 37,5\%$;
- . $x_5 = 90$ segundos ;
- . $x_6 = 120$ segundos ;
- . $x_7 = 0,5$ segundos ;
- . $x_8 = 0,5$ segundos ;
- . $x_9 = 3$ segundos ;
- . $x_{10} = 1,5$ segundos ;
- . $x_{11} = 74\%$;
- . $x_{12} = 9\%$;
- . $x_{13} = 18,5$ segundos ;
- . $x_{14} = 84\%$;
- . $x_{15} = 50\%$;
- . $x_{16} = 18,5$ segundos ;
- . $x_{17} = 0,5$ segundos ;
- . $x_{18} = 90\%$;
- . $x_{19} = 5$ segundos ;

Esses valores são aqueles que se espera encontrar no local onde for instalado um sistema de comutação igual ao descrito. Deve-se ressaltar que uma validação completa do modelo só pode ser feita após ter-se instalado em alguma localidade o sistema de comutação em questão, e após um período significativo de funcionamento recolher-se os dados associados às condições ambientais.

O valor de T, tempo de uma execução de simulação do modelo, deve ser determinado após algumas execuções-piloto, e é aquele tal que se possa considerar o modelo funcionando em regime permanente durante um intervalo de tempo adequado.

O valor de n , número de registros de cada OCA, deve ser determinado de modo a satisfazer a condição de qualidade de serviço. O valor de s deve ser variado aleatória e independentemente em cada rodada de simulação. Deve-se ter uma amostra de um certo tamanho N de rodadas de simulação, de tal forma a se determinar um intervalo de confiança para a resposta a um nível de confiança pré-estabelecido.

O número total de chamadas que recebem o tom de discar corresponde a um contador, t , que é um atributo do objeto sistema e que é incrementado por um objeto chamada interna ou de saída quando este ocupa um canal de um CL e um registro de um OCA. Um objeto chamada interna ou de saída mede o tempo que permaneceu na fila de conexão, tempo este que corresponde ao tempo que um assinante que origina uma chamada (interna ou de saída) aguarda pelo tom de discar. Toda vez que esse tempo ultrapassar θ , no caso deve-se ter $\theta = 3s$, o objeto chamada (interna ou de saída) incrementa um contador, e , que é atributo do objeto sistema. A probabilidade da espera E ser maior que θ é estimada como sendo igual a e/t . γ deve ser igual a 0,03. Assim, deve-se determinar o valor mínimo de n para que se tenha $P[E > 3s] < 0,03$, ou seja, deve-se ter, em média, menos que 3 chamadas em 100 esperando mais que 3s pelo tom de discar. Este critério não é baseado em nenhuma fórmula teórica e pretende representar, embora com uma certa dose de subjetividade, uma forma de otimização entre a satisfação do usuário e a economia do sistema.

4.7 - VERIFICAÇÃO DO MODELO

Antes de se passar para um plano de experimentação tem-se de se fazer a verificação do modelo, que consiste em verificar se a estrutura lógica do modelo programado está correta.

No modelo foram utilizados algoritmos de geração de variáveis aleatórias com distribuição exponencial negativa (tempo de conversação), com distribuição uniforme (tempo de liberação e escolha de cada CL), e variáveis aleatórias cujo valor é

igual a 1, com probabilidade p , e 2, com probabilidade $1-p$ (escolha de cada OCA e verificação de que lado desliga primeiro). Foram usados algoritmos pertencentes à própria linguagem SIMUla. Portanto, antes de se iniciar a verificação propriamente dita do modelo, esses algoritmos foram testados separadamente, utilizando-se os conhecidos testes do 'Qui-quadrado' e Kolmogorov-Smirnov. Foram obtidos resultados excelentes, como era de se esperar.

No estágio de verificação do modelo programado, foram considerados a configuração e as condições ambientais típicas, fixando-se também um valor para n e realizando-se algumas execuções-piloto. Nessas execuções fixou-se o valor de T em 4000 segundos, pois para esse tempo verificou-se estar o modelo em regime permanente, e variou-se o valor de s aleatória e independentemente.

Os seguintes pontos foram considerados:

a) como $x_1=2,67$ chamadas/segundo e $T=4000s$ para cada execução então era esperado que o total de chamadas geradas fosse da ordem de 10.680 chamadas. Isso foi verificado.

b) como $x_2=25\%$, $x_3=37,5\%$ e $x_4=37,5\%$, do total de chamadas geradas era esperado que aproximadamente 6.675 chamadas fossem do tipo interna/saída e aproximadamente 4.005 chamadas fossem do tipo de entrada. Verificou-se esse fato em todas as execuções.

c) a seguinte equação deveria ser verificada:

total de chamadas geradas = total de chamadas ainda em conversação + total de chamadas completadas + total de chamadas perdidas (por desligamento prematuro, por falta de registro, por falta de canal, por B ocupado, por B não responde e por congestionamento de troncos).

Isso de fato foi verificado.

d) era esperado que o número máximo de canais ocupados de cada CL fosse igual a C , ou seja, igual a 60, devido à alta taxa de geração de chamadas. De fato, os máximos foram todos iguais a 60.

e) baseados em sistemas análogos, esperava-se que pou

cas chamadas aguardariam mais que 3s para receber o tom de discar e também mais que 1s para serem liberadas. Esses fatos também se verificaram.

f) as porcentagens de chamadas perdidas de cada tipo foram iguais aproximadamente às esperadas.

Esses fatos, somados ao bom senso, levaram à conclusão de que o modelo poderia ser considerado suficientemente verificado, e poder-se-ia passar, então, ao plano de experimentação, para se obter os resultados numéricos desejados.

4.8 - PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO

Vamos usar o modelo para se fazer inferências sobre o sistema modelado pois ele já foi verificado. Estamos interessados em um efeito estático, pois queremos saber o valor da resposta de simulação $r=e/t$ ao fim de um período T de simulação, no caso $T=4000s$, para os parâmetros de configuração típicos e para as condições de operação padrão $\vec{x}_0=(x_{1,0},x_{2,0},\dots,x_{19,0})$, já descritos em 4.6. Assim, para $n=n_0$ qualquer e fixa dos os parâmetros de configuração, a resposta $r(T)$, do modelo de simulação no tempo de simulação T é uma função das 19 condições ambientais

$$r(T) = r(x_1, x_2, \dots, x_{19} ; s) ,$$

onde s é a semente dos números aleatórios, requerida pelo modelo estocástico.

Como estamos trabalhando com um modelo estocástico de simulação, então a resposta $r(T)$, em um tempo de simulação T , pode ser vista como uma variável aleatória para cada especificação permissível das condições ambientais. Por exemplo, nas condições normais de operação do sistema simulado

$$\vec{x}_0 = (x_{1,0}, x_{2,0}, \dots, x_{19,0}) ,$$

o conjunto de todas as respostas possíveis (cada uma sendo consequência de cada valor diferente atribuído a s) pode ser representado em um histograma de frequência, e assim se torna sig

nificativo presumir a existência de uma função densidade de probabilidade $f_r(x)$ e, naturalmente, uma função de distribuição cumulativa $F_r(x)$ para a resposta de simulação. Analogamente, funções de densidade e de distribuição cumulativa são apropriadas para as respostas de simulação para outras condições ambientais.

$r(T)$ é assumida como sendo uma função contínua de cada uma das suas condições ambientais quantitativas, isto é, se x_K é um parâmetro de entrada contínuo, então

$$\lim_{\Delta x_K \rightarrow 0} [r(x_1, x_2, \dots, x_{K-1}, x_K + \Delta x_K, x_{K+1}, \dots, x_{19}; s) - r(x_1, x_2, \dots, x_K, \dots, x_{19}; s)] = 0$$

$$\forall K, K=1, 2, \dots, 19.$$

A semente dos números aleatórios, s , não produz tal comportamento na resposta do modelo, e assim é separada do conjunto de parâmetros de entrada, chamados de condições ambientais.

Se o modelo de simulação for iterado N vezes com as mesmas condições ambientais $\vec{x}_0$ e para N sementes diferentes e selecionadas independentemente $s_1, s_2, \dots, s_N$, então a j -ésima iteração produzirá uma resposta de simulação $r_j(T)$. O conjunto das N respostas, representado pelo vetor $r_1, r_2, \dots, r_N$, constitui uma amostra aleatória de tamanho N da função densidade de probabilidade $f_r(x)$ das respostas de simulação em $\vec{x}_0$.

A média das respostas de simulação em $\vec{x}_0$ é

$$E[r(T)] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_r(x) dx \equiv \mu,$$

e a variância das respostas de simulação em $\vec{x}_0$ é

$$\text{Var}[r(T)] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f_r(x) dx \equiv \sigma^2.$$

$e_1, e_2, \dots, e_N$ constitui uma amostra aleatória de tamanho N de uma distribuição binomial, e $r_1, r_2, \dots, r_N$ pode ser considerada como uma amostra aleatória de tamanho N de uma distri

buição normal.

Para estimar os valores de μ e σ^2 devemos empregar a amostra aleatória $(r_1, r_2, \dots, r_N)$ das respostas de simulação. Assim, uma estimativa para a média real μ pode ser dada pela média aritmética das respostas independentes, ou seja

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j \equiv \bar{r}$$

Como $\bar{\mu} \equiv \bar{r}$ depende de N ela é apenas uma estimativa para μ . De fato, o estimador $\bar{\mu}$ é uma variável aleatória e é uma estatística, por ser uma transformação de N variáveis aleatórias $r_1, r_2, \dots, r_N$.

$N\bar{\mu} = (r_1 + r_2 + \dots, r_N)$ é esperada ter uma função de densidade de probabilidade que pode ser aproximada pela distribuição normal, não importando a distribuição de r_j (veja o teorema do limite central [5]). Além do mais, desde que qualquer múltiplo de uma variável aleatória normalmente distribuída é também normalmente distribuída, a estatística

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} (N\bar{\mu}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j$$

pode ser esperada ter uma distribuição normal, devido ao fato que os r_j são obtidos de observações independentes de uma função de densidade de probabilidade comum, $f_r(x)$.

Pode-se verificar que $E(\bar{\mu}) = \mu$, ou seja, a estatística $\bar{\mu}$ é um estimador não tendencioso de μ .

Pode-se verificar também que

$$\text{Var}(\bar{\mu}) = \frac{\sigma^2}{N}.$$

Assim:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P[|\bar{\mu} - \mu| > \epsilon] = 0$$

$$\forall \epsilon > 0.$$

Porisso, $\bar{\mu}$ é denominado estimador consistente (ele tende a

"melhorar" com o aumento de N).

A estratégia adotada para se obter o valor de n (número) para o qual $P\{E > 3s\} < 0,03$ é a seguinte:

a) Escolhe-se $n=n_0=240$, ou seja, $n=4C$, pois tem-se 4CL's e cada CL com 60 canais ($C=60$).

b) Sejam: $n_{1,j}$ = número máximo de registros ocupados no OCA número 1 na iteração j e $n_{2,j}$ = número máximo de registros ocupados no OCA número 2 na iteração j . Faz-se, então, N iterações do modelo de simulação para as condições de operação padrão $\vec{x}_0$ e para os parâmetros de configuração típicos, escolhendo-se s_j , para cada iteração, aleatoriamente e independentemente (sem permitir repetições). Teremos então que o valor ótimo de n , $\bar{n}$, será:

$$\bar{n} = \max_{1 \leq j \leq N} \{ \max_{1 \leq j \leq N} n_{1,j}, \max_{1 \leq j \leq N} n_{2,j} \}.$$

N deve ser escolhido de tal maneira a se ter intervalos de confiança para a média e para a variância das respostas de simulação significativos e a um nível de confiança pré-determinado, $1-\alpha = 0,95$, por exemplo.

Para a determinação de um intervalo de confiança para a média das respostas de simulação temos que ter uma estimativa para a variância das respostas de simulação σ^2 , pois esta não é conhecida.

Uma estimativa para a variância σ^2 pode ser computada pela estatística

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (r_j - \bar{r})^2,$$

onde
$$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j.$$

Independente da forma de distribuição para as respostas $r(T)$ e da forma de distribuição de S^2 , o valor médio de S^2 é dado por

$$E(S^2) = \sigma^2 ,$$

ou seja, S^2 é um estimador não tendencioso para a variância σ^2 . S^2 é obtida de uma amostra aleatória de uma distribuição normal e, assim, $(N-1)S^2/\sigma^2$ tem a distribuição "Qui-quadrado" com $N-1$ graus de liberdade. Além do mais, S^2 e $\bar{\mu}$ são independentes.

Como se sabe, a variável aleatória

$$T = Z/(\chi^2/K)^{1/2} ,$$

onde Z é a variável normal padrão distribuída independentemente de χ^2 , a variável "Qui-quadrada" de K graus de liberdade, tem a distribuição t de Student com K graus de liberdade.

Tendo em vista que o estimador $\bar{\mu}$ é distribuído normalmente, a variável aleatória

$$Z \equiv (\bar{\mu} - \mu)/(\sigma/\sqrt{N})$$

é a variável normal padrão de média zero e variância um, pois pode ser mostrado que $E(Z)=0$ e $Var(Z)=1$. Podemos definir, então, a variável aleatória

$$T = \frac{(\bar{\mu} - \mu)/(\sigma/\sqrt{N})}{\{(N-1)S^2/[\sigma^2(N-1)]\}^{1/2}} = \frac{\bar{\mu} - \mu}{(S/\sqrt{N})} ,$$

onde S é a raiz quadrada positiva da estatística S^2 , e ela tem a distribuição t de Student, com $N-1$ graus de liberdade. Consequentemente, podem ser feitas expressões de probabilidade da forma

$$P[-t_{K, \alpha/2} < T < t_{K, \alpha/2}] = (1-\alpha) ,$$

onde α está entre 0 e 1 e onde $t_{K, \beta/2}$ é o valor à esquerda do qual $100(1-\beta)\%$ da distribuição t de Student de K graus de liberdade reside. Em particular, após computar $\bar{\mu}$ e S^2 das N respostas de simulação r_j , podemos escrever que

$$P[\bar{\mu} - (St_{N-1, \alpha/2}/\sqrt{N}) < \mu < \bar{\mu} + (St_{N-1, \alpha/2}/\sqrt{N})] = (1-\alpha)$$

Assim, temos determinado o intervalo

$$(\bar{\mu} - St_{N-1, \alpha/2} / \sqrt{N}, \bar{\mu} + St_{N-1, \alpha/2} / \sqrt{N}) ,$$

para a média μ das respostas de simulação.

Para a determinação de um intervalo de confiança para a variância das respostas de simulação usamos o fato que $(N-1)S^2/\sigma^2$ tem a distribuição "Qui-quadrado" de $N-1$ graus de liberdade. Conseqüentemente, um intervalo de confiança apropriado é definido pela equação probabilística

$$P[(N-1)S^2/\chi^2_{N-1, \alpha/2} < \sigma^2 < (N-1)S^2/\chi^2_{N-1, 1-\alpha/2}] = (1-\alpha),$$

onde $\chi^2_{N-1, \beta}$ é um número real tal que 100(1- β)% das variáveis χ^2 de $(N-1)$ graus de liberdade estão à sua esquerda.

4.9 - RESULTADOS OBTIDOS

Para $N=30$ iterações do modelo, cada iteração j com s_j escolhido aleatoriamente e independentemente, os principais resultados estão mostrados na Tabela 4.1.

Através da Tabela 4.1 verifica-se que

$$\bar{n}_1 = \max_{1 \leq j \leq 30} \{n_{1,j}\} = 60$$

$$\text{e } \bar{n}_2 = \max_{1 \leq j \leq 30} \{n_{2,j}\} = 60$$

Portanto, $\bar{n}$ será igual a

$$\bar{n} = \max_{1 \leq j \leq 30} \{\bar{n}_1, \bar{n}_2\} = 60$$

Tem-se também que

$$\bar{\mu} \equiv \bar{r} = \frac{1}{30} \sum_{j=1}^{30} r_j = 0,021$$

$$\text{e } S^2 = \frac{1}{29} \sum_{j=1}^{30} (r_j - 0,021)^2 = 0,00009$$

Iteração j	n _{1,j}	n _{2,j}	$r_j = \frac{c_j}{t_j}$	$(r_j - \bar{r})^2$
1	58	51	0,006	0,00023
2	50	54	0,009	0,00015
3	53	56	0,010	0,00012
4	53	57	0,022	0,000001
5	50	58	0,015	0,00004
6	51	51	0,027	0,00003
7	55	51	0,025	0,00001
8	48	53	0,037	0,00025
9	50	57	0,017	0,00002
10	48	48	0,029	0,00006
11	54	55	0,027	0,00003
12	54	53	0,016	0,00003
13	53	59	0,020	0,000001
14	47	54	0,017	0,00002
15	50	57	0,019	0,000005
16	51	51	0,043	0,00048
17	52	47	0,027	0,00003
18	50	50	0,016	0,00003
19	50	50	0,019	0,000005
20	52	51	0,035	0,00019
21	51	52	0,013	0,00007
22	50	54	0,029	0,00006
23	60	59	0,014	0,00005
24	53	53	0,022	0,000001
25	53	54	0,010	0,00012
26	51	60	0,012	0,00008
27	57	56	0,017	0,00002
28	51	51	0,012	0,00008
29	51	55	0,028	0,00005
30	48	51	0,040	0,00035
$\sum_{j=1}^{30} r_j = 0,635$				$\sum_{j=1}^{30} (r_j - \bar{r})^2 = 0,00266$

42291Bc/

Tabela 4.1

Assim, $S=0,010$.

Através de uma tabela de distribuição t de Student de K graus de liberdade, verifica-se que $t_{29;0,025}=2,0452$. Usando o fato que

$$P[\bar{\mu} - (St_{29;0,025}/\sqrt{30}) < \mu < \bar{\mu} + (St_{29;0,025}/\sqrt{30})] = 0,95$$

tem-se

$$P[0,021 - (0,010 \cdot 2,0452/\sqrt{30}) < \mu < 0,021 + (0,010 \cdot 2,0452/\sqrt{30})] = 0,95$$

ou seja

$$P[0,018 < \mu < 0,025] = 0,95.$$

Temos então determinado o intervalo $(0,018;0,025)$ para a média μ das respostas de simulação, com 95% de confiança.

Através de uma tabela de distribuição "Qui-quadrado" de v graus de liberdade, verifica-se que

$$\chi^2_{29;0,025} = 45,722$$

$$e \quad \chi^2_{29;0,975} = 16,047$$

Usando o fato que

$$P[29S^2/\chi^2_{29;0,025} < \sigma^2 < 29S^2/\chi^2_{29;0,975}] = 0,95$$

tem-se

$$P[29 \cdot 0,00009/45,722 < \sigma^2 < 29 \cdot 0,00009/16,047] = 0,95,$$

ou seja

$$P[0,00006 < \sigma^2 < 0,00017] = 0,95$$

Temos então determinado o intervalo $(0,00006 ; 0,00017)$ para a variância σ^2 das respostas de simulação com 95% de confiança.

4.10 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS

A estimativa para $P[E > 3s]$ é feita, no modelo, como sendo igual a $r_j = e_j/t_j$, onde e_j é igual ao número total de chamadas (internas ou de saída) que aguardaram mais que $3s$ para receber o tom de discar e t_j é igual ao número total de chamadas (internas ou de saída) que receberam o tom de discar, na j -ésima iteração do modelo. Os valores s_j , $j=1,2,\dots,N$, são escolhidos aleatoriamente e independentemente, a cada iteração j (sem permitir repetições). Considerando-se o critério para a determinação de $\bar{n}$, o número ótimo de registros de cada OCA, como sendo

$$\bar{n} = \max_{1 \leq j \leq N} \{ \max_{1 \leq j \leq N} n_{1,j} , \max_{1 \leq j \leq N} n_{2,j} \} ,$$

onde $n_{i,j}$ é o número máximo de registros ocupados no OCA número i , $i=1,2$, na iteração j ($j=1,2,\dots,N$), chegou-se à conclusão que $\bar{n}=60$. Para esse valor de $\bar{n}$ verificou-se que

$$P[0,018 < \mu < 0,025] = 0,95 ,$$

expressão probabilística que é lida propriamente como: "de todos os intervalos cujos extremos são computados como 0,018 e 0,025, aproximadamente 95% deles incluirão a média desconhecida da distribuição normal da qual se extraiu uma amostra aleatória de tamanho 30 e foram computadas as estatísticas $\bar{\mu}$ e S^2 ". Com relação à variância σ^2 verificou-se que

$$P[0,00006 < \sigma^2 < 0,00017] = 0,95 ,$$

expressão probabilística com significado análogo ao da anterior.

O critério para a determinação de $\bar{n}$ poderia, em um caso geral, não ser o melhor critério a ser adotado. Aqui ele foi adotado, pois, reparando na Tabela 4.1, vemos que não houve grande variabilidade nos valores de $n_{1,j}$ e $n_{2,j}$. Se houvesse grande variabilidade poder-se-ia correr o risco de superdimensionar o sistema se adotássemos o referido critério para a determinação de $\bar{n}$.

Pode-se testar também a validade da suposição da normalidade das respostas de simulação. Sob a hipótese de que μ é a média real, a equação

$$t = \frac{(\bar{r} - \mu)\sqrt{N}}{S} ,$$

e os valores de $\bar{r}$ e S derivados da amostra ($\bar{r}=0,021$ e $S=0,010$), nos habilita a calcular t . Através de uma tabela que forneça os valores de t com probabilidade P de ser excedido em uma amostra aleatória, de uma população normal com uma média μ , verificamos o valor de P . Se P é menor que 0,05, concluímos que nosso valor de t é significativo; se for menor que 0,01, que é altamente significativo.

Considerando o critério de qualidade de serviço $P \leq 3s < 0,03$, podemos afirmar, então, baseado no modelo de simulação, que, se cada OCA possuir 60 registros, esse critério será satisfeito, pois, se fizermos a hipótese nula $H_0: \mu = 0,03$, teremos que

$$t = \left[\frac{(0,021 - 0,03)\sqrt{30}}{0,010} \right] = -4,93$$

$$\Rightarrow |t| > t_{29;0,01} = 2,462 ,$$

ou seja, devemos rejeitar a hipótese H_0 em favor da hipótese $H_1: \mu < 0,03$, com um grau de confiança superior a 99%.

Notando que $(N-1)S^2/\sigma^2$ tem a distribuição "Qui - quadrado" com $(N-1)$ graus de liberdade e que S^2 e $\bar{r}$ são estatisticamente independentes, desde que os r_j são independentes e normalmente distribuídos, consequentemente, um teste de hipótese nula $H_0: \mu=M$ apropriado pode ser feito considerando-se a estatística:

$$T = \frac{(\bar{r}-M)^2/(\sigma^2/N)}{[(N-1)S^2/(N-1)\sigma^2]} = \frac{(\bar{r}-M)^2}{(S^2/N)} ,$$

que tem a distribuição F de Snedecor de 1 e $(N-1)$ graus de liberdade, quando o teste de hipótese nula é verdadeiro. Novamente, valores grandes do teste estatístico podem ser presumidos que sejam devidos a um desvio significativo entre o valor observado $\bar{r}$ da média das respostas e o valor M . Daí, a região crí

tica é definida como o conjunto dos números reais,

$$\mathcal{R} = \{t/t < c \ ,$$

onde $P[F_{1,N-1} > c] = \alpha \ ,$

e a hipótese nula é rejeitada se o valor computado T excede c .
Portanto, se fizermos a hipótese nula $H_0:\mu=0,03$, teremos:

$$T = \frac{(0,021 - 0,03)^2}{(0,00009/30)} = 27,00$$

Mas, a região crítica é, nesse caso

$$\mathcal{R} = \{t/T > 7,60 \ ,$$

onde $P[F_{1,29} > 7,60] = 0,01\}.$

Portanto, $c = 7,60 < T = 27,00$, e a hipótese nula $H_0:\mu=0,03$ é rejeitada em favor da hipótese $H_1:\mu < 0,03$, com um grau de confiança superior a 99%.

CAPÍTULO 5

ESTIMATIVA DO GRAU DE SERVIÇO DA REDE DE
COMUTAÇÃO DE UMA CENTRAL AUTOMÁTICA DE PEQUENO PORTE

5.1 - INTRODUÇÃO

Entende-se por central telefônica automática de pequeno porte aquela destinada a atender pequenas localidades ou zonas rurais. Deve ter a capacidade de cerca de 1000 terminais de assinantes.

Como já foi visto anteriormente, grau de serviço é uma medida objetiva de desempenho. Diz-se que o grau de serviço por perda de uma rede de comutação é a probabilidade de se perder uma chamada por inexistência de meios disponíveis na rede para o escoamento da mesma.

Durante a fase de definição da estrutura física da rede de comutação de uma central de pequeno porte a ser desenvolvida, sentiu-se a necessidade de se possuir um instrumento de avaliação do grau de serviço de qualquer configuração que se quisesse implementar da rede. Mais especificamente, dever-se-ia ter um instrumento de avaliação da probabilidade de se perder uma chamada por congestionamento na rede, para um dado tráfego oferecido, na hora de maior movimento.

Em virtude da complexidade do sistema de comutação, optou-se pela criação de um modelo que simulasse o funcionamento de uma dada estrutura da rede de comutação. Foi, então, implementado um modelo dinâmico de simulação, utilizando a linguagem SIMULA, no "DECsystem-10", da UNICAMP.

5.2 - DESCRIÇÃO SUMÁRIA DA ESTRUTURA FÍSICA PROPOSTA PARA A CENTRAL

5.2.1 - INTRODUÇÃO

A configuração proposta para a central, que deve atender cerca de 1000 assinantes, é do tipo modular, onde em cada módulo são ligados os terminais de assinante ou os terminais de tronco. Em um determinado módulo ou só se ligam terminais de assinante ou só se ligam terminais de tronco. Veja a Fig. 5.1.

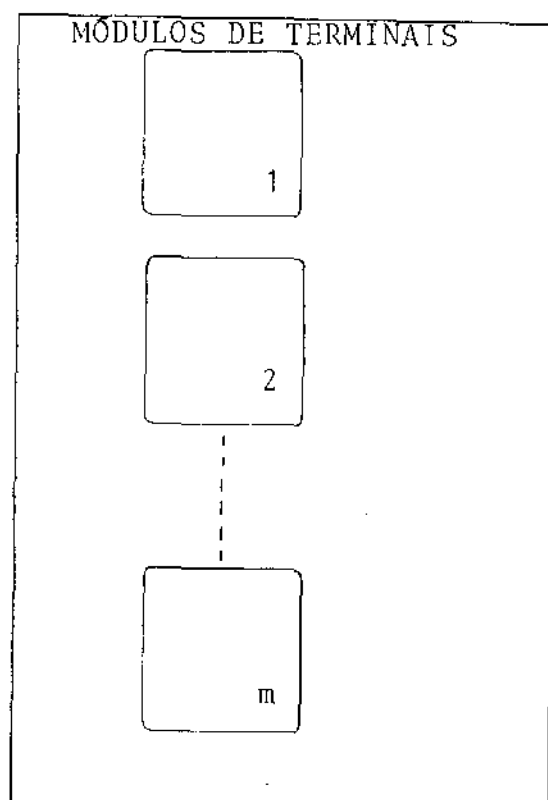


Fig. 5.1 - Central de pequeno porte com m módulos de terminais

Um módulo é composto pelos seguintes blocos básicos:

- a) Placas de terminais (de assinante ou de tronco)
- b) Interface de controle de terminais (ICT)
- c) Interface de acesso ao plano de canais (IPC)
- d) Módulo de comutação (MOC)

Um módulo genérico é esboçado na Fig. 5.2.

Existem n ICT's por módulo e deve-se ter $n \leq 4$. Um conjunto de p placas de terminais (de assinante ou de tronco) liga-se a uma ICT através de uma interface padrão, que serve para a comunicação entre as placas e a ICT. Deve-se ter $p \leq 8$ e a terminais de assinante por placa de terminais de assinante e t_r terminais de tronco por placa de terminais de tronco. Cada ICT faz o controle dos eventos dos terminais a ela conectados e troca sinalização com outras ICT's, possibilitando a interconexão de terminais para a realização de uma chamada telefônica. Em uma chamada interna devem ser ligados 2 terminais de assii

nante, e em uma chamada de entrada ou de saída, devem ser ligados um terminal de assinante e um terminal de tronco. A comunicação entre ICT's (sinalização) e entre terminais (por canais de voz) é feita através de um entre 2 planos de canais disponíveis. Cada plano é controlado por um MOC e a interface entre o MOC e o grupo de ICT's do módulo é feita por uma IPC. O MOC faz a comutação dos canais de voz e controla a sinalização entre as ICT's.

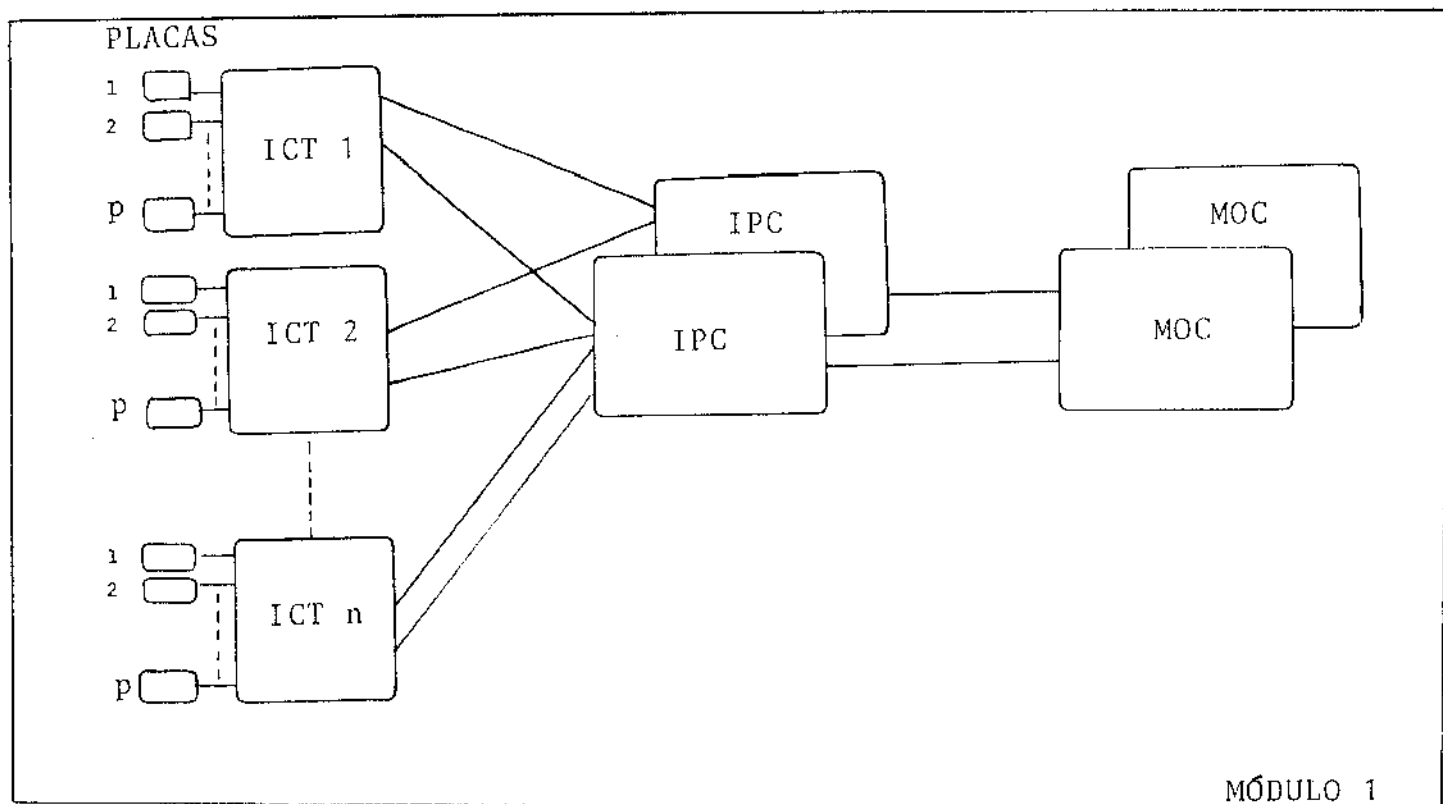


Fig. 5.2

5.2.2 - ESTRUTURA DOS CAMINHOS INTERNOS DE VOZ

Pelo fato de se ter p placas de terminais de assinante ligadas a cada ICT, e em cada placa a terminais ligados, tem-se um total de pa terminais de assinante conectados a cada ICT. Essa ICT oferece um enlace de c canais de voz, numerados de 1 até c , ao conjunto de terminais a ela conectados. Tem-se que $pa > c$ e todos os terminais têm acesso pleno aos c canais. Existe também o canal de número 0 do enlace, mas este é dedicado pa

ra a transmissão do tom de ocupado ou de congestionamento para os terminais de assinante, não sendo, portanto, utilizado como canal de voz. A Fig. 5.3 esboça um ICT de terminais de assinante.

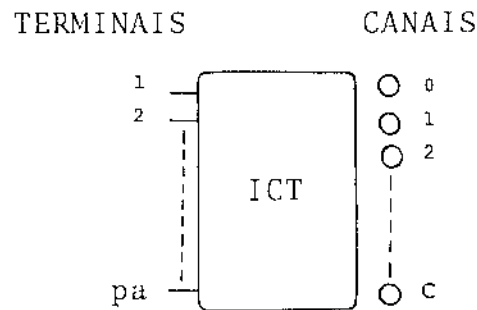


Fig. 5.3 - ICT de terminais de assinante
($p_a > c$)

Como existem t_r terminais de tronco ligados a cada placa de terminais de tronco, e existem p placas, então tem-se um total de $p t_r = t$ terminais de troncos ligados a uma ICT de troncos. Nessa ICT os canais de voz são dedicados, isto é, existe um canal de voz para cada terminal de tronco. O enlace, nesse caso, é, então, de t canais de voz. A Fig. 5.4 esboça uma ICT de terminais de tronco.

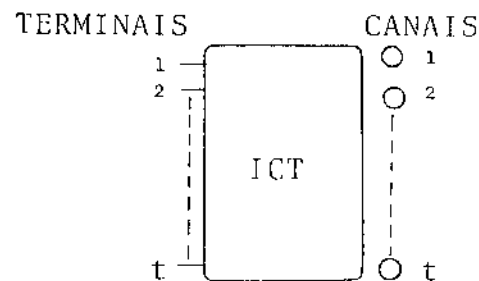


Fig. 5.4 - ICT de terminais de tronco

Associado a cada enlace de voz, existe também um enlace de dados, dados estes que são utilizados na comunicação entre duas ICT's.

Uma ICT e uma IPC não realizam comutações de canal de voz e, assim, para se estabelecer uma comunicação entre dois terminais quaisquer é necessário que, tanto do lado de origem como do lado de destino, exista pelo menos um caminho livre até um mesmo MOC. Um caminho livre até um MOC consiste de um par de canais, ICT-IPC e IPC-MOC, de mesma numeração. Havendo caminho livre, o MOC realiza a conexão bidirecional entre o lado origem e o lado destino. Consideremos, a título ilustrativo, o caso em que um terminal de assinante conectado a uma certa ICT de origem deseja se conectar a um terminal de uma ICT de destino, sendo que ambas as ICT's pertencem a um mesmo módulo. O ICT de origem, ao detectar que um terminal a ele conectado deseja se comunicar com outro de uma ICT de destino, informa esse fato ao MOC e verifica quais são os canais do seu enlace que estão livres. Informa esse fato, via IPC, ao MOC associado ao plano I de canais. O MOC, então, verifica quais são os canais livres do plano I. O primeiro par de canais livres e de mesma numeração (um canal do ICT e outro do plano I), se existir, é tomado pelo MOC. Se não existir tal par o MOC informa esse fato ao ICT de origem, que informa, então, ao MOC associado ao plano II de canais quais são os canais livres do seu enlace. Esse MOC verifica, então, quais são os canais livres do plano II. O primeiro par de canais livres e de mesma numeração (um canal do ICT de origem e outro do plano II), se existir, é tomado pelo MOC. Se não existir tal par também, está caracterizado um caso de congestionamento e este fato é comunicado ao ICT de origem, que envia, então, o tom de congestionamento ao terminal solicitante. Em caso de haver um par de canais livres e de mesma numeração, por exemplo ICT de origem - plano I, o MOC correspondente solicita ao ICT de destino os canais livres do seu enlace. O ICT de destino envia, então, essa informação. O primeiro par de canais livres (um do plano I e outro do ICT de destino), se existir, é então tomado pelo MOC, ou seja, é completada a conexão bidirecional. O terminal do ICT de origem pode, então, "conversar" com o terminal do ICT de destino. A Fig. 5.5 ilustra a descrição feita.

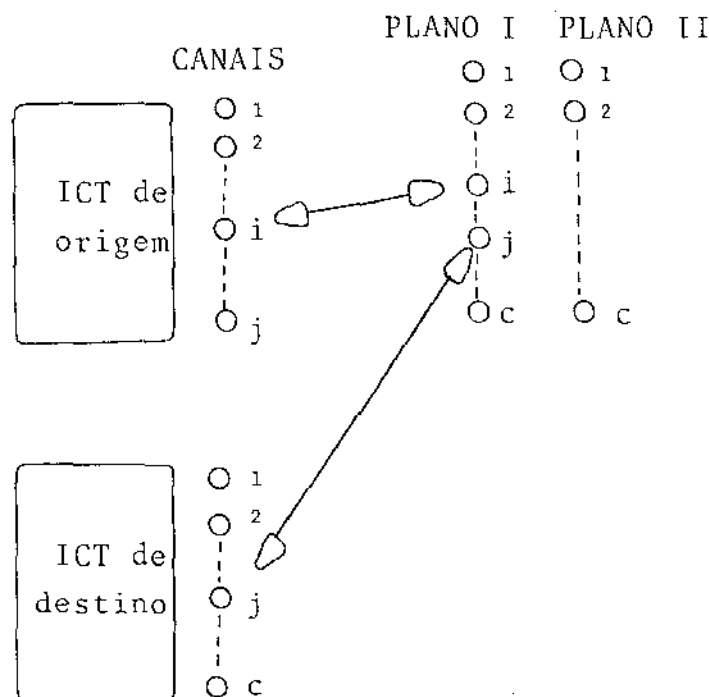


Fig. 5.5 - Conexão bidirecional entre terminais

Fisicamente, entre uma ICT e uma IPC, os enlaces de voz e dados são separados, contendo ambos 32 canais de 8 bits na taxa de 2,048 Mb/s. Na IPC, os enlaces de voz e dados são multiplexados com entrelaçamento de bits, na taxa de 4,096 Mb/s e enviados ao MOC.

Estimativas preliminares indicaram que o tempo gasto na busca de cada par ICT-plano é da ordem de $50 \cdot 10^{-6}$ s.

5.3 - DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE COMUTAÇÃO

A central deve tratar chamadas internas, chamadas de entrada e chamadas de saída. Lembramos que uma chamada é considerada interna, ou local, quando os assinantes chamador (A) e chamado (B) pertencem ambos à própria central. É considerada de entrada quando o chamador (A) pertence a uma outra central, e de saída quando o chamado (B) pertence a uma outra central.

Para uma melhor compreensão da estrutura de comutação para os três tipos de chamada, é conveniente representar os módulos de terminais de assinante e os módulos de terminais de tronco, como é feito nas Figs. 5.6 e 5.7.

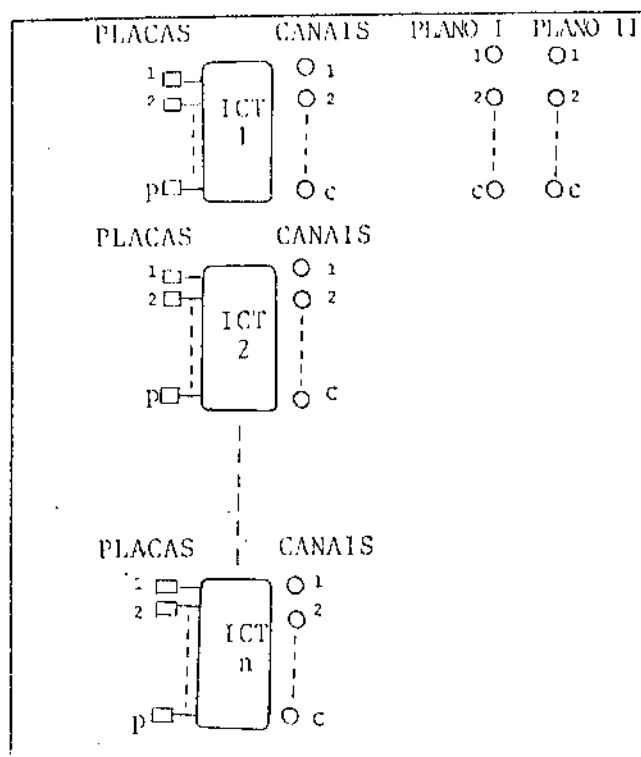


Fig. 5.6 - Módulo de terminais de assinante

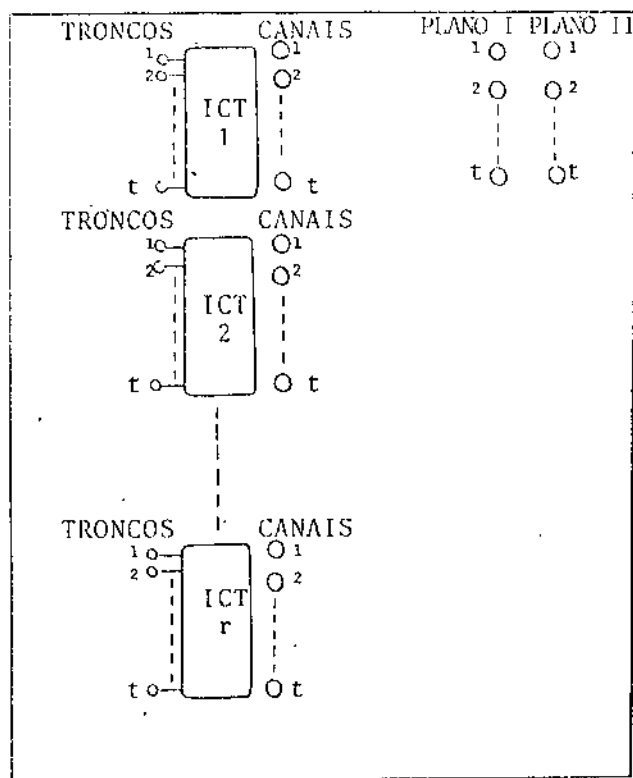


Fig. 5.7 - Módulo de terminais de tronco

Em um módulo de terminais de assinante temos n ICT's, e em cada uma dessas são conectadas p placas de terminais de assinante e em cada placa são ligados a terminais. Portanto, tem-se um total de $n \cdot p \cdot a$ terminais de assinante por módulo de terminais de assinante. A cada ICT está associado um número de c canais de conversação, numerados de 1 a c . Tem-se que $p \cdot a > c$, ou seja, o número de terminais de assinante ligados a cada ICT é maior que o número de canais de conversação do enlace dessa ICT. Tem-se também, associados a cada módulo de terminais de assinante, dois planos de canais intermediários, denotados por plano I e plano II, cada um com c canais de comunicação, também numerados de 1 a c , e que são utilizados na comutação (conexão bidirecional).

Em um módulo de terminais de tronco temos r ICT's e em cada um desses são conectados t terminais de tronco. Portanto, tem-se um total de $r \cdot t$ terminais de tronco por módulo de terminais de tronco, dois planos de canais intermediários, denominados plano I e plano II, cada um com t canais, numerados de 1 a t , e que são utilizados na comutação.

A seguir, daremos a descrição das condições a serem satisfeitas em uma comutação, para todos os tipos de chamada.

5.3.1 - CONDIÇÕES A SEREM SATISFEITAS EM UMA CHAMADA INTERNA

Em uma chamada interna tem-se dois casos a considerar:

1º caso: o terminal do assinante chamador (A) e o terminal do assinante chamado (B) pertencem a um mesmo módulo.

Consideremos, por exemplo, que o terminal de A é de uma placa do ICT número i e o terminal de B é de uma placa do ICT número j , onde $i=j$ ou $i \neq j$, ou seja, os terminais podem ser de uma mesma ICT ou não. Veja a Fig. 5.8.

Para que seja feita a conexão entre os terminais de A e B, em uma 1ª tentativa, o MOC associado ao plano I tem de encontrar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do ICT i e outro do plano I, e também um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do plano I e outro do ICT j . Se a 1ª tentativa for mal sucedida, ou seja, se só o par ICT i -plano I for encontrado (este par é liberado imediatamente)

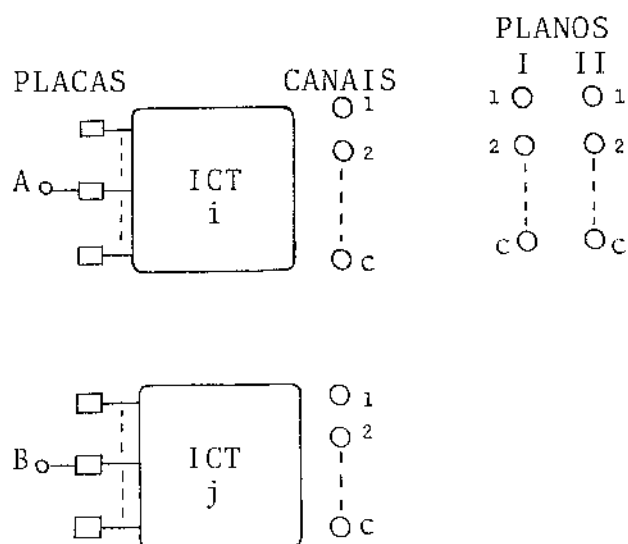


Fig. 5.8 - Chamada interna: terminais de A e B são do mesmo módulo

ou nenhum dos pares de canais for encontrado, então, em uma 2ª tentativa, o MOC associado ao plano II tenta encontrar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do ICT i e outro do plano II, e também um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do plano II e outro do ICT j. Se também a 2ª tentativa for mal sucedida, ou seja, se só o par ICT i-plano II for encontrado (este par é liberado imediatamente) ou se nenhum dos pares foi encontrado, está caracterizado um caso de congestionamento, pois não existem condições para a conexão dos terminais de A e B. Sendo qualquer uma das tentativas bem sucedida, os 2 pares de canais são tomados e pode ocorrer que:

i) o terminal de B está livre e B atende normalmente à chamada. Neste caso, os 2 pares são retidos durante todo o tempo de conversação dos assinantes.

ii) o terminal de B está livre, mas B não responde à chamada. Neste caso, os 2 pares de canais são retidos por um certo tempo que, em média, é menor que o tempo de conversação dos assinantes.

iii) o terminal de B está ocupado. Neste caso, os 2 pares de canais são imediatamente liberados.

2º caso: o terminal do assinante chamador (A) e o terminal do assinante chamado (B) pertencem a módulos distintos.

Consideremos, por exemplo, que o terminal de A é de uma placa do ICT do módulo j e o terminal de B é de uma placa do ICT k do módulo 1. Veja a Fig. 5.9.

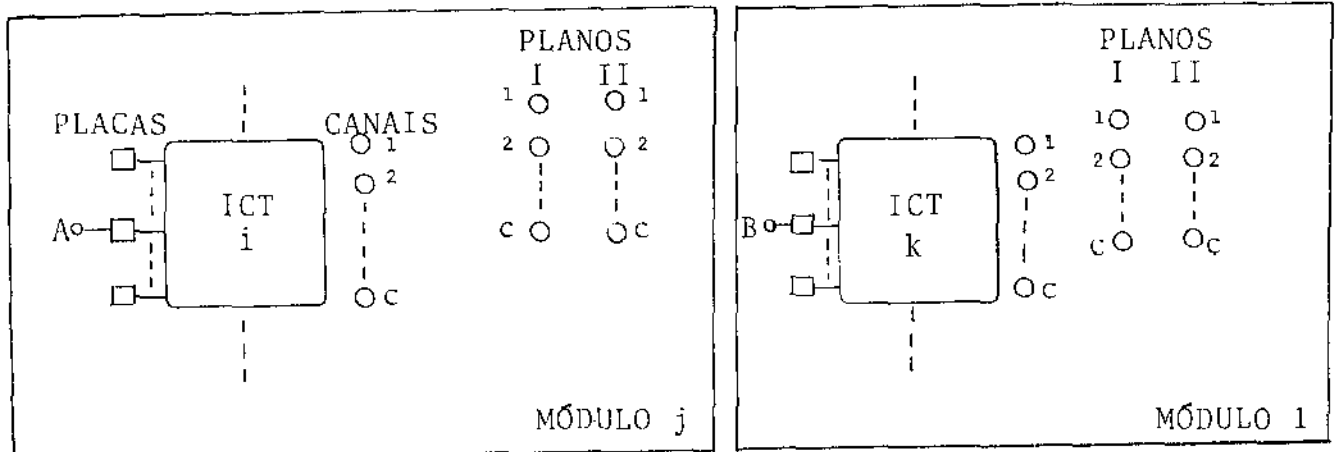


Fig. 5.9 - Chamada interna: terminais de A e B são de módulos distintos

Para que seja feita a conexão entre os terminais de A e B, em uma 1ª tentativa, o MOC associado ao plano I do módulo j tem de encontrar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do ICT i e outro do plano I, e o MOC associado ao plano I do módulo 1 tem de encontrar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do plano I e outro do ICT k. Se a 1ª tentativa for mal sucedida, ou seja, se só o par de canais ICT i-plano I for encontrado (esse par é imediatamente liberado) ou nenhum dos dois pares for encontrado, então, em uma 2ª tentativa, o MOC associado ao plano II do módulo j tem de encontrar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do ICT i e outro do plano II, e o MOC associado ao plano II do módulo 1 tem de encontrar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do plano II e outro do ICT k. Se também a 2ª tentativa for mal sucedida, ou seja, se só o par ICT i-plano II for encontrado (esse par é imediatamente liberado) ou nenhum dos dois pares for encontrado, está caracterizado um caso de congestionamento, pois não existem as condições necessá

rias para a conexão dos terminais de A e B. Se a 1ª tentativa ou a 2ª tentativa for bem sucedida, os 2 pares de canais são tomados e pode ocorrer que:

i) o terminal B está livre e B atende normalmente à chamada. Neste caso, os 2 pares são retidos durante todo o tempo de conversação dos assinantes.

ii) o terminal de B está livre, mas B não responde à chamada. Neste caso, os 2 pares de canais são retidos durante um certo tempo que, em média, é menor que o tempo de conversação dos assinantes.

iii) o terminal de B está ocupado. Neste caso, os 2 pares de canais são imediatamente liberados.

5.3.2 - CONDIÇÕES A SEREM SATISFEITAS EM UMA CHAMADA DE ENTRADA

Consideremos uma chamada de entrada que veio por um determinado módulo de terminais de tronco i e o terminal do assinante chamado (B) pertence a uma ICT j de um módulo de terminais de assinante número k. Veja a Fig. 5.10, que ilustra essa situação.

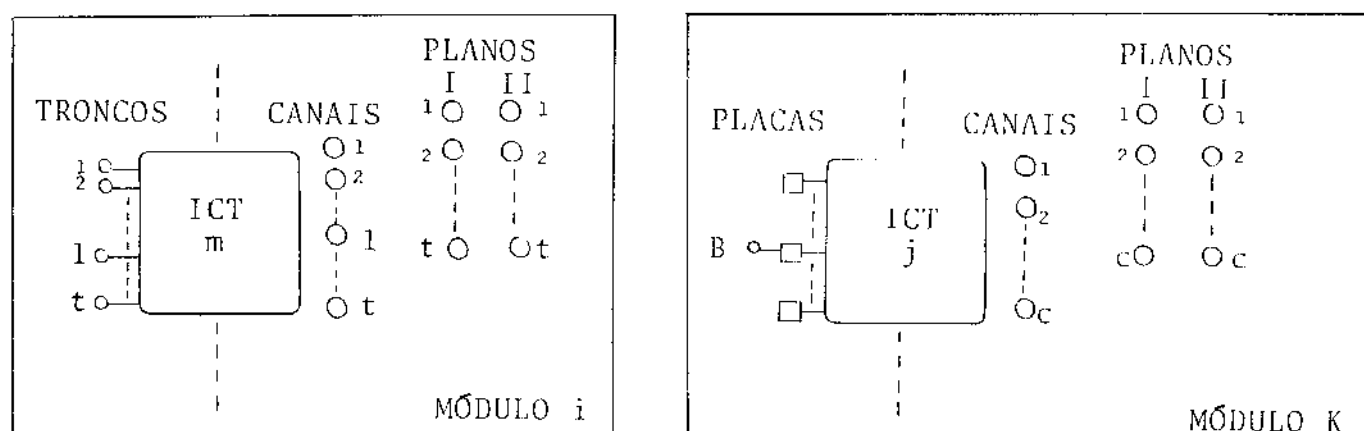


Fig. 5.10 - Chamada de Entrada

Em uma chamada de entrada, um tronco livre é tomado.

Seja esse tronco o de número 1 do ICT m do módulo i. Como a correspondência tronco:canal é 1:1 então o canal de número 1 da ICT m também está livre e é, assim, tomado. Então, em uma 1ª tentativa, o MOC associado ao plano I do módulo i verifica se o 1-ésimo canal do plano I está livre. Caso esteja, ele é tomado e o MOC associado ao plano I do módulo de terminais de assinante número k, verifica se existe um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do plano I e outro do ICT j. Se não existe esse par, o 1-ésimo canal do plano I do módulo de terminais de tronco i é liberado imediatamente e passa-se à 2ª tentativa, o mesmo ocorrendo se o 1-ésimo canal do plano I estivesse ocupado. Caso exista o par, este é tomado também e pode ocorrer que:

i) o terminal de B está livre e B atende normalmente à chamada. Neste caso, o tronco número 1 e os dois pares de canais são retidos durante todo o tempo de conversação dos assinantes.

ii) o terminal de B está livre, mas B não responde à chamada. Neste caso, o tronco número 1 e os dois pares de canais são retidos durante um certo tempo que, em média, é menor que o tempo de conversação dos assinantes.

iii) o terminal de B está ocupado. Neste caso, o tronco número 1 e os dois pares de canais são imediatamente liberados.

Na 2ª tentativa, o MOC associado ao plano II do módulo i verifica se o 1-ésimo canal do plano II está livre. Caso esteja, é tomado e o MOC associado ao plano II do módulo K verifica se existe um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do plano II e outro do ICT j. Se não existisse esse par, o canal 1 e o tronco 1 do módulo i são liberados, e está caracterizado um caso de congestionamento, o mesmo ocorrendo se o 1-ésimo canal do plano II estiver ocupado, pois não existem as condições necessárias para o estabelecimento de uma chamada de entrada. Se existir o referido par, é tomado também e pode ocorrer os mesmos casos i, ii e iii, já descritos anteriormente, para uma chamada de entrada.

5.3.3 - CONDIÇÕES A SEREM SATISFEITAS EM UMA CHAMADA DE SAÍDA

Suponhamos que seja originada uma chamada de saída em um terminal A ligado a uma ICT e de um módulo de terminais de assinante j e que existem K módulos de terminais de tronco (portanto, m-k módulos de terminais de assinante). Veja a Fig. 5.11.

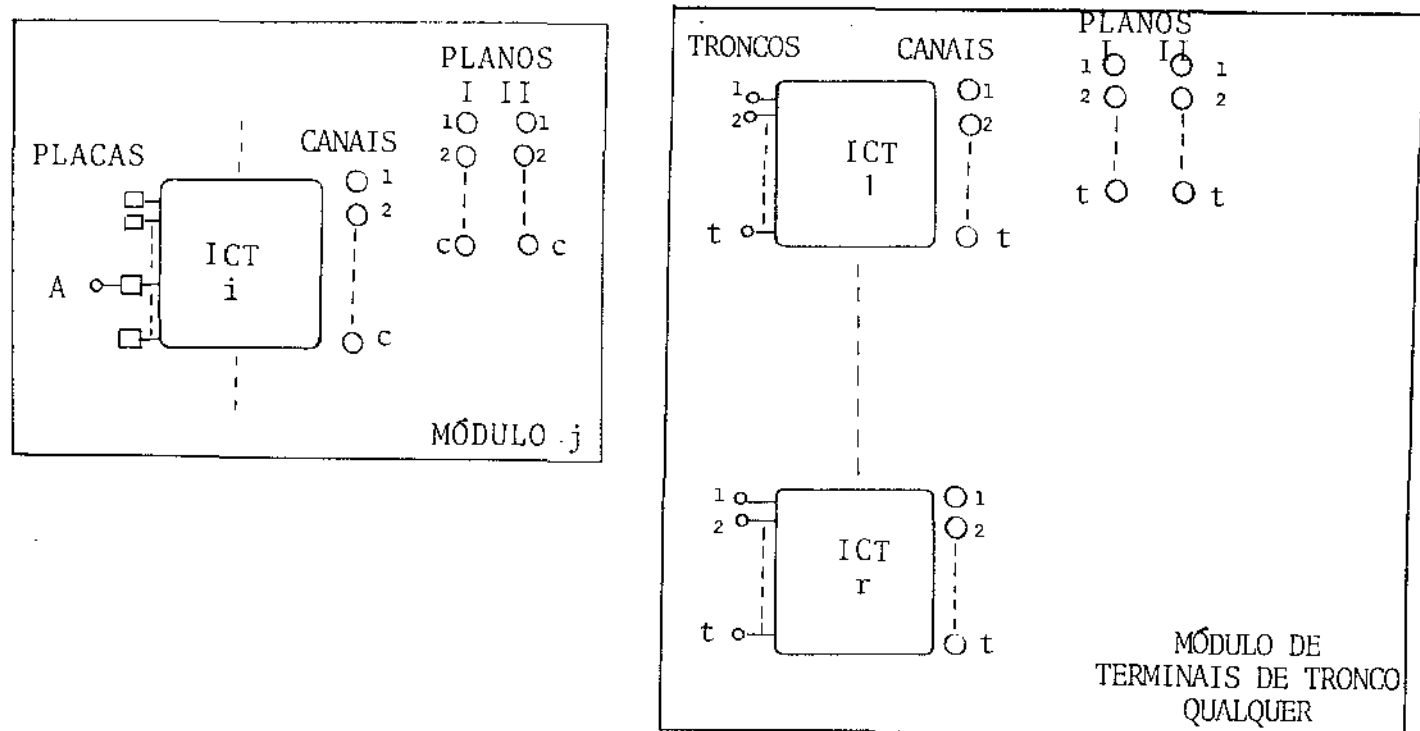


Fig. 5.11 - Chamada de Saída

Para que possa existir uma chamada de saída, em uma 1ª tentativa, o MOC associado ao plano I do módulo j deve achar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do ICT i e outro do plano I. Se esse par for encontrado, é tomado e o MOC de um dos k módulos de terminais de tronco existentes associado ao plano I deve achar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do plano I e outro de um dos r ICT's existentes. Se for achado um par desses, é também tomado, assim como o tronco associado ao canal (lembrar que a correspondência tronco:canal é 1:1), e pode ocorrer que:

i) o terminal do assinante chamado (B), que pertence a uma outra central, esteja livre e responda normalmente à cha

mada. Neste caso, os 2 pares de canais e o tronco associado permanecem retidos durante todo o tempo de conversação dos assinantes.

ii) o terminal do assinante chamado (B) esteja livre, mas B não responde à chamada. Neste caso, os 2 pares de canais e o tronco associado permanecem retidos durante um certo tempo que é, em média, menor que o tempo de conversação dos assinantes.

iii) o terminal de B esteja ocupado. Neste caso, os 2 pares de canais e o tronco associado são imediatamente liberados.

Se não for encontrado o par de canais livres e de mesma numeração, um canal do plano I e outro de um dos r ICT's existentes de um determinado módulo de terminais de tronco, o par de canais ICTi-plano I é liberado e passa-se à 2ª tentativa, assim como se o par ICTi-plano I não fosse encontrado. A 2ª tentativa consiste de o MOC associado ao plano II do módulo j tentar encontrar um par de canais livres de mesma numeração, sendo um canal do ICT i e outro do plano II. Se não for encontrado, está caracterizada uma situação de congestionamento. Caso contrário, esse par é tomado e o MOC de um dos k módulos de terminais de tronco existentes, associado ao plano II, deve achar um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do plano II e outro de um dos r ICT's existentes. Se esse par não for encontrado, o par de canais ICTi-plano II é liberado, e está caracterizada uma situação de congestionamento em chamada de saída. Se for encontrado, esse par é tomado, assim como o tronco associado ao canal do ICT correspondente, e pode ocorrer um dos três casos i, ii ou iii, já descritos na 1ª tentativa bem sucedida para uma chamada de saída.

5.4 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DO GRAU DE SERVIÇO DA REDE DE COMUTAÇÃO

Para a determinação do grau de serviço deve ser conhecida uma estrutura particular do sistema, ou seja, devem ser fixados os valores de:

m : número total de módulos de terminais da central;
 k : número total de módulos de terminais de tronco;
 e, então, $m-k$: número total de módulos de terminais de assinante;
 n : número de ICT's por módulo de terminais de assinante;
 r : número de ICT's por módulo de terminais de tronco;
 p : número de placas de terminais por ICT;
 a : número de terminais de assinante por placa;
 t_r : número de terminais de tronco por placa, ou seja, $t = p t_r =$ número de terminais de tronco por ICT = número de canais por ICT e por plano em um módulo de terminais de tronco;
 c : número de canais por ICT e por plano em um módulo de terminais de assinante.

O problema que se tem é, então, determinar a probabilidade de perda de uma chamada por congestionamento, na hora de maior movimento, conhecendo-se uma estimativa para os valores de:

- tráfego total por terminal de assinante (originado e terminado);
- porcentagem de chamadas internas, de entrada e de saída;
- tempo médio de conversação em uma chamada interna bem sucedida, em uma chamada de entrada bem sucedida e em uma chamada de saída bem sucedida;
- tempo médio de retenção do terminal de A em uma chamada interna ou de saída, quando há congestionamento e quando o assinante B está ocupado;
- tempo médio de retenção dos canais em uma chamada interna, de entrada ou de saída, quando o assinante B não responde a uma chamada;
- probabilidade de um assinante B não responder a uma chamada;
- a probabilidade de um assinante B estar ocupado em uma chamada de saída.

5.5 - DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

5.5.1 - O OBJETO SISTEMA

O modelo matemático construído para a simulação é constituído de um objeto sistema, que contém uma classe de objetos geradores de chamadas internas, uma classe de objetos geradores de chamadas de entrada, uma classe de objetos geradores de chamadas de saída, uma classe de objetos chamadas internas, uma classe de objetos chamadas de entrada e uma classe de objetos chamadas de saída.

Os parâmetros de configuração do objeto sistema são:

$b \equiv$ número de módulos de terminais de assinante;

$z \equiv$ número de módulos de terminais de tronco;

$n \equiv$ número de ICT's de um módulo de terminais de assinante;

$m \equiv$ número de ICT's de um módulo de terminais de tronco;

$s \equiv$ número total de terminais de assinante por ICT em um módulo de terminais de assinante;

$t \equiv$ número de troncos em cada ICT de um módulo de terminais de tronco. Também representa o número de canais desse ICT e dos planos I e II;

$c \equiv$ número de canais por ICT e nos planos I e II de um módulo de terminais de assinante;

$[A]_{i,j,k} \equiv$ matriz tridimensional de variáveis booleanas que representa os terminais de assinante. Cada elemento dessa matriz, $a(i,j,k)$, representa um terminal de assinante, onde se tem:

$i=1,2,\dots,b$; $j=1,2,\dots,n$ e $k=1,2,\dots,s$.

Assim, se $a(i,j,k)=1$, então o terminal de assinante número k do ICT j do módulo de terminais de assinante i está livre. Se $a(i,j,k)=0$, então esse terminal está ocupado.

$[L]_{i,j,k} \equiv$ matriz tridimensional de variáveis booleanas que representa os canais dos módulos de terminais de assinante. Cada elemento dessa matriz, $l(i,j,k)$, representa um canal, onde se tem:

$i=1,2,\dots,b$; $j=1,2,\dots,n$ e $k=1,2,\dots,c$.

Assim, se $l(i,j,k)=1$, então o canal número k do ICT j do módulo de terminais de assinante número i está livre. Se $l(i,j,k)=0$, então esse canal está ocupado.

$[P1]_{i,j}$ e $[P2]_{i,j} \equiv$ matrizes bidimensionais de variáveis booleanas que representam, respectivamente, os planos I e II dos módulos de terminais de assinante. Cada elemento, $p1(i,j)$ e $p2(i,j)$, representa um canal, onde se tem:

$i=1,2,\dots,b$ e $j=1,2,\dots,c$.

Assim, se $p1(i,j)=1$, então o canal número j do plano I do módulo de terminais de assinante número i está livre. Se $p1(i,j)=0$, então o referido canal está ocupado. Analogamente para $p2(i,j)$.

$[R]_{i,j,k} \equiv$ matriz tridimensional de variáveis booleanas que representa os terminais de tronco e os canais de uma ICT de um módulo de terminais de tronco. Cada elemento dessa matriz, $r(i,j,k)$, representa um tronco (ou canal; a correspondência tronco; canal é 1:1), onde se tem:

$i=1,2,\dots,z$; $j=1,2,\dots,m$ e $k=1,2,\dots,t$.

Assim, se $r(i,j,k)=1$, então o terminal de tronco número k do ICT de número j do módulo de terminais de tronco i está livre. Se $r(i,j,k)=0$, então o referido terminal de tronco está ocupado.

$[T1]_{i,j}$ e $[T2]_{i,j} \equiv$ matrizes bidimensionais de variáveis booleanas que representam, respectivamente, os planos I e II dos módulos de terminais de tronco. Cada elemento dessas matrizes, $t1(i,j)$ e $t2(i,j)$, representa um canal do plano correspondente, onde se tem:

$i=1,2,\dots,z$ e $j=1,2,\dots,t$.

Assim, se $t1(i,j)=1$, então o canal número j do plano I do módulo de terminais de tronco número i está livre. Se $t1(i,j)=0$, então o referido canal está ocupado. Analogamente para $t2(i,j)$.

$T \equiv$ número total de chamadas a serem geradas em cada execução do programa;

$r \equiv$ número de relatórios de resultados a serem imprimidos em cada execução do programa;

$u \equiv$ variável inteira usada para se dar o valor inicial das sementes das distribuições de probabilidade usadas no modelo.

Os parâmetros de condições ambientais do objeto sistema são:

$x_1 \equiv$ tráfego interno originado por terminal de assinante;

$x_2 \equiv$ tráfego de entrada por tronco;

$x_3 \equiv$ tráfego de saída por tronco;

$x_4 \equiv$ tempo médio de conversação em uma chamada interna bem sucedida;

$x_5 \equiv$ tempo médio de conversação em uma chamada de entrada bem sucedida;

$x_6 \equiv$ tempo médio de conversação em uma chamada de saída bem sucedida;

$x_7 \equiv$ tempo médio de retenção do terminal de A quando há congestionamento ou B está ocupado em uma chamada interna;

$x_8 \equiv$ tempo médio de retenção do terminal de A quando há congestionamento ou B está ocupado, em uma chamada de saída;

$x_9 \equiv$ tempo médio de retenção do terminal de A e dos canais quando B não responde, em uma chamada interna;

$x_{10} \equiv$ tempo médio de retenção do terminal de A, dos canais e do terminal de tronco, quando B não responde, em uma chamada de saída;

$x_{11} \equiv$ tempo médio de retenção do terminal de tronco e dos canais, quando B não responde, em uma chamada de entrada;

$x_{12} \equiv$ probabilidade de B não responder a uma chamada;

$x_{13} \equiv$ probabilidade de B estar ocupado em uma chamada de saída;

O objeto sistema contém também as variáveis associadas aos resultados numéricos desejados na simulação, e outras variáveis auxiliares que são utilizadas pelos objetos a ele pertencentes e por ele mesmo.

O objeto sistema, ao ser ativado (no instante da execução do programa), solicita todos os dados de entrada (parâmetros de configuração e de condições ambientais), dados estes que são armazenados em locais apropriados. Em seguida, calcula os valores iniciais das sementes de todas as distribuições utilizadas no modelo, calcula todas as taxas de geração de objetos chamadas utilizadas pelos geradores, dá os valores iniciais às variáveis que representam os terminais de assinante, terminais de tronco e todos os canais do sistema, cria e ativa todos os objetos geradores de chamada. Aguarda até se esgotar o tempo de simulação, cujo limite é dado pelo valor de T , número total de chamadas a serem geradas. Apresenta os relatórios de resultados que são separados entre si pelo tempo correspondente à geração de T/r chamadas. Deve-se ter, portanto, que o resto de T/r seja nulo. É suposto que, ao se iniciar a simulação, todos os terminais e canais do sistema estejam livres. Portanto, o objeto sistema faz todas as variáveis associadas aos referidos terminais e canais iguais a 1, inicialmente. No Apêndice D é mostrado o fluxograma do objeto sistema.

5.5.2 - OS GERADORES DE CHAMADAS

Os geradores de objetos chamadas internas geram e ativam objetos chamadas internas originadas em um módulo de terminais de assinante i e terminadas em um módulo de terminais de assinante j , onde $i=1,2,\dots,b$ e $j=1,2,\dots,b$. Para cada par (i,j) existe um gerador associado, ou seja, existe um total de b^2 geradores desse tipo. Cada gerador de chamadas internas associado ao par de módulos de terminais de assinante (i,j) , após gerar e ativar um objeto chamada interna originada em i e terminada em j , incrementa o totalizador de chamadas geradas. Se esse totalizador registrar um valor igual a $k T/r$, onde $k=1,2,\dots,r$, o gerador avisa o objeto sistema que chegou o momento de se imprimir

mir um relatório. A seguir, verifica, através do objeto sistema, qual é o instante desse evento. Suponhamos que o relógio do objeto sistema registre o instante t_0 . O gerador gera, então, uma variável aleatória X com distribuição exponencial negativa cuja média é $1/\lambda_{ij}$, sendo λ_{ij} a taxa de geração de chamadas internas originada no módulo i e terminadas no módulo j ($i=1,2,\dots,b$; $j=1,2,\dots,b$), e que é função do tráfego interno originado por terminal de assinante. Supõe-se que o tráfego interno seja igualmente distribuído por todos os módulos de terminais de assinante. Assim, tem-se que $\lambda_{ij}=\lambda^i$ para todo i e j , onde

$$\lambda^i = \frac{nbs \ x_1}{x_4} .$$

Se $X=x$, por exemplo, o gerador permanece inativo até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_0+x , quando, então, é chegado o momento de uma nova geração de um objeto chamada interna. Esse gerador gera objetos chamadas internas até que o total de chamadas geradas (internas, de saída e de entrada) seja igual ao previsto T . Suas ações estão mostradas no fluxograma que se encontra no Apêndice D.

Os geradores de objetos chamadas de entrada geram e ativam objetos chamadas de entrada originadas em um módulo de terminais de tronco f e terminadas em um módulo de terminais de assinante g , onde $f=1,2,\dots,z$ e $g=1,2,\dots,b$. Para cada par (f,g) existe um gerador associado, ou seja, existe um total de bz geradores desse tipo. Cada gerador de chamadas de entrada associado ao par (f,g) , após gerar e ativar um objeto chamada de entrada originada no módulo de terminais de tronco f e terminada no módulo de terminais de assinante g , incrementa o totalizador de chamadas geradas, que é um atributo do objeto sistema. Se esse totalizador registrar um valor igual a $k T/r$, onde $k=1,2,\dots,r$, avisa o objeto sistema que chegou o momento de se imprimir um relatório de resultados. Através do relógio do objeto sistema, verifica qual é o instante desse evento. Suponhamos que esse instante seja t_0 . A seguir gera, então, uma variável aleatória Y com distribuição exponencial negativa cuja média é $1/\lambda_{fg}$, sendo λ_{fg} a taxa de geração de chamadas de entrada, que é função do tráfego de entrada por terminal de tronco. Supõe-se que

o tráfego de entrada seja distribuído igualmente por todos os módulos de terminais de tronco e de assinante. Assim, tem-se $\lambda_{fg} = \lambda^e$, para todo f e g , onde

$$\lambda^e = \frac{mzt \ x_2}{x_5} .$$

Se $Y=y$, por exemplo, o gerador permanece inativo até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_0+y , quando é chegado o momento de nova geração de um objeto chamada de entrada. Gera objetos até que o total de objetos chamadas geradas (internas, de saída e de entrada) seja igual ao previsto T . Suas ações estão mostradas no fluxograma que se encontra no Apêndice D.

Os geradores de objetos chamadas de saída geram e ativam objetos chamadas de saída originadas em um módulo de terminais de assinante i , onde $i=1,2,\dots,b$. Para cada i existe um gerador associado, ou seja, existem b geradores de objetos chamadas de saída. Cada gerador associado ao módulo i , no instante da geração de um objeto chamada de saída, escolhe aleatoriamente um número h , onde $h=1,2,\dots,n$, ou seja, escolhe aleatoriamente um ICT onde está ligado o terminal de assinante que gera uma chamada de saída. Gera e ativa então um objeto chamada de saída cuja origem é o ICT número h do módulo de terminais de assinante número i . Incrementa, a seguir, o totalizador de chamadas geradas (atributo do objeto sistema) e verifica se esse totalizador passa a registrar um valor do tipo $k \ T/r$, onde $k=1,2,\dots,r$. Se isso acontecer, avisa o objeto sistema que chegou o momento de imprimir um relatório de resultados. Suponhamos que o relógio do sistema esteja registrando um certo valor t_0 , nesse instante. Gera, então, uma variável aleatória Z com distribuição exponencial negativa cuja média é igual a $1/\lambda_i$, onde λ_i é a taxa de geração de chamadas de saída, que é função do tráfego de saída por terminal de tronco. Supõe-se que o tráfego de saída seja igualmente distribuído por todos os módulos de terminais de assinante e de tronco. Assim, tem-se que $\lambda_i = \lambda^s$ para todo i , onde

$$\lambda^s = \frac{mzt \ x_3}{x_6} .$$

Se $Z=z_0$, por exemplo, o gerador permanece inativo até que o relógio

gio do objeto sistema esteja registrando t_0+z_0 , quando é chegado o instante de uma nova geração de um objeto chamada de saída. Gera objetos chamadas de saída até que o total de chamadas geradas seja igual ao previsto, T. Suas ações estão mostradas no fluxograma que se encontra no Apêndice D.

O fato de as funções densidade de probabilidade dos intervalos de tempo entre gerações de chamadas internas, X, entre gerações de chamadas de entrada, Y, e entre gerações de chamadas de saída, Z, serem representadas por

$$f_X(t) = \lambda_{ij} e^{-\lambda_{ij}t},$$

$$f_Y(t) = \lambda_{fg} e^{-\lambda_{fg}t}$$

$$e \quad f_Z(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t}, \quad (t > 0),$$

resultou da suposição de o tráfego ser poissoniano para os três tipos de chamada.

5.5.3 - OS OBJETOS CHAMADA

Os objetos chamada (interna, de entrada e de saída) são processos cujas ações correspondem às ações dos diversos blocos do sistema: ICT, IPC e MOC, que são feitas para que se possibilite a conexão dos terminais de A e B ou de um terminal de assinante com um terminal de tronco.

Um objeto chamada interna, no instante em que é gerado e ativado pelo gerador correspondente, recebe deste a informação de qual é o módulo de origem (M) e qual é o módulo de destino (N), isto é, qual o módulo onde está o terminal de A e qual o módulo onde está o terminal de B. M e N são parâmetros formais (variáveis inteiras) do objeto chamada interna. Temos então que $M=1,2,\dots,b$ e $N=1,2,\dots,b$. Se $M=N$, ou seja, se os terminais de assinante pertencerem a um mesmo módulo (M), o objeto chamada interna gera aleatoriamente dois inteiros, i e j, onde $i=1,2,\dots,n$ e $j=1,2,\dots,n$, isto é, escolhe aleatoriamente o ICT de origem (onde está o terminal de A) e o ICT de destino (onde

está o terminal de B), dentre todos os ICT's do módulo M. Considerando o ICT de origem, ou seja, o ICT i , esse objeto busca uma variável do tipo $a(M,i,k)=1$, onde k é o número do terminal desse ICT, onde $k=1,2,\dots,s$. Ou seja, busca um terminal de A que esteja livre, para que ele possa gerar uma chamada interna real. Essa busca é sequencial de início aleatório, isto é, esse objeto gera aleatoriamente um inteiro k , $k=1,2,\dots,s$, e verifica o valor de $a(M,i,k)$. Se $a(M,i,k)=1$ esse k serve. Se $a(M,i,k)=0$ e $k < s$ verifica o valor de $a(M,i,k+1)$. Se $a(M,i,k)=0$ e $k=s$ verifica o valor de $a(M,i,1)$. Continua a busca sequencialmente até achar um certo $a(M,i,k)=1$, isto é, até encontrar um terminal de assinante livre, que possa gerar uma chamada interna. Fatalmente um $a(M,i,k)=1$ será encontrado, pois $s < c$. Uma vez encontrado, faz $a(M,i,k)=0$, isto é, ocupa o terminal do assinante A. Em seguida, gera aleatoriamente um inteiro d , onde $d=1,2,\dots,s$. isto é, escolhe aleatoriamente o terminal do assinante chamado, B, e verifica se existem condições para a conexão dos terminais A e B. Ou seja, em uma 1ª tentativa, verifica se existe um par de variáveis $l(M,i,w)=1$ e $pl(M,w)=1$ outro par de variáveis $l(M,j,z)=1$ e $pl(M,z)=1$, onde $z \neq w$. Isso corresponde à verificação, pelo MOC da existência dos 2 pares de canais livres e de mesma numeração, sendo um par ICT de origem-plano I e outro par plano I-ICT de destino. Essas buscas também são do tipo sequencial de início aleatório, isto é, inicialmente w e z são gerados aleatoriamente, onde se tem $w=1,2,\dots,c$, $z=1,2,\dots,c$ e $w \neq z$. Se a 1ª tentativa for bem sucedida, esse objeto verifica se $a(M,j,d)=1$, isto é, se o terminal de B está livre. Em caso positivo, gera uma variável aleatória A, que é tal que

$$\begin{cases} P[A = 1] = 1-x_{12} , \\ P[A = 0] = x_{12} . \end{cases}$$

Se $A=1$, isto é, se o assinante B atende à chamada, faz $a(M,j,d)=0$, ou seja, ocupa o terminal de B também, e verifica, através do relatório do objeto sistema, qual é o instante desse evento. Seja t_0 esse instante. A seguir, gera uma variável aleatória Y_1 , com distribuição exponencial negativa de média x_4 , ou seja,

$$f_{Y_1}(t) = \frac{1}{x_4} e^{-1/x_4 t} , t > 0$$

Isso corresponde à suposição de o tempo de conversação em uma chamada interna bem sucedida ser uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa com média igual a x_4 . Seja $Y_1=y$, por exemplo. Então, esse objeto chamada interna permanece passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_0+y , quando é chegado o momento de liberar os terminais e os canais (fim de conversação). Nesse instante, faz $a(M,i,k)=1$, $a(M,j,d)=1$, $l(M,i,w)=1$, $p1(M,w)=1$, $l(M,j,z)=1$, $p1(M,z)=1$ e termina, isto é, libera os terminais de A e B e os canais envolvidos na conversação, e deixa de existir. Se $A=0$, isto é, se o assinante B não atende à chamada, faz $a(M,j,d)=0$, ou seja, ocupa o terminal de B também, e verifica, através do relógio do objeto sistema, qual é o instante desse evento. Seja t_1 esse instante. A seguir, gera uma variável aleatória Y_2 , com distribuição exponencial negativa de média x_9 , ou seja,

$$f_{Y_2}(t) = \frac{1}{x_9} e^{-1/x_9 t}, \quad t > 0$$

Isso corresponde à suposição de que o tempo de retenção dos terminais e dos canais em uma chamada interna, quando B não responde, é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa com média igual a x_9 . Seja $Y_2=y$, por exemplo. Então, esse objeto chamada interna permanece passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_1+y , quando então faz $a(M,i,k)=1$, $a(M,j,d)=1$, $l(M,i,w)=1$, $p1(M,w)=1$, $l(M,j,z)=1$, $p1(M,z)=1$ e termina, isto é, libera os terminais de A e B e os canais envolvidos, e deixa de existir. Isso corresponde ao fato de o assinante A desistir de esperar pelo atendimento de B, e repor o fone no gancho. Se $a(M,j,d)=0$, isto é, se o terminal de B estiver ocupado, esse objeto chamada interna faz $l(M,i,w)=1$, $p1(M,w)=1$, $l(M,j,z)=1$ e $p1(M,z)=1$, isto é, libera imediatamente os 2 pares de canais. Verifica, através do relógio do objeto sistema, qual é o instante desse evento. Seja t_2 esse instante. A seguir, gera uma variável aleatória Y_3 , com distribuição exponencial negativa de média x_7 , ou seja,

$$f_{Y_3}(t) = \frac{1}{x_7} e^{-1/x_7 t}, \quad t > 0$$

Isso corresponde à suposição de que o tempo de retenção do terminal de A quando B está ocupado em uma chamada interna, é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa com média igual a x_7 . Seja $Y_3=y$, por exemplo. Então, esse objeto chamada interna permanece passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_2+y , quando faz $a(M,i,k)=1$ e termina, isto é, libera o terminal de A e deixa de existir. Isso corresponde ao fato de o assinante A demorar um certo tempo para repor o fone no gancho após receber o tom de ocupado. Em cada um dos 3 casos: B livre e atende, B livre e não atende e B ocupado, esse objeto realiza cálculos estatísticos que são utilizados pelo objeto sistema para que este possa apresentar os resultados numéricos desejados.

Se falhar a 1ª tentativa, o objeto chamada irá verificar, em uma 2ª tentativa, se existe um par de variáveis $l(M,i,w)=1$ e $p2(M,w)=1$, e outro par de variáveis $l(M,j,z)=1$ e $p2(M,z)=1$, onde $w \neq z$. Isso corresponde à verificação, pelo MOC correspondente, da existência de 2 pares de canais livres e de mesma numeração, sendo um par ICT de origem-plano II e outro par plano II-ICT de destino. A busca desses pares também é do tipo sequencial de início aleatório. Caso a 2ª tentativa seja bem sucedida, realiza uma sequência de ações idêntica à que foi feita na 1ª tentativa bem sucedida. Se a 2ª tentativa for mal sucedida, temos caracterizado um caso de congestionamento. Esse objeto verifica, então, qual o instante desse evento, através do relógio do objeto sistema. Seja t_3 esse instante. Gera, a seguir, uma variável aleatória Y_4 , com distribuição exponencial negativa de média x_7 , ou seja,

$$f_{Y_4}(t) = 1/x_7 e^{-1/x_7 t}, \quad t > 0.$$

Isso corresponde à suposição de que o tempo de retenção do terminal de A quando há congestionamento em uma chamada interna é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa com média igual a x_7 . Seja $Y_4=y$, por exemplo. Então, esse objeto chamada interna permanece passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_3+y , quando faz $a(M,i,k)=1$ e termina, isto é, libera o terminal

nal de A e deixa de existir. Isso corresponde ao fato de o assi
nante A demorar um certo tempo para repor o fone no gancho após
receber o tom de congestionamento. Também nesse caso realiza cál
culos estatísticos necessários para o objeto sistema.

Se $N \neq M$, isto é, se o módulo de destino (onde está o
terminal de B) for diferente do módulo de origem (onde está o
terminal de A), o objeto chamada interna gera dois inteiros i e
 j aleatoriamente, onde $i=1,2,\dots,n$ e $j=1,2,\dots,n$, ou seja, esco
lhe aleatoriamente o ICT de origem e o ICT de destino. A seguir,
em uma 1ª tentativa, verifica se existe um par de variáveis
 $l(M,i,w)=1$ e $p1(M,w)=1$ e outro par de variáveis $l(M,j,z) = 1$ e
 $p1(N,z)=1$, onde w pode ou não ser igual a z . Isso corresponde à
verificação, pelos MOC's correspondentes, da existência dos 2 pa
res de canais livres e de mesma numeração, sendo um par ICT do
módulo de origem-plano I do módulo de origem e outro par plano
I do módulo de destino-ICT do módulo de destino. Se essa 1ª ten
tativa for bem sucedida, realiza uma sequência de ações análoga
à que foi feita no caso de se ter os módulos de origem e desti
no coincidentes. Se a 1ª tentativa falhar, irá verificar, em uma
2ª tentativa, se existe um par de variáveis $l(M,i,w)=1$ e $p2(M,w)=$
 $=1$ e outro par de variáveis $l(N,j,z)=1$ e $p2(N,z)=1$, onde w pode
ou não ser igual a z . Isso corresponde à verificação, pelos MOC's
correspondentes, da existência dos 2 pares de canais livres e
de mesma numeração, sendo um par ICT do módulo de origem- plano
II do módulo de origem e outro par plano II do módulo de desti
no-ICT do módulo de destino. Se essa 2ª tentativa for bem suce
dida, o objeto chamada interna realiza uma sequência de ações
análoga à que foi feita no caso da 2ª tentativa bem sucedida
quando $M=N$. Se também a 2ª tentativa for mal sucedida, está ca
racterizado um caso de congestionamento. Esse objeto verifica,
então, através do relógio do objeto sistema, qual é o instante
desse evento. Seja t_4 esse instante. Gera, a seguir, uma variá
vel aleatória Y_4 , com as mesmas características daquela no caso
de congestionamento quando $M=N$, ou seja,

$$f_{Y_4}(t) = \frac{1}{x_7} e^{-1/x_7 t}, \quad t > 0.$$

Seja $Y_4=y$. Permanece então passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do sistema esteja registrando t_4+y , quando faz $a(M,i,k)=1$ e termina, isto é, libera o terminal de A e deixa de existir (A demora um certo tempo para repor o gancho após receber o tom de congestionamento).

As ações de um objeto chamada interna estão mostradas no fluxograma que se encontra no Apêndice D.

Um objeto chamada de entrada, no instante em que é gerado e ativado pelo gerador correspondente, recebe deste o valor do módulo de terminais de tronco por onde "entra" a chamada de entrada real. Essa informação é passada através de um parâmetro formal (variável inteira) desse objeto chamada interna. Seja M o valor desse parâmetro. Esse objeto gera aleatoriamente, então, um número inteiro i , onde $i=1,2,\dots,m$, isto é, escolhe aleatoriamente o ICT desse módulo de terminais de tronco de origem. A seguir, busca uma variável $r(M,i,k)=1$, onde $k=1,2,\dots,t$. Essa busca é do tipo sequencial de início aleatório, e corresponde à busca de um terminal de tronco livre, pois só tem sentido uma chamada "entrar" em uma central através de um tronco livre. Devemos lembrar que a correspondência tronco:canal é 1:1, e é isso que a variável $r(M,i,k)$ representa. Faz então $r(M,i,k) = 0$, isto é ocupa o terminal de tronco que estava livre e o canal correspondente. O gerador que gerou esse objeto, também passou-lhe a informação de qual é o módulo onde está o terminal do assinante chamada (B), através de outro parâmetro formal (variável inteira). Seja N o valor desse parâmetro, ou seja, seja N o número do módulo de terminais de assinante de destino. Esse objeto gera, então, um inteiro j , $j=1,2,\dots,n$, e um inteiro w , $w=1, 2, \dots, s$, isto é, escolhe aleatoriamente o ICT onde está conectado o terminal de $B(j)$ e o número deste (w). Verifica, em seguida, se $t1(M,k)=1$, isto é, se o canal número k do plano I do módulo de terminais de tronco está livre (verificação feita, no sistema, pelo MOC desse módulo). Se $t1(M,k)=1$, verifica se existe um par de variáveis $l(N,j,z)=1$ e $p1(N,z)=1$, isto é, busca um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do ICT do môdulo de destino e outro do plano I do módulo de destino (verificação feita, no sistema, pelo MOC desse módulo). Caso exista esse par de variáveis com esses valores, esse objeto verifica se

$a(N,j,w)=1$, isto é, verifica se o terminal do assinante B está livre. Se $a(N,j,w)=1$, gera uma variável aleatória A, que é tal que:

$$\begin{cases} P[A = 1] = 1-x_{12} \\ P[A = 0] = x_{12} \end{cases}$$

Se $A=1$, isto é, se o assinante B atende à chamada de entrada, faz $t1(M,k)=0$, $l(N,j,z)=0$, $p1(N,z)=0$ e $a(N,j,w)=0$, ou seja, ocupa os canais envolvidos na conversação e o terminal de B. Verifica, via relógio do objeto sistema, qual é o instante desse evento. Seja t_0 esse instante. A seguir, gera uma variável aleatória Y_5 , com distribuição exponencial negativa de média x_5 , ou seja,

$$f_{Y_5}(t) = \frac{1}{x_5} e^{-1/x_5 t}, \quad t > 0.$$

Isso corresponde à suposição de o tempo de conversação em uma chamada de entrada bem sucedida, ser uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa com média igual a x_5 . Seja $Y_5=y$, por exemplo. Permanece, então, passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_0+y , quando faz $r(M,i,k)=1$, $t1(M,k)=1$, $l(M,j,z)=1$, $p1(N,z)=1$ e $a(N,j,w)=1$, e termina, isto é, libera o terminal de tronco, os canais associados na conversação e o terminal do assinante B, e deixa de existir. Se $A=0$, isto é, se o assinante B não responde à chamada, faz $t1(M,k)=0$, $l(N,j,z)=0$, $p1(N,z)=0$ e $a(N,j,w)=0$ e verifica o instante desse evento, através do relógio do objeto sistema. Seja t_1 esse instante. Gera, a seguir, uma variável aleatória Y_6 , com distribuição exponencial negativa de média x_{11} , ou seja,

$$f_{Y_6}(t) = \frac{1}{x_{11}} e^{-1/x_{11} t}, \quad t > 0.$$

Isso corresponde à suposição de o tempo de retenção dos terminais e dos canais em uma chamada de entrada em que B não responde, ser uma variável aleatória com distribuição exponencial ne

gativa com média igual a x_{11} . Seja $Y_6=y$, por exemplo. Permanece, então, passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_1+y , quando faz $r(M,i,k) = 1$, $t1(M,k) = 1$, $l(N,j,z) = 1$, $p1(N,z) = 1$ e $a(N,j,w)=1$, e termina, isto é, libera o terminal de tronco, os canais envolvidos e o terminal de B, e deixa de existir. Se $a(N,j,w)=0$, isto é, se o terminal de B estiver ocupado, faz $t1(M,k)=1$, $l(N,j,z)=1$ e $p1(N,z)=1$, e termina, isto é, libera o terminal de tronco e os canais que foram tomados, imediatamente, e deixa de existir. Se não for encontrado um par de variáveis $l(N,j,z)=1$ e $p1(N,z)=1$, o objeto verifica se $t2(M,k)=1$, isto é, se o canal número k do plano II do módulo de terminais de tronco está livre (corresponde à verificação feita pelo MOC associado ao plano II). Se $t2(M,k)=1$, verifica se existe um par de variáveis $l(N,j,z)=1$ e $p2(N,z)=1$, isto é, busca um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do ICT do módulo de destino e outro do plano II desse módulo (verificação feita pelo MOC correspondente). Caso exista esse par, realiza uma sequência de ações análoga à que foi feita no caso de sucesso no plano I. Se não existir esse par de variáveis também, faz $r(M,i,k)=1$ e termina, pois está caracterizado um caso de congestionamento (o terminal de tronco é imediatamente liberado). Em qualquer dos casos: B livre e atende, B livre e não atende, B ocupado ou congestionamento, o objeto chamada de entrada realiza cálculos estatísticos cujos resultados são utilizados pelo objeto sistema na apresentação dos relatórios desejados.

As ações de um objeto chamada de entrada estão detalhadas no fluxograma que se encontra no Apêndice D.

Um objeto chamada de saída, no instante em que é gerado e ativado pelo gerador correspondente, recebe deste a informação de qual é o módulo de origem (M) e o ICT desse módulo de origem (i), isto é, onde está o terminal de A. M e i são parâmetros formais (variáveis inteiras) do objeto chamada de saída. Gera aleatoriamente, então, um número inteiro k , onde $k = 1, 2, \dots, k$, e verifica se $a(M,i,k)=1$. Se não for, busca sequencialmente até encontrar uma variável desse tipo com esse valor (busca sequencial de início aleatório). Uma vez encontrado, faz $a(M,i,k)=0$, ou seja, o terminal de A é ocupado. Isso é feito

pois somente um terminal livre pode gerar uma chamada. Sempre vai existir uma variável do tipo $a(M,i,k)=1$ pois $s > c$, isto é, existem mais terminais do que canais em cada ICT. A seguir, busca um par de variáveis $l(M,i,w)=1$ e $p1(M,w)=1$. Isso corresponde à verificação, pelo MOC, da existência de um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do ICT i e outro do plano I do módulo de origem. Essa busca também é sequencial de início aleatório. Caso seja encontrado esse par, faz $l(M,i,w)=0$ e $p1(M,w)=0$ e verifica se existe um par de variáveis do tipo $t1(i,z)=1$ e $r(1,1,z)=1$, ou seja, se existe um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do plano I do 1º módulo de terminais de tronco e um canal do 1º ICT desse módulo, ou seja, corresponde à verificação pelo MOC correspondente, da existência de um tronco livre para que a chamada de saída possa ser escoada. Essa busca também é sequencial de início aleatório e $z=1,2,\dots,t$. Se existir esse par faz $t1(1,z)=0$ e $r(1,1,z)=0$. A seguir, gera uma variável aleatória L , que é tal que:

$$\begin{cases} P[L = 1] = 1-x_{13} , \\ P[L = 0] = x_{13} . \end{cases}$$

Se $L=1$, isto é, se o terminal de B está livre, gera uma variável aleatória A , que é tal que:

$$\begin{cases} P[A = 1] = 1-x_{12} , \\ P[A = 0] = x_{12} . \end{cases}$$

Se $A=1$, isto é, se B responde à chamada, gera uma variável aleatória Y_7 , com distribuição exponencial negativa com média igual a x_6 , ou seja,

$$f_{Y_7}(t) = \frac{1}{x_6} e^{-1/x_6 t} , \quad t > 0 .$$

Seja $Y_7=y$, por exemplo. Verifica, através do relógio do objeto sistema, qual é o instante desse evento. Seja t_0 esse instante. Permanece passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação até que o

relógio do objeto sistema esteja registrando t_0+y , quando faz $a(M,i,k)=1$, $l(M,i,w)=1$, $pl(M,w)=1$, $tl(1,z)=1$ e $r(1,1,z)=1$, e termina, isto é, libera o terminal de A, os canais envolvidos na conversação e o terminal de tronco, e deixa de existir. Isso foi feito devido à suposição de que o tempo de conversação em uma chamada de saída bem sucedida é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa com média igual a x_6 . Se $A=0$, isto é, se B não responde à chamada, gera uma variável aleatória Y_8 , com distribuição exponencial negativa de média igual a x_{10} , ou seja,

$$f_{Y_8}(t) = \frac{1}{x_{10}} e^{-1/x_{10} t}, \quad t > 0.$$

Isso é feito pois é suposto que o tempo de retenção dos terminais e dos canais em uma chamada de saída em que B não responde é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa e média igual a x_{10} . Seja $Y_8=y$, por exemplo. Verifica, através do relógio do objeto sistema, qual é o instante desse evento. Seja t_0 esse instante. Permanece, então passivo, isto é, sem realizar ação alguma, até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_0+y , quando faz $a(M,i,k)=1$, $l(M,i,w)=1$, $pl(M,w)=1$, $tl(1,z)=1$ e $r(1,1,z)=1$, e termina, isto é, libera o terminal de A, os canais envolvidos e o terminal de tronco, e deixa de existir. Isso corresponde ao fato de o assinante A desistir de esperar pelo atendimento de B e repor o fone no gancho. Se $L=0$, isto é, se o terminal de B está ocupado, faz $l(M,i,w)=1$, $pl(M,w)=1$, $tl(1,z)=1$ e $r(1,1,z)=1$ e gera uma variável aleatória Y_9 , com distribuição exponencial negativa de média igual a x_8 , ou seja,

$$f_{Y_9}(t) = \frac{1}{x_8} e^{-1/x_8 t}, \quad t > 0.$$

Seja $Y_9=y$, por exemplo. Verifica qual o instante desse evento, via relógio do objeto sistema. Seja t_1 esse instante. Permanece passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do objeto sistema esteja registrando t_1+y , quando faz $a(M,i,k)=1$, e termina, isto é, libera o terminal de A e deixa de existir. Isso é feito pois é suposto que o tempo de retenção do terminal

de A em uma chamada de saída com B ocupado, é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa com média igual a x_8 . Se não for encontrado o par $l(M,i,w)=1$ e $p1(M,w)=1$, busca um par de variáveis $l(M,i,w)=1$ e $p2(M,w)=1$, isto é, um par de canais livres e de mesma numeração, sendo um canal do ICT de origem e outro do plano II do módulo de origem. Se for encontrado esse par realiza uma sequência de ações análoga à que foi feita com relação ao plano I. Se não houver as condições necessárias com relação ao 1º módulo de terminais de tronco, o objeto chamada de saída verifica se há as condições com relação ao próximo módulo. Se não houver as condições necessárias em nenhum dos Z módulos de terminais de tronco, temos caracterizado um caso de congestionamento. Neste caso, verifica qual é o instante desse evento. Seja t_1 esse instante. Gera, então, uma variável aleatória Y_{10} , com distribuição exponencial negativa de média x_8 , ou seja,

$$f_{Y_{10}}(t) = \frac{1}{x_8} e^{-1/x_8 t}, \quad t > 0.$$

Seja $Y_{10}=y$, por exemplo. Permanece, então, passivo, isto é, sem realizar nenhuma ação, até que o relógio do sistema esteja registrando t_1+y , quando faz $a(M,i,k)=1$ e termina, isto é, libera o terminal de A e deixa de existir. Isso é feito pois é suposto que o tempo de retenção do terminal de A quando há congestionamento em uma chamada de saída, é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa com média igual a x_8 (o assinante A demora um certo tempo para repor o fone no gancho, após receber o tom de congestionamento). Em qualquer dos casos: B livre e responde, B livre e não responde, B ocupado ou congestionamento, o objeto chamada de saída efetua cálculos estatísticos, cujos resultados são utilizados pelo objeto sistema para apresentar os relatórios desejados. No Apêndice D é mostrado o fluxograma de um objeto chamada de saída, com mais detalhes.

Para qualquer tipo de objeto chamada: interna, de entrada ou de saída, o tempo gasto na busca de um par de variáveis a-p ou l-p é suposto ser constante e igual a $50.10^{-6}s$.

5.6 - DADOS NECESSÁRIOS PARA O MODELO E RESULTADOS FORNECIDOS

O modelo implementado em um programa de computador (linguagem SIMULA) necessita dos seguintes dados de entrada, que devem ser fornecidos pelo usuário do programa, à medida que forem sendo solicitados.

a) Dados de configuração

São os dados que servem para dar a configuração inicial do objeto sistema. São eles: b, z, n, m, s, t e c .

b) Dados de condições ambientais

São os dados de tráfego e constituem os parâmetros de condições ambientais a serem utilizados pelo objeto sistema. São eles: x_i , $i=1, 2, \dots, 13$.

c) Outros dados de entrada: T, r e u .

Fixado um determinado conjunto de dados de configuração, qualquer combinação viável dos dados de condições ambientais e outros dados pode ser feita. Isso possibilita se fazer uma análise de sensibilidade, como, por exemplo, verificar como varia uma determinada resposta do modelo com as variações dos três tipos de tráfego.

São os seguintes os resultados fornecidos pelo modelo, a cada instante de impressão de relatório de resultados:

- . taxas de geração de chamadas internas, de entrada e de saída (em chamadas/s);
- . número total de chamadas geradas;
- . número total de chamadas internas, de entrada e de saída geradas, com as respectivas porcentagens em relação ao total de chamadas geradas;
- . matriz de chamadas internas, de entrada e de saída geradas, módulo a módulo, com os respectivos histogramas;
- . número total de chamadas internas, de entrada e de saída completadas, com as respectivas porcentagens em relação ao total de chamadas geradas;
- . matriz das chamadas internas, de entrada e de saída

da completadas, módulo a módulo, com os respectivos histogramas;

- . número total de chamadas perdidas por congestionamento e a respectiva porcentagem em relação ao total de chamadas geradas;
- . número total de chamadas internas, de entrada e de saída perdidas por congestionamento, com as respectivas porcentagens em relação ao total de chamadas geradas de cada tipo;
- . matriz das chamadas internas, de entrada e de saída perdidas por congestionamento, módulo a módulo, com os respectivos histogramas;
- . número total de chamadas perdidas por B ocupado e por B não responde, com as respectivas porcentagens em relação ao total de chamadas geradas;
- . número total de chamadas ainda em processamento no momento da impressão do relatório e a respectiva porcentagem em relação ao total de chamadas geradas (as chamadas em processamento são as que estão em busca de condições para uma conexão de terminais ou em conversação);
- . número total de chamadas ainda em conversação no momento da impressão do relatório e a respectiva porcentagem em relação ao total de chamadas ainda em processamento;
- . número total de chamadas internas, de entrada e de saída, ainda em processamento no instante da impressão do relatório, com as respectivas porcentagens em relação ao total de chamadas geradas de cada tipo;
- . número total de chamadas internas, de entrada e de saída, ainda em conversação no instante da impressão do relatório, com as respectivas porcentagens em relação ao total de chamadas em processamento de cada tipo;
- . tempo médio de retenção efetivo dos canais em chamadas internas, de entrada e de saída (em s);

- . tráfego interno escoado por terminal de assinante (em ERL);
- . tráfego de entrada e de saída escoado por terminal de tronco (em ERL).

O resultado de interesse para o nosso problema é a porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento, que servirá como uma estimativa da probabilidade de se perder uma chamada por congestionamento, ou seja, servirá como uma estimativa do grau de serviço da rede de comutação. Os demais resultados servem para auxiliar na verificação do modelo, ou seja, para verificar sua lógica e consistência.

5.7 - VERIFICAÇÃO DO MODELO

Antes de se passar para o estágio de experimentação tem de ser feita a verificação do modelo, que já está sintetizado em um programa de computador, para estabelecer a sua credibilidade. O estágio de verificação é aquele em que se procura ver se a estrutura lógica do modelo programado está correta. A simulação pode ser vista, então, como um dispositivo entrada - saída, pois a resposta do modelo, em cada execução do programa, corresponde a uma transformação das condições ambientais (i.e., entrada) em respostas (i.e., saída).

Estamos interessados em simular uma estrutura particular do sistema de comutação. Assim, os dados de configuração são:

$b = 6$,
 $z = 2$,
 $n = 3$,
 $m = 2$,
 $s = 64$,
 $t = 30$,
 $c = 31$.

Tem-se, então, um modelo correspondente a um sistema de $bns = 6.3.64 = 1152$ terminais de assinante e $zmt = 2.2.30 = 120$ terminais de tronco. A verificação para qualquer outro conjunto de

dados de configuração se faz de maneira análoga à que foi feita para esse conjunto. Procedeu-se a verificação do modelo, considerando os seguintes passos:

19) obtenção de dados de condições ambientais

Os dados de condições ambientais que correspondem aos parâmetros de tráfego do sistema, são estimativas de dados reais, pois o sistema não está implementado na rede nacional de telecomunicações. As estimativas foram obtidas por analogia com sistemas em funcionamento. Assim, tem-se que:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,006 \text{ ERL} , \\ x_2 &= 0,49 \text{ ERL} , \\ x_3 &= 0,49 \text{ ERL} , \\ x_4 &= 155 \text{ s} , \\ x_5 &= x_6 = 300 \text{ s} , \\ x_7 &= 10 \text{ s} , \\ x_8 &= 20 \text{ s} , \\ x_9 &= x_{10} = x_{11} = 50 \text{ s} , \\ x_{12} &= 0,1 , \\ x_{13} &= 0,1 . \end{aligned}$$

29) determinação do valor de T, o número total de chamadas a serem geradas em cada execução do programa

A determinação de T é muito importante e deve ser feita para se poder desprezar o efeito das condições iniciais do modelo, pois considerou-se que o estado inicial de todos os terminais e canais do sistema é livre, o que pode não ser verdade no início da hora de maior movimento (algumas chamadas podem estar em curso). Um valor de T=2000 chamadas foi considerado altamente satisfatório e corresponde a cerca de 4000 s de tempo de simulação (maior que 1 hora, portanto). Esse valor foi obtido variando-se, a cada execução: r, número de relatórios, e u, valor para se iniciar as sementes das distribuições.

39) teste de todas as rotinas de geração de números aleatórios

Todas as rotinas de geração de números aleatórios utilizadas no modelo foram testadas em separado, uma a uma. Foram utilizadas as próprias rotinas disponíveis na linguagem SIMULA. Utilizou-se os conhecidos testes do "Qui-quadrado" e Kolmogorov-Smirnov, obtendo-se excelentes resultados. Algumas rotinas não foram testadas, pois já haviam sido testadas nos modelos descritos em capítulos anteriores.

49) análise dos resultados obtidos

Testes de consistência de alguns resultados auxiliaram na verificação do modelo. Assim:

a) do total de chamadas geradas verificou-se que aproximadamente 10% corresponderam a chamadas internas, 45% a chamadas de entrada e 45% a chamadas de saída, como era de se esperar;

b) as chamadas geradas, completadas e perdidas de qualquer tipo (internas, de entrada ou de saída) se distribuíram uniformemente por todos os módulos do sistema, como era de se esperar, pois foi suposto que as chamadas são geradas aleatoriamente em um módulo de origem e o módulo de destino também é escolhido aleatoriamente;

c) chamando de

g = total de chamadas geradas ,

g_i = total de chamadas internas geradas ,

g_e = total de chamadas de entrada geradas ,

g_s = total de chamadas de saída geradas ,

d = total de chamadas completadas ,

d_i = total de chamadas internas completadas ,

d_e = total de chamadas de entrada completadas ,

d_s = total de chamadas de saída completadas ,

p = total de chamadas perdidas por congestionamento ,

p_i = total de chamadas internas perdidas por congestionamento ,

p_e = total de chamadas de entrada perdidas por congestionamento ,

p_s = total de chamadas de saída perdidas por congestionamento ,
 o = total de chamadas em processamento ,
 o_i = total de chamadas internas em processamento ,
 o_e = total de chamadas de entrada em processamento ,
 o_s = total de chamadas de saída em processamento ,
 a = total de chamadas perdidas por B ocupado ,
 r = total de chamadas perdidas por B não responde ,
 v = total de chamadas em conversação ,
 v_i = total de chamadas internas em conversação ,
 v_e = total de chamadas de entrada em conversação ,
 v_s = total de chamadas de saída em conversação ,

verificou-se que

$$\begin{aligned}
 g &= g_i + g_e + g_s , \\
 g &= d + p + o + a + r , \\
 d &= d_i + d_e + d_s , \\
 p &= p_i + p_e + p_s , \\
 o &= o_i + o_e + o_s , \\
 v &\leq o , \\
 v &= v_i + v_e + v_s ,
 \end{aligned}$$

para qualquer execução do programa, como era esperado.

d) os tempos médios de retenção efetivos dos canais em chamadas internas, de entrada e de saída, foram os esperados teoricamente.

e) os tráfegos escoados (internos, de entrada e de saída) foram os esperados.

Foram feitas também execuções do programa variando - se os tráfegos oferecidos (interno, de entrada e de saída) e mantendo-se outros dados constantes, verificando-se que p e a são crescentes com o tráfego em um entorno do tráfego nominal ($x_1 = 0,006$; $x_2 = 0,49 = x_3$).

Foram também colocadas proteções no programa contra a entrada de dados ilegais.

Considerando todos esses fatos, levando-se em conta uma certa dose de bom-senso e também que todos os resultados numéricos obtidos foram considerados compatíveis com o que era esperado teoricamente, o modelo pode ser considerado plenamente verificado.

5.8 - PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO

5.8.1 - INTRODUÇÃO

Uma vez que o modelo foi verificado, pode-se usá-lo para se fazer inferências sobre o sistema modelado. Como estamos interessados na determinação do grau de serviço por perda da rede de comutação, ou seja, na determinação da probabilidade de se perder uma chamada por congestionamento na hora de maior movimento, estamos interessados em determinar um efeito estático. Esse efeito estático é o estado do modelo ao fim de um período estipulado de simulação, ou equivalentemente, após a observação de um número T de chamadas geradas. No caso em questão $T = 2000$ chamadas.

A estimativa de perda por congestionamento pode ser dada pelo modelo como sendo $B(T) = p/g$, considerando-se uma configuração particular do sistema $B(T)$, para T chamadas a serem geradas, é função das 13 condições ambientais $x_1, x_2, \dots, x_{13}$, ou seja:

$$B(T) = B(x_1, x_2, \dots, x_{13} ; u) ,$$

onde u é o valor para se calcular as sementes das distribuições de probabilidade, requeridas do modelo.

Os dados de configuração, no caso, são fixados em: $b=6$, $z=2$, $n=3$, $m=2$, $s=64$, $t=30$ e $c=31$, como já foi visto em 5.7. Considerando as condições normais de operação $(x_{1,0}; x_{2,0}; \dots; x_{13,0})$, onde:

$$x_{1,0}=0,006 \text{ , } x_{2,0}=0,49=x_{3,0} \text{ , } x_{4,0}=155 \text{ ,}$$

$$x_{5,0}=x_{6,0}=300 \text{ , } x_{7,0}=10 \text{ , } x_{8,0}=20 \text{ ,}$$

$$x_{9,0}=x_{10,0}=x_{11,0}=50 \text{ , } x_{12,0}=x_{13,0}=0,1 \text{ ,}$$

o conjunto de todas as respostas $B(T)$ possíveis (cada uma sendo consequência de cada valor diferente atribuído a u) pode ser representado em um histograma de frequência, e assim se torna significativo presumir a existência de uma função densidade de probabilidade $f_B(x)$ e, naturalmente, uma função de distribuição cumulativa $F_B(x)$, para a resposta da simulação. Analogamente, funções de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa são apropriadas para as respostas de simulação para outras especificações das condições ambientais.

Pode ser verificado que $B(T)$ é uma função contínua de cada uma das suas 13 condições ambientais quantitativas, isto é, para x_k , $k=1,2,\dots,13$,

$$\lim_{\Delta x_k \rightarrow 0} [B(x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, x_k + \Delta x_k, x_{k+1}, \dots, x_{13} ; u) - B(x_1, \dots, x_k, \dots, x_{13} ; u)] = 0 \text{ .}$$

A variável u é separada das condições ambientais, pois não se espera que ela produza tal comportamento na resposta do modelo.

Chamando de $\vec{x}_0 = (x_{1,0}; x_{2,0}; \dots; x_{13,0})$ a condição de operação padrão, tem-se que se o modelo for iterado N vezes para um mesmo $\vec{x}_0$ e para valores $u_1, u_2, \dots, u_N$, escolhidos aleatoriamente e independentemente, então a j -ésima iteração produzirá uma resposta $B_j(T)$. O conjunto das N respostas, representada pelo vetor $\vec{B} = (B_1, B_2, \dots, B_N)$ ou $\vec{b} = (b_1, b_2, \dots, b_N)$ constitui uma amostra aleatória de tamanho N da função densidade de probabilidade $f_B(x)$ das respostas de simulação em $\vec{x}_0$.

5.8.2 - ESTIMATIVA DA MÉDIA DAS RESPOSTAS DE SIMULAÇÃO

A média das respostas de simulação em $\vec{x}_0$ é

$$E[B(T)] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_B(x) dx \equiv \mu \text{ ,}$$

e a variância das respostas de simulação em $\vec{x}_0$ é

$$\text{Var}[B(T)] = \int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^2 f_B(x) dx \equiv \sigma^2 .$$

Supondo, pela estrutura do modelo de simulação, que a resposta é distribuída normalmente (essa hipótese será verificada posteriormente), o conhecimento dos dois momentos μ e σ^2 é suficiente para especificar a função densidade de probabilidade completamente.

Estimamos a média real μ pela média aritmética das N respostas independentes, ou seja

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N b_j \equiv \bar{b} .$$

A estatística $\bar{\mu} \equiv \bar{b}$ é um estimador não tendencioso da média μ , pois pode ser mostrado que $E(\bar{\mu}) = \mu$.

Tem-se também que $\text{Var}(\bar{\mu}) = \sigma^2/N$, e assim $\bar{\mu}$ é tanto melhor como estimativa de μ quanto maior for o tamanho da amostra. Como se tem que

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P[|\bar{\mu} - \mu| > \epsilon] = 0 , \quad \forall \epsilon > 0 ,$$

$\bar{\mu}$ é um estimador consistente.

5.8.3 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A MÉDIA DAS RESPOSTAS DE SIMULAÇÃO

A variável aleatória

$$Z = (\bar{\mu} - \mu) / (\sigma / \sqrt{N})$$

é a variável normal padrão de média zero e variância um, pois pode ser mostrado que $E[Z] = 0$ e $\text{Var}[Z] = 1$.

σ é desconhecido, e assim, tem-se de ter uma estimativa para a variância da resposta de simulação. Uma estimativa pode ser dada pela estatística

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (b_j - \bar{b})^2 ,$$

onde
$$\bar{b} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N b_j .$$

Pelo fato de $E[S^2] = \sigma^2$, S^2 é um estimador não tendencioso da variância real σ^2 .

Como as respostas b_j , $j=1,2,\dots,N$ constituem uma a mostra aleatória de uma distribuição normal, então $(N-1)S^2/\sigma^2$ tem uma distribuição "Qui-quadrado" com $N-1$ graus de liberdade. Além do mais, sob essa mesma hipótese, as variáveis aleatórias S^2 e $\bar{u}$ são independentes.

Como se sabe, a variável aleatória

$$T = Z/(\chi^2/k)^{1/2} ,$$

onde Z é a variável normal padrão distribuída independente de χ^2 , a variável "Qui-quadrada" de k graus de liberdade, tem a distribuição t de "Student" com k graus de liberdade. Pode-se definir então a variável aleatória

$$T = \frac{(\bar{u}-\mu)/(\sigma/\sqrt{N})}{\{(N-1)S^2/[\sigma^2(N-1)]\}^{1/2}} = \frac{\bar{u}-\mu}{(S/\sqrt{N})} ,$$

onde S é a raiz quadrada positiva da estatística S^2 , e ela tem a distribuição t de "Student", com $N-1$ graus de liberdade.

Assim, pode-se escrever que, para algum α entre 0 e 1

$$P[-t_{k,\alpha/2} < T < t_{k,\alpha/2}] = (1-\alpha) ,$$

onde $t_{k,\beta/2}$ é o valor à esquerda do qual se situa $100(1-\beta)\%$ da distribuição t de "Student" de k graus de liberdade. Em particular, pode-se escrever que

$$P[\bar{u}-(St_{N-1,\alpha/2}/\sqrt{N}) < \mu < \bar{u} + (St_{N-1,\alpha/2}/\sqrt{N})] = (1-\alpha),$$

expressão de probabilidade que é lida propriamente como: "de todos os intervalos cujos extremos são computados como

$$\bar{u} \pm (St_{N-1,\alpha/2}/\sqrt{N}) ,$$

aproximadamente $100(1-\alpha)\%$ deles incluirão o parâmetro desconhecido μ da distribuição normal da qual foi extraída uma amostra aleatória de tamanho N e computadas as estatísticas $\bar{\mu}$ e S^2 ."

5.8.4 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA VARIANÇA DA RESPOSTA DE SIMULAÇÃO

Desde que $(N-1)S^2/\sigma^2$ tem a distribuição "Qui-quadrado" com $(N-1)$ graus de liberdade, um intervalo de confiança apropriado é definido pela equação probabilística

$$P[(N-1)S^2/\chi^2_{N-1,\alpha/2} < \sigma^2 < (N-1/S^2)\chi^2_{N-1,1-\alpha/2}] = (1-\alpha) ,$$

onde α está entre 0 e 1 e $\chi^2_{N-1,\beta}$ é um número real tal que $100(1-\beta)\%$ das variáveis χ^2 de $(N-1)$ graus de liberdade estão à sua esquerda.

5.9 - RESULTADOS OBTIDOS

Considerando-se a estrutura particular do sistema, ou seja, fixando-se os dados de configuração em $b=6$, $z=2$, $n=3$, $m=2$, $s=64$, $t=30$ e $c=31$, foi obtida uma amostra de N respostas de simulação $b_j=(p/g).100\%$, escolhendo-se aleatória e independentemente (sem permitir repetições) N valores de u_j , para a condição de operação padrão $\vec{x}_0$. os resultados são mostrados na Tabela 5.1.

Através da Tabela 5.1 calcula-se $\bar{b}$ e S^2 , e consequentemente, S . Assim,

$$\bar{\mu} \equiv \bar{b} = \frac{1}{50} \sum_{j=1}^{50} b_j = 0,12766\% \quad (\text{média}) ,$$

$$S^2 = \frac{1}{49} \sum_{j=1}^{50} (b_j - \bar{b})^2 = 0,03129(\%)^2 \quad (\text{variança}) ,$$

EXECUÇÃO NÚMERO j	PORCENTAGEM DE CHAMADAS PERDIDAS POR CONGESTIO- NAMENTO (b_j)	$(b_j - \bar{b})^2$
1	0,21086	0,00692
2	0,00000	0,01630
3	0,20758	0,00639
4	0,00000	0,01630
5	0,00000	0,01630
6	0,00000	0,01630
7	0,10352	0,00058
8	0,10521	0,00050
9	0,05079	0,00591
10	0,30864	0,03275
11	0,41195	0,08082
12	0,20779	0,00642
13	0,00000	0,01630
14	0,10433	0,00054
15	0,20779	0,00642
16	0,89333	0,58625
17	0,00000	0,01630
18	0,26137	0,01788
19	0,00000	0,01630
20	0,00000	0,01630
21	0,41841	0,08454
22	0,15823	0,00093
23	0,10325	0,00060
24	0,15649	0,00083
25	0,47720	0,12218
26	0,05152	0,00580
27	0,00000	0,01630
28	0,05187	0,00574
29	0,15416	0,00070
30	0,25667	0,01664
31	0,00000	0,01630
32	0,00000	0,01630
33	0,16043	0,00107
34	0,00000	0,01630
35	0,10406	0,00056
36	0,00000	0,01630
37	0,16225	0,00120
38	0,00000	0,01630
39	0,10466	0,00053
40	0,58855	0,21242
41	0,10604	0,00047
42	0,00000	0,01630
43	0,10157	0,00068
44	0,05118	0,00585
45	0,00000	0,01630
46	0,00000	0,01630
47	0,05157	0,00579
48	0,00000	0,01630
49	0,05189	0,00574
50	0,00000	0,01630
$\sum_{j=1}^{50} b_j = 6,38300$		$\sum_{j=1}^{50} (b_j - \bar{b})^2 = 1,53321$

Tabela 5.1 - Porcentagem de chamadas perdidas por congestio-
namento

$$S = 0,17691\% \quad (\text{desvio padrão}) .$$

Para $\alpha=0,05$, de uma tabela de distribuição t de "Student", vê-se que $t_{49;0,025}=2,0096$.

Usando o fato que

$$P[\bar{\mu} - (St_{N-1,\alpha/2}/\sqrt{N}) < \mu < \bar{\mu} + (St_{N-1,\alpha/2}/\sqrt{N})] = 1-\alpha$$

resulta que

$$P[0,07738\% < \mu < 0,17794\%] = 0,95 ,$$

que pode ser lida como:

"de todos os intervalos cujos extremos são computados como 0,07738% e 0,17794%, aproximadamente 95% deles incluirão o parâmetro desconhecido μ da distribuição normal da qual foi extraída uma amostra aleatória de tamanho 50 e computadas as estatísticas $\bar{\mu}=0,12766\%$ e $S^2=0,03129\%^2$."

Se se considerar $b_j=p/g$, teremos então:

$$P[0,0007738 < \mu < 0,0017794] = 0,95 .$$

Pode-se calcular também um intervalo de confiança para a variância σ^2 usando o fato que

$$P[(N-1)S^2/\chi_{N-1,\alpha/2}^2 < \sigma^2 < (N-1)S^2/\chi_{N-1,1-\alpha/2}^2] = (1-\alpha) .$$

Como foi calculado, $S^2=0,03129\%^2$

mas, para tal N não nos é disponível uma tabela de $\chi_{N-1,\alpha/2}^2$ e $\chi_{N-1,1-\alpha/2}^2$, Assim sendo, temos de usar o seguinte fato:

"supondo que a variável aleatória Y tem distribuição χ_n^2 , então a variável aleatória $\sqrt{2Y}$ tem aproximadamente a distribuição $Z(\sqrt{2n-1},1)$, onde Z é a distribuição normal [29]."

Portanto, podemos escrever que

$$\begin{aligned} P[Y \leq t] &= P[\sqrt{2Y} \leq \sqrt{2t}] \\ &= P[\sqrt{2Y} - \sqrt{2n-1} \leq \sqrt{2t} - \sqrt{2n-1}] \\ &\cong Z(\sqrt{2t} - \sqrt{2n-1}) \end{aligned}$$

O valor de Z é obtido de uma tábua de distribuição normal. Assim, para $\alpha=0,05$ tem-se que $\alpha/2=0,025$ e $1-\alpha/2=0,975$. Portanto:

$$\sqrt{2t} - \sqrt{2N-1} = 1,96$$

$$\Rightarrow t = 69,72 \Rightarrow \chi^2_{49;0,025} \cong 69,7 ,$$

e também:

$$\sqrt{2t} - \sqrt{2N-1} = -1,96$$

$$\Rightarrow t = 31,12 \Rightarrow \chi^2_{49;0,975} \cong 31,1 .$$

Resulta então que

$$P[0,022\%^2 < \sigma^2 < 0,049\%^2] = 0,95 ,$$

que pode ser lido como:

"de todos os intervalos cujos extremos são computados como $0,022\%^2$ e $0,049\%^2$, aproximadamente 95% deles incluirão o parâmetro desconhecido σ^2 da distribuição normal da qual se foi extraída uma amostra aleatória de tamanho 50 e computadas as estatísticas $\bar{\mu}=0,12766\%$ e $S^2=0,03129\%^2$."

5.10 - COMENTÁRIOS FINAIS

Considerando-se a estrutura particular da rede de comutação e a condição de operação padrão $\vec{x}_0$, para as quais se quer determinar o grau de serviço, através do modelo de simulação, chegou-se à conclusão que:

$$P[0,07738\% < \mu < 0,17794\%] = 0,95$$

$$e \quad P[0,022\%^2 < \sigma^2 < 0,049\%^2] = 0,95$$

onde μ é a média e σ^2 a variância da resposta de simulação, no caso, a porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento da rede de comutação. Como o modelo de simulação só poderá ser validade completamente quando tal sistema de comutação estiver implementado e em funcionamento, podemos apenas comparar esses re

sultados com aqueles obtidos em redes de comutação análogas e que estão em funcionamento. Feito isso, pode-se tirar conclusões a respeito da eficiência do sistema de comutação que foi modelado. Para sistemas análogos, são considerados dentro dos padrões de qualidade de serviço reconhecidos internacionalmente, aqueles que nas condições de operação padrão x_0^* apresentarem uma probabilidade de perda por congestionamento, P , tal que $P < 1\%$, ou seja, grau de serviço de 1% . Considerando o nosso modelo, podemos testar a hipótese nula $H_0: \mu=1\%$. Assim, através da equação

$$|t| = \left| \frac{(\bar{b}-\mu) \sqrt{N}}{S} \right|$$

e dos valores de $\bar{b}$ e S já calculados, podemos calcular $|t|$ para $\mu=1\%$. De posse de uma tabela que forneça os valores de t com a probabilidade P de ser excedido em uma amostra aleatória, de uma população normal com uma média μ , verificamos o valor de P . Se P é menor que $0,05$ concluímos que o valor de t é significativo, se for menor que $0,01$, que é altamente significativo.

Portanto, se supuzermos que $\mu=1\%$, ou seja, $\mu=0,01$, teremos que

$$|t| = \left| \frac{(0,0012766-0,01)\sqrt{50}}{0,0017691} \right| = 34,87$$

Donde tem-se que:

$$|t| > t_{50;0,01} = 2,6778$$

ou seja, devemos rejeitar a hipótese $H_0: \mu=1\%$ em favor da hipótese $H_1: \mu<1\%$ com um grau de confiança superior a 99% . Temos, então, que o valor de t é, neste caso, altamente significativo. Podemos concluir então, através do modelo de simulação, que uma rede de comutação com a estrutura igual à que foi modelada e funcionando nas condições ambientais x_0^* , satisfará plenamente os padrões internacionalmente aceitos de qualidade de serviço, em virtude dos resultados obtidos envolvendo a média μ , que é uma estimativa da probabilidade de se perder uma chamada por congestionamento da rede de comutação, ou seja, μ é uma estimativa do grau de serviço da rede de comutação.

O modelo de simulação pode ser usado também para esti

mar o grau de serviço de qualquer outra configuração viável da rede de comutação e para condições de operação $\vec{x}$ viáveis. Para tanto, basta seguir os mesmos passos que foram feitos na análise da configuração padrão e às condições de operação $\vec{x}_0$.

Considerando que em um sistema real serão encontrados tráfegos com características variadas de tempos de retenção, e que uma função que provê mais informações sobre funções de distribuição de tempos de retenção em tráfego telefônico é a função de distribuição de Erlang com parâmetro M, ou, mais simplesmente, a função Erlang-M, é interessante verificar a influência da suposição de todos os tempos de retenção considerados no modelo serem variáveis aleatórias com distribuição de Erlang-2 (a função de Erlang-M, denotada por $F_M(t)$ é dada por

$$F_M(t) = 1 - e^{-D} \sum_{K=0}^{M-1} \frac{D^K}{K!} ,$$

onde $D=Mt/t_m$, sendo t_m o tempo médio de retenção e M o parâmetro da distribuição). Assim, obtendo m respostas $b_{2,j}$, $j=1,2,\dots,m$, considerando os mesmos dados de configuração e nas mesmas condições de operação, tendo em conta essa suposição, comparamos essas respostas com m respostas $b_{1,j}$, $j=1,2,\dots,m$, obtidas do modelo que considera os tempos de retenção com distribuição exponencial negativa. As 2m sementes são escolhidas aleatoriamente e independentemente. Sendo B_1 a resposta associada ao modelo que supõe tempos de retenção com distribuição exponencial negativa e B_2 a resposta associada àquele que supõe tempos de retenção com distribuição Erlang-2, elas podem ser comparadas por meio do teste de hipótese nula $H_0 : \Delta = E(B_1 - B_2) = 0$. Supondo que a variância seja a mesma para B_1 e B_2 , podemos estimá-la por S^2 , onde

$$S^2 = (S_1^2 + S_2^2)/2 ,$$

sendo
$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \left[\sum_{K=1}^m b_{j,k}^2 - m(\bar{b}_j)^2 \right] ,$$

onde
$$\bar{b}_j = \frac{1}{m} \sum_{K=1}^m b_{j,k} \quad (j=1,2) .$$

Podemos verificar, então, que a estatística

$$T = \frac{D^*}{(2S^2/m)^{1/2}} ,$$

onde $D^* = \bar{b}_1 - \bar{b}_2$, tem distribuição t de "Student" de $(2m-2)$ graus de liberdade. Consequentemente, um teste apropriado para o teste de hipótese nula $H_0: \Delta = 0$, é rejeitá-la quando a estatística $|T|$ excede t_α , aquele valor tal que a probabilidade de uma variável t de "Student" de $(2m-2)$ graus de liberdade excede (em valor absoluto) t_α e α (convencionalmente $\alpha=0,05$ ou $\alpha=0,01$). No nosso caso, foram obtidas $m=20$ respostas $b_{2,j}$, $j=1,2,\dots,m$, que são mostradas na Tabela 5.2.

Da Tabela 5.2 resulta que:

$$\bar{\mu}_2 \equiv \bar{b}_2 = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} b_{2,j} = 0,18205\% \quad (\text{média}) ,$$

$$S_2^2 = \frac{1}{19} \sum_{j=1}^{20} (b_{2,j} - \bar{b}_2)^2 = 0,09683\%^2 \quad (\text{variança}) .$$

Para $\alpha=0,05$, de uma tabela de distribuição t de "Student", nota-se que $t_{19;0,025}=2,093$. Como temos que $S = 0,31117$ (desvio padrão), usando o fato que

$$\begin{aligned} P[\bar{\mu}_2 - (St_{19;0,025}/\sqrt{20}) < \mu_2 < \bar{\mu}_2 + (St_{19;0,025}/\sqrt{20})] \\ = 0,95 , \end{aligned}$$

resulta que:

$$P[0,03642\% < \mu_2 < 0,32768\%] = 0,95 ,$$

expressão probabilística que pode ser lida como:

"de todos os intervalos cujos extremos são computados como 0,03642% e 0,32768%, aproximadamente 95% deles incluirão o parâmetro desconhecido μ_2 da distribuição normal da qual foi extraída uma amostra aleatória de tamanho 20 e computadas as estatísticas $\bar{\mu}_2=0,18205\%$ e $S_2^2=0,09683\%^2$."

ITERAÇÃO NÚMERO j	PORCENTAGEM DE CHAMADAS PERDIDAS POR CONGESTIO- NAMENTO ($b_{2,j}$)	$(b_{2,j} - \bar{b}_2)^2$
1	0,00000	0,03314
2	0,00000	0,03314
3	0,41602	0,05474
4	0,15699	0,00063
5	0,00000	0,03314
6	0,00000	0,03314
7	0,36496	0,03346
8	0,00000	0,03314
9	0,00000	0,03314
10	0,00000	0,03314
11	1,30081	1,25163
12	0,05208	0,01689
13	0,52466	0,11738
14	0,00000	0,03314
15	0,00000	0,03314
16	0,15456	0,00076
17	0,15568	0,00070
18	0,35934	0,03143
19	0,15584	0,00069
20	0,00000	0,03314
$\sum_{j=1}^{20} b_{2,j} = 3,64094\%$		$\sum_{j=1}^{20} (b_{2,j} - \bar{b}_2)^2 = 1,83972\%^2$

Tabela 5.2 - Porcentagem de chamadas perdidas por congestionamento (modelo onde os tempos de retenção têm distribuição Erlang-2)

Para $\alpha=0,05$, de uma tabela de distribuição "Qui-quadrado", tem-se que $\chi^2_{19;0,025}=32,852$ e $\chi^2_{19;0,975}=8,907$. Portanto, usando o fato que:

$$P[19 S_2^2/\chi^2_{19;0,025} < \sigma_2^2 < 19 S_2^2/\chi^2_{19;0,975}] = 0,95 ,$$

resulta que

$$P[0,05600\%^2 < \sigma_2^2 < 0,20655\%^2] = 0,95 ,$$

expressão probabilística que tem significado análogo ao da anterior, sendo, nesse caso, considerado o parâmetro desconhecido σ_2^2 .

Através da Tabela 5.1 , considerando 20 respostas $b_{1,j}$, $j=1,2,\dots,20$, obtém-se:

$$\bar{b}_1 = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} b_{1,j} = 0,15366\% \quad (\text{média}) ,$$

$$S_1^2 = \frac{1}{19} \sum_{j=1}^{20} (b_{1,j} - \bar{b}_1)^2 = 0,04570\%^2 \quad (\text{variança}) .$$

Portanto, $D^* = \bar{b}_1 - \bar{b}_2 = -0,02839\%$ e $S^2 = S_1^2 + S_2^2 = 0,07126\%^2$. Resulta, então, que a estatística

$$T = \frac{D^*}{(2S^2/20)^{1/2}} = -0,3363 ,$$

ou seja , $|T| = 0,3363$. Assim , não podemos aceitar a hipótese nula $H_0: \Delta = E(B_1 - B_2) = 0$ nem para um grau de confiança de 95%, nem tampouco para um de 99%. O modelo que supõe tempos de retenção com distribuição Erlang-2 fornece uma resposta pior em termos de grau de serviço, mas este é ainda satisfeito, pois de fizermos a hipótese nula $H_0: \mu = 1\%$ e considerando a estatística

$$|t| = \left| \frac{(\bar{b}_2 - \mu) \sqrt{20}}{S_2} \right| ,$$

teremos que $|t| = 11,76$, ou seja, devemos rejeitar $H_0: \mu = 1\%$.

Podemos então concluir, através desse modelo de simulação, que uma rede de comutação com a estrutura igual à que foi modelada e funcionando nas condições ambientais x_0^* e tendo tempos de retenção com distribuição Erlang-2, também satisfará o grau de serviço pré-estabelecido, pois devemos aceitar a hipótese $H_1: \mu_2 < 1\%$ a um nível de confiança superior a 99%.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Penso que esta dissertação cumpriu os seus objetivos básicos, que eram o de mostrar como a modelagem de simulação é uma atividade fortemente baseada em Ciências de Computação, Matemática, Probabilidade e Estatística, ainda que seja um processo bastante intuitivo, e como pode ser utilizada como ferramenta auxiliar na análise de sistemas de Engenharia (em particular, Engenharia de Telecomunicações), a ponto de ser dito, sem exagero, que todo analista de sistemas e pesquisador operacional deveria ser familiar com a técnica (e arte) de simulação. A título ilustrativo, reproduzimos do livro de Shannon [1], a Tabela 6.1, que mostra os resultados de uma pesquisa tomada de uma amostra de membros da "Operations Research Society of America", feita por Shannon e Biles, e a Tabela 6.2, que mostra os resultados obtidos por Weston, de uma pesquisa entre as 1000 maiores firmas dos E.U.A. (segundo a revista Fortune) sobre a importância de certas técnicas de planejamento.

TÓPICO	VALOR
Teoria de Probabilidade (e inferência estatística)	0,182
Análise Econômica	0,150
Simulação	0,143
Programação Linear	0,120
Estoques	0,097
Filas	0,085
Análise de Redes	0,072
Análise de Substituição	0,042
Teoria de Jogos	0,040
Programação Dinâmica	0,031
Técnicas de Busca	0,020
Programação Não Linear	0,018
	1,000

Tabela 6.1 - Utilidade de técnicas de Pesquisa Operacional [1]

TÓPICO	FREQUÊNCIA	%
Estudos de Simulação	60	29
Programação Linear	43	21
Análise de Redes (incluindo PERT e CPM)	28	14
Teoria de Estoques	24	12
Programação Não Linear	16	8
Programação Dinâmica	8	4
Programação Inteira	7	3
Teoria de Filas	7	3
Outros	12	6
	205	100

Tabela 6.2 - Ferramentas quantitativas mais frequentemente empregadas em planejamento [1]

Como se vê, a despeito da falta de elegância e sofisticação matemática, a simulação é uma das técnicas quantitativas mais largamente empregada na resolução de problemas de planejamento. No entanto, as cautelas mencionadas em 1.3.5 devem sempre ser levadas em consideração, quando se tem um problema a resolver. Como foi constatado neste trabalho, o desenvolvimento de um bom modelo de simulação é geralmente caro e gasta bastante tempo, mormente nas fases de verificação, planejamento e experimentação, pois têm de ser feitos muitos testes e têm que ser colhidas amostras significativas de resultados. O que se gasta de tempo de C.P.U. é algo realmente apreciável.

No Capítulo 1 foram apresentadas alguns conceitos básicos sobre Comutação Telefônica e Simulação de Sistemas. Conceitos como o de comutação temporal, conversação, sinalização, etc são imprescindíveis na compreensão de todos os problemas tratados e dos modelos desenvolvidos. O mesmo se pode dizer com respeito aos conceitos de sistemas, componentes de um sistema, estado, modelos, modelos de simulação, simulação, etapas de um estudo de simulação, etc.

No Capítulo 2 foram mostrados alguns conceitos fundamentais da Teoria do Tráfego Telefônico, que foram amplamente utilizados em todos os casos de estudo. Conceitos como os de órgão, ocupação, chamada, tráfego oferecido, tráfego escoado, hora de maior movimento, redes e centrais telefônicas, sistemas de perda e de espera, grau de serviço, etc., se revelam de suma importância no desenvolvimento de modelos de simulação de sistemas de tráfego telefônico.

Ficou claro, através dos casos de estudos apresentados, como a simulação, que não é uma teoria mas uma metodologia de resolução de problemas, depende bastante de Ciências da Computação e de um computador, pois é fundamental o conhecimento de uma linguagem específica, como SIMULA, por exemplo, para que a tradução de um modelo para uma linguagem de computação seja a melhor possível. Em virtude de todos os modelos terem sido implementados em computador usando SIMULA como linguagem de programação, no Apêndice A foram apresentadas algumas noções básicas da linguagem, imprescindíveis na construção e compreensão dos modelos, como as de bloco, classes, variáveis de referência, processos, tempo de sistema, e outras. Todos os algoritmos de geração de distribuições estatísticas utilizados foram aqueles que pertencem à própria SIMULA (a referência [6] é uma excelente indicação para um estudo aprofundado dessa linguagem), fato este que reforça ainda mais a importância do conhecimento de uma linguagem específica de simulação.

Os modelos estocásticos de simulação foram, de fato, vistos como dispositivos de entrada-saída, isto é, dão a saída (resposta) de um sistema dada a entrada para os seus sub-sistemas interagentes. Consequentemente, eles são "rodados" ao invés de "resolvidos", para se obter uma informação desejada, sendo, portanto, incapazes de gerar uma solução como o fazem os modelos analíticos; eles somente servem como uma ferramenta para a análise do comportamento de um sistema, sob condições especificadas pelo analista.

O primeiro caso de estudo, apresentado no Capítulo 3, tratou de análise de duas estruturas distintas de comutação. Foram construídos dois modelos estocásticos de simulação e com

eles foi possível analisar os desempenhos, com relação ao congestionamento da rede, fixados alguns parâmetros de tráfego e de configuração, e comparar as respostas, variando-se um dado parâmetro de configuração. Deve ser ressaltado, nesse caso, a importância dos conceitos de classe, objetos, tempo do sistema, processos, etc., utilizados na construção dos modelos. Nas fases de planejamento tático e de experimentação, principalmente, é que ficou evidenciada a importância da Matemática e Estatística, pois é imprescindível os conceitos de estimadores, não tendenciosidade, consistência, e outros, e também o conhecimento das distribuições normais, t de "Student" e de "Qui-quadrado", na análise das respostas. Ficou patente a importância dos conhecidos testes de hipótese, sem os quais não é possível a comparação das respostas dos modelos, e nem tampouco é possível verificar se um critério de qualidade de serviço é ou não satisfeito.

O segundo caso de estudo, apresentado no Capítulo 4, tratou do problema do dimensionamento de um órgão de controle de uma central de comutação, utilizado no tratamento de chamadas telefônicas (internas, de entrada e de saída). Foi possível, graças a um modelo de simulação, estabelecer o número ótimo de registros do referido órgão, fixados alguns parâmetros de condições ambientais e de configuração, para que fosse satisfeito um dado critério de qualidade de serviço. Além dos conceitos de SIMULA utilizados nos modelos do capítulo anterior, foram aqui utilizados os importantes conceitos e mecanismos de tratamento relativos a filas. Os conhecimentos estatísticos e matemáticos anteriormente referidos, foram também amplamente utilizados, nas fases de planejamento e de experimentação. Como novidade, foi utilizada a distribuição F de Snedocor. Obviamente, se o critério de qualidade de serviço fosse outro que não aquele que foi utilizado, outra análise estatístico-matemática teria de ser feita.

O terceiro e último caso de estudo, apresentado no Capítulo 5, tratou do problema da estimativa do grau de serviço por perda da rede de comutação de uma central de comutação. O problema tratado, embora análogo ao do caso de estudo do Capítulo 3, é bem mais complexo e, neste caso, se considerou os vários casos que uma tentativa de chamada pode resultar, quais sejam: chamado bem sucedida, assinante B ocupado, assinante B não res

ponde e congestionamento. Foi possível, via modelo de simulação, constatar que um determinado grau de serviço era satisfeito, fixados alguns parâmetros de configuração e de condições ambientais. Também neste caso, os conceitos de SIMULA e os conceitos estatísticos e matemáticos anteriormente referidos foram amplamente utilizados e se revelaram de suma importância. Utilizando um teste de hipótese, foi possível comparar as respostas do sistema para dois tipos distintos de distribuições de tempos de retenção: exponencial negativa e de Erlang-2.

Como ficou evidenciado em todos os casos de estudo, um modelo de simulação deve ser estruturado de tal forma que permita que os parâmetros estruturais e as condições ambientais relevantes sejam tratados como dados de entrada do programa de computador, para que qualquer combinação viável desses parâmetros possa ser testada pelo experimentador, e que possam ser feitas análises de sensibilidade do modelo às mudanças de parâmetros, permitindo diminuir a imprecisão de uma simulação, e auxiliando na verificação e validação. A estrutura do modelo deve permitir também que a alteração de uma hipótese utilizada na construção seja feita facilmente, como, por exemplo, a hipótese de que uma variável aleatória tenha uma dada distribuição de probabilidade.

APÊNDICE A

NOÇÕES BÁSICAS DE SIMULA PARA APLICAÇÃO EM
SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

A.1 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

SIMULA é uma linguagem de programação que foi desenvolvida pelos membros do Norwegian Computing Centre, de Oslo, Noruega. É uma linguagem de propósito geral que possui o ALGOL-60 como sub-conjunto. Além das facilidades oferecidas pelo ALGOL, SIMULA é especialmente dirigida para processamento de listas, manipulação de textos e simulação, através dos conceitos de classe, referência e variáveis texto e as classes dos sistemas SIMSET e SIMULATION.

SIMULA é mais que uma simples anotação para descrever processos computacionais, pois também supre a própria estrutura de trabalho, atuando como ferramenta de opinião na análise de um problema, através de conceitos próprios de criação. Para descrever sistemas, faz dois tipos de abordagem:

- a) do geral para o particular ("top-down"): análise;
- b) do particular para o geral ("bottom-up"): síntese.

A.2 - BLOCOS

Um bloco é um mecanismo da linguagem SIMULA cuja forma geral é:

```
BEGIN
    D1;D2;...;Dn ;
    S1;S2;...;Sm
END
```

onde D_i , $i=1,2,\dots,n$, são declarações e S_j , $j=1,2,\dots,m$, são comandos. Declarações e comandos são separados por (;). Depois do último comando, não é necessário o uso do (;).

As declarações de variáveis de um bloco podem estar em qualquer ordem, mas a sintaxe exige que elas estejam agrupadas no cabeçalho do bloco antes de qualquer dos seus comandos. As declarações têm por objetivo dar um tipo e um nome às variáveis. A forma geral é:

tipo da variável identificador 1, identificador 2,...

identificador K;

onde identificador i , $i=1,2,\dots,K$, são os nomes das variáveis escolhidas livremente pelo programador (com restrições da sintaxe de SIMULA, é claro) e separados por (,). Exemplos:

a) INTEGER N, M, MAX, MIN ;

Nesse caso tem-se que as variáveis N, M, MAX e MIN são do tipo inteiro.

b) REAL PRIM, ULT, S ;

Nesse caso tem-se que as variáveis PRIM, ULT e S são do tipo real.

c) BOOLEAN ALFA, BETA ;

Nesse caso, tem-se que as variáveis ALFA e BETA são do tipo "booleano", podendo assumir somente dois valores: FALSE e TRUE.

Os comandos são de vários tipos e têm por objetivo atribuir um novo valor a uma variável pré-definida.

- Comando de designação

A expressão geral é: $\text{variável} := \text{expressão}$; . Os dois sinais (:) e (=) justapostos têm o sentido de "fica sendo igual", ou seja, a variável fica sendo igual à expressão. Exemplos:

a) $N := N + 1$;

b) $\Delta := B^2 - 4 \cdot A \cdot C$;

Comando de atribuições múltiplas

A forma geral é: $U_1 := U_2 := \dots := U_n := \text{expressão}$; onde U_i , $i=1,2,\dots,n$, são n variáveis pré-definidas e de mesmo tipo. Exemplos:

a) $N := M := P := X/3 + 1$;

b) $X1 := X2 := \text{SQRT}(A^2 + 1)$;

- Comando composto

A forma geral é:

BEGIN

C_1 ;

C_2 ;

$\vdots$

C_p ;

END

onde C_j , $j=1,2,\dots,p$, são comandos quaisquer.

-Comando WHILE

A forma geral é:

WHILE condição DO comando-controlado, que é interpretado como segue:

- 1) A condição é avaliada.
- 2) Se o valor é TRUE o comando-controlado é executado e volta ao passo 1. Se o valor é FALSE o comando-controlado é pulado e o programa continua no próximo comando.

- Comando IF

Existem 2 tipos desse comando.

1º) IF condição THEN S_1 ELSE S_2 , que se entende por:

- 1) A condição é avaliada.
- 2) Se o valor é TRUE S_1 é executado e S_2 é pulado. Se é FALSE S_1 é pulado e S_2 é executado.
- 3) O próximo comando é executado.

2º) IF condição THEN S_3

- 1) A condição é avaliada.
- 2) Se o valor é TRUE S_3 é executado, se é FALSE S_3 é pulado.
- 3) O próximo comando é executado.

- Comando FOR

A forma geral é: FOR variável simples:=a STEP b UNTIL c DO comando, onde a, b e c são expressões aritméticas.

A.3 - PROCEDURES

Um "procedure" é um mecanismo da linguagem SIMULA que é utilizado quando em um programa são utilizados procedimentos repetitivos. A forma geral é:

cabeçalho

corpo

O cabeçalho é a declaração e é do tipo:

```
PROCEDURE nome do procedure (F1,F2,...,Fn);
    especificação de F1,F2,...,Fn;
```

onde F_j, j=1,2,...,n, são parâmetros formais.

O corpo é um bloco, ou seja, algo do tipo:

```
BEGIN
    declarações;
    comandos;
END;
```

As especificações não precisam estar na mesma ordem dos parâmetros formais, mas cada parâmetro formal precisa ser especificado. Para "chamar" um "procedure" simplesmente escreve-se o nome do "procedure" com a lista entre parênteses dos parâmetros atuais, que deverão corresponder aos parâmetros formais da lista em número, ordem e ser de tipos compatíveis. Se não existirem parâmetros formais basta fazer:

```
PROCEDURE nome do "procedure" ;
    BEGIN
    ...
    END;
```

e na hora de "chamá-lo" basta escrever nome do "procedure";. Exemplo: pode-se construir um histograma de uma matriz inteira definida por INTEGER ARRAY A(1:31);. Cria-se o "procedure"

```
PROCEDURE HISTOGRAMA (B,INF,SUP);
    INTEGER ARRAY B;
    INTEGER INF ; SUP;

    BEGIN
        declarações;
        ações;
    END;
```

Para se ter o histograma de A basta escrever o comando HISTOGRAMA(A,1,31);.

Existem também os "procedures" definidos dentro da própria linguagem SIMULA que correspondem a procedimentos usados tão frequentemente que são escritos e supridos como um serviço, embora isto não seja uma necessidade lógica. Constituem exemplos

plos de tais "procedures" aqueles de entrada/saída, tais como: ININT, INREAL, OUTINT, OUTFIX, OUTIMAGE, OUTTEXT, etc., e aqueles de geração de números aleatórios.

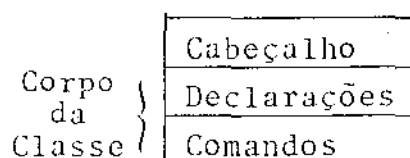
A.4 - CLASSES E VARIÁVEIS DE REFERÊNCIA

Em um programa escrito em ALGOL, quando um bloco é criado, suas ações são executadas e após isto tudo se passa como se ele deixasse de existir. Em certas ocasiões, entretanto, é necessário permanecer armazenado tudo o que foi descrito dentro de um bloco durante toda a execução do programa. Isto é possível em SIMULA através da definição de classes e de parâmetros passados por referência. Assim como um bloco, uma classe é definida num programa SIMULA e sua estrutura permanece disponível, com todas as variáveis ali definidas, podendo ser acessadas a qualquer momento. Para a definição de uma classe deve-se proceder da seguinte forma:

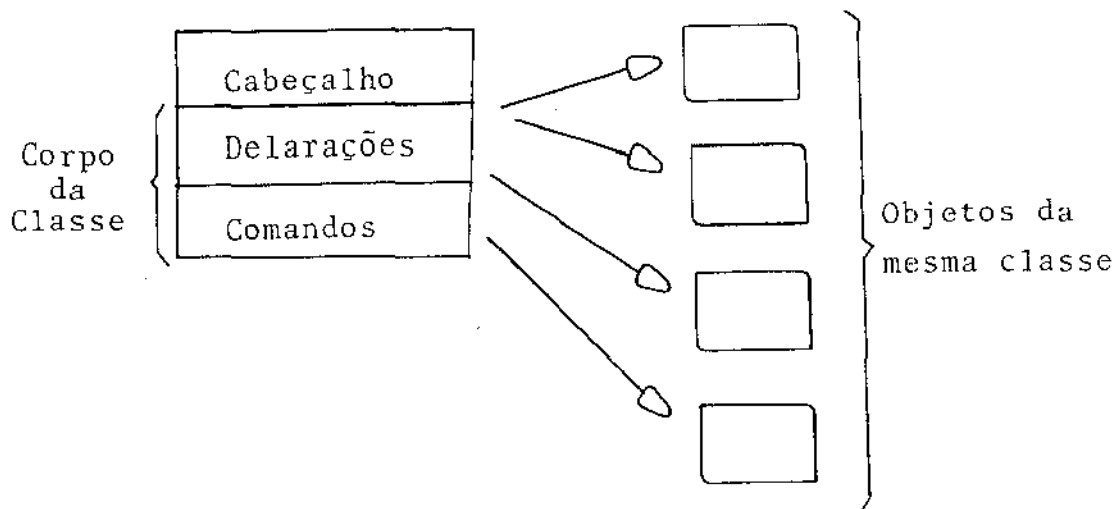
```

CLASS identificador da classe (parâmetros formais);
    especificação dos parâmetros formais;
BEGIN
    declaração 1 ;
    declaração 2 ;
    .....
    declaração n ;
    comando 1 ;
    comando 2 ;
    .....
    comando m ;
END;
```

O identificador da classe é um nome escolhido segundo as restrições da sintaxe de SIMULA. Quando não existirem parâmetros formais para uma dada classe, basta se fazer CLASS identificador da classe;. Tem-se, então, que uma classe é uma estrutura do tipo



O conceito de objeto de uma classe é análogo ao de um elemento pertencente a um conjunto. Para uma melhor compreensão, pode-se imaginar a estrutura fixa de uma classe como o conjunto, e na execução de um programa, vários objetos sendo gerados, cada um com suas características próprias, formando os elementos. Um objeto é uma cópia dinâmica do bloco chamado de corpo de classe. Ilustrando:



Cada vez que um objeto é "gerado" é feita uma cópia da estrutura da classe definida e os parâmetros atuais de cada geração distinguem, portanto, cada objeto. Assim, podem coexistir diversos objetos, com diferentes nomes, pertencentes a uma mesma classe. Um objeto, como qualquer cópia de um bloco, pode realizar operações, e tem propriedades e atributos. Os atributos de um objeto de uma determinada classe são cópias das quantidades declaradas de forma local no corpo da classe, e cópias dos parâmetros listados e especificados no cabeçalho da classe. O procedimento para se gerar um objeto de uma classe é:

```
REF (identificador da classe) nome do objeto ;
nome do objeto:=NEW identificador da classe ( parâmetros atuais) ;
```

Tem-se então que "nome do objeto" é uma variável de referência e ao declará-la, especifica-se a sua qualificação, que é a classe dos objetos da classe "identificador da classe". Essa variável pode assumir valores que são objetos dessa classe ou NONE (nenhum objeto). "Nome do objeto" deve ser escolhido le

vando-se em conta as restrições da sintaxe de SIMULA. O comando "nome do objeto":=NEW "identificador da classe (parâmetros atuais);" cria um objeto cujos parâmetros formais são os parâmetros atuais.

Para se ter acesso externo aos atributos de um objeto, utiliza-se a notação genitiva. Por exemplo, seja A: identificador de uma declaração de variável local a um corpo de uma classe, seja X: nome de um objeto dessa classe (cópia particular da quele corpo). Então, X.A denota a variável A local aquele parti^{cular} objeto X.

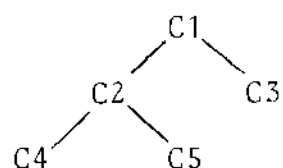
Para se especificar que existe uma hierarquia entre certas classes deve-se fazê-lo quando da definição das mesmas, utilizando-se uma prefixação:

x CLASS y ;

Nesse caso, a classe x prefixa a classe y, indicando que está em um nível hierárquico superior. Sempre que um objeto de uma classe prefixada for gerado, os parâmetros da classe prefixadora devem também ser passados, de tal forma que somente após a geração desta é que será criado o objeto da classe prefixada. Como exemplo de hierarquia de classes tem-se a seguinte sequência de declarações:

```
CLASS C1
C1 CLASS C2
C1 CLASS C3
C2 CLASS C4
C2 CLASS C5
```

onde se tem a árvore hierárquica dada por:



Existem várias maneiras de se referenciar classes hierarquizadas. Uma delas é através do operador especial QUA que expande o campo de atuação dos referenciadores, como a seguir:

referenciador QUA identificador da classe prefixada.variável;

```

Exemplo:  CLASS A ;
          A CLASS B ;
          BEGIN
            REAL x ;
            .....
            x:=2.5 ;
            .....
          END ;
          REF(A) X ;
          REF(B) Y ;
então,    X QUA B.x = 2.5.

```

Se x e y são expressões que denotam objetos, $x==y$ é TRUE se x e y referenciam o mesmo objeto, ou ambos são NONE, e FALSE em caso contrário. A negação do comparador de referência $==$ é $\neq$.

A.5 - HIERARQUIA PRÉ-DEFINIDA NO SISTEMA SIMULA

Os conceitos e procedimentos envolvidos para simulação estão declarados e definidos dentro da classe SIMSET, pré-definida no sistema. Para a aplicação em simulação, portanto, a classe SIMSET está no nível hierárquico mais elevado, e prefixa todas as demais classes utilizadas. A estrutura geral é:

```

CLASS SIMSET ;
BEGIN
  CLASS LINKAGE;...;
  LINKAGE CLASS LINK;...;
  LINKAGE CLASS HEAD;...;
END;
SIMSET CLASS SIMULATION:
  BEGIN
    LINK CLASS PROCESS;...;
  END;

```

A classe SIMULATION é prefixada por SIMSET e provê, além dos conceitos de conjunto da classe SIMSET, os conceitos de filas e componentes que passam por fases ativas e passivas, isto é, as noções de um eixo de tempo e processos (entidades que in

teragem por um período de tempo). Assim, os conceitos envolvidos em SIMULATION estão diretamente ligados a aplicações de simulação de sistemas discretos, sendo que três classes nela incluídas têm primordial importância no desenvolvimento dessas aplicações: as classes PROCESS, LINK e HEAD.

O eixo do tempo consiste de um conjunto de indicações de eventos que têm dois atributos: uma referência ao PROCESS que eles representam e o tempo de seu próximo evento escalonado. As indicações dos eventos são arranjadas de acordo com os valores da variável tempo, referenciada por EVTIME.

A classe PROCESS é utilizada para prefixar classes que contêm objetos que podem ser ativos ou passivos (objetos que podem ser "suspensos" por um certo tempo determinado ou por um tempo indefinido).

A classe LINK prefixa classes cujos objetos serão colocados e removidos de filas. HEAD serve como cabeça de fila e é o "ponto de amarração" dos elementos do conjunto fila.

A técnica empregada para o estudo do comportamento de filas, tão necessário em aplicações de simulação, é a de conjuntos. Cada conjunto é formado por um número ilimitado de elementos. Os objetos especiais empregados são:

- cabeça

A classe HEAD é prefixada no sistema e sempre que um objeto é gerado pela classe HEAD, uma nova cabeça de fila está sendo criada e, conseqüentemente, um novo conjunto.

- elemento

É o objeto gerado por classes prefixadas por LINK.

Exemplo: REF(HEAD) fila ; (declaração)

REF(LINK) x,y ; (declaração)

fila:=NEW HEAD ; (criação)

x:=NEW LINK ; (criação)

y:=NEW LINK ; (criação)

Existem procedimentos especiais para o tratamento de conjuntos e elementos, embutidos no sistema SIMULA. São procedimentos que: retornam uma referência para o primeiro (ou último)

elemento de um conjunto fila, verificam se uma fila é ou não um conjunto vazio, retornam o número de elementos de um conjunto fila, removem todos os elementos de uma fila, retornam uma referência para um elemento sucessor (ou anterior) a um dado elemento de um conjunto fila, e outros procedimentos necessários.

Os objetos gerados por classes prefixadas por PROCESS são chamados de processos. Rotinas especiais permitem que haja um controle sobre objetos dessa natureza de forma a tornar processos ativos, suspensos ou terminados. É possível determinar a criação, execução, interrupção de execução e distribuição de objetos em tempo real, através de rotinas de iteração entre os processos. Dentro de uma simulação, um processo pode estar em um dos seguintes estados:

- ativo: processo que está sendo executado. Quando essa fase termina o processo deve ser reescalonado para uma fase posterior.

- suspenso: processo que não está sendo executado e que possui um instante de tempo pré-determinado para ser ativado, ou seja, possui um alarme.

- passivo: processo que não está sendo executado e que não possui alarme (processo "dormindo").

- terminado: processo que não mais será ativado. Não possui ponto de reativação nem alarme.

Existem dois tipos de mecanismos de ativação de um objeto processo:

- a) Ativação de um objeto (passivo) por outro (ativo). Nesse caso o objeto passivo possui um ponto de reativação, que é uma referência para o primeiro comando que será executado quando for ativado.

- b) Ativação através de um relógio mestre do sistema, ao qual todos os objetos têm acesso através de comandos em sua sequência de ações. Nesse caso o sistema possui um alarme, que é o instante de tempo de simulação no qual o processo correspondente será ativado.

As ações atemporais (por exemplo, o cálculo de um algoritmo) não deveriam consumir tempo, embora o façam na realidade

durante a execução de um modelo. Para resolver este problema, o relógio do sistema é parte do modelo, e seu tempo se escoa somente quando ações que consomem tempo ocorrem em um modelo. Pode-se tirar vantagem desse fato (tempo de simulação embutido no modelo) para utilizar a velocidade de um computador reduzindo a segundos a execução das atividades de um modelo de um sistema durante um dia, por exemplo.

A linguagem SIMULA não dispõe de comandos implícitos para apagar objetos na memória, mas o faz automaticamente quando a missão de um objeto termina (execução do último comando END, objeto terminado).

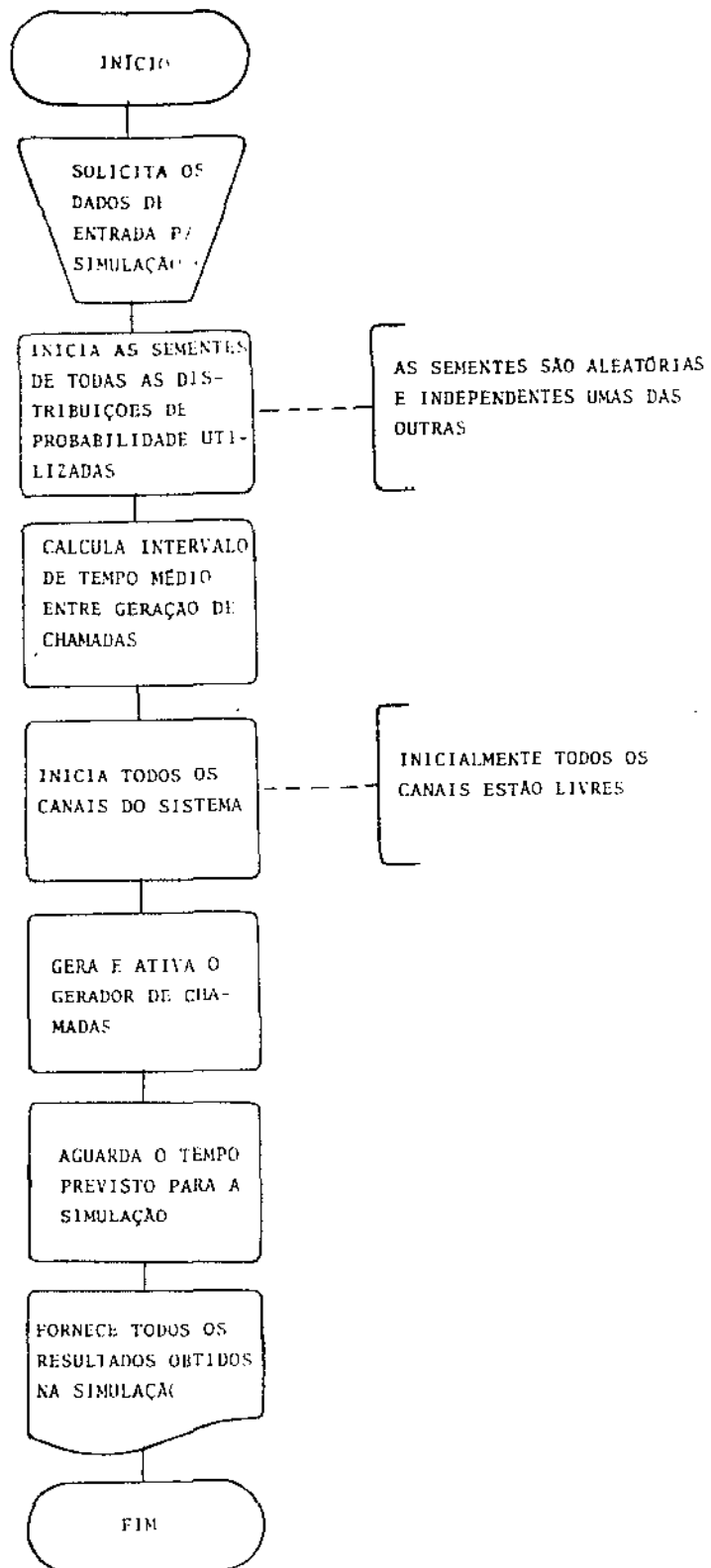
SIMULA não tem facilidades especiais para a descrição do estado inicial de um sistema. Os parâmetros de estados iniciais são dados por ações dentro do próprio objeto. Devido ao fato que um objeto deve ser gerado por outro objeto, há a necessidade de existir um objeto que possa gerar sem precisar ser gerado. É este o objeto sistema, que deve conter as informações necessárias para construir o modelo do sistema, ou seja, as variáveis e declarações das classes que são disponíveis a todos os objetos no sistema, e comandos descrevendo as condições iniciais que definem o começo do modelo. A variável TIME possui sempre o tempo do sistema, cujo valor é 0 no início e avança sempre para frente. Os objetos todos dependem do objeto sistema e não podem operar sem que todas as informações comuns estejam disponíveis. Os textos das classes estão contidas no objeto sistema; diz-se, então, que todos os objetos estão textualmente contidos no objeto sistema ou que estão dentro do objeto sistema.

APÊNDICE B

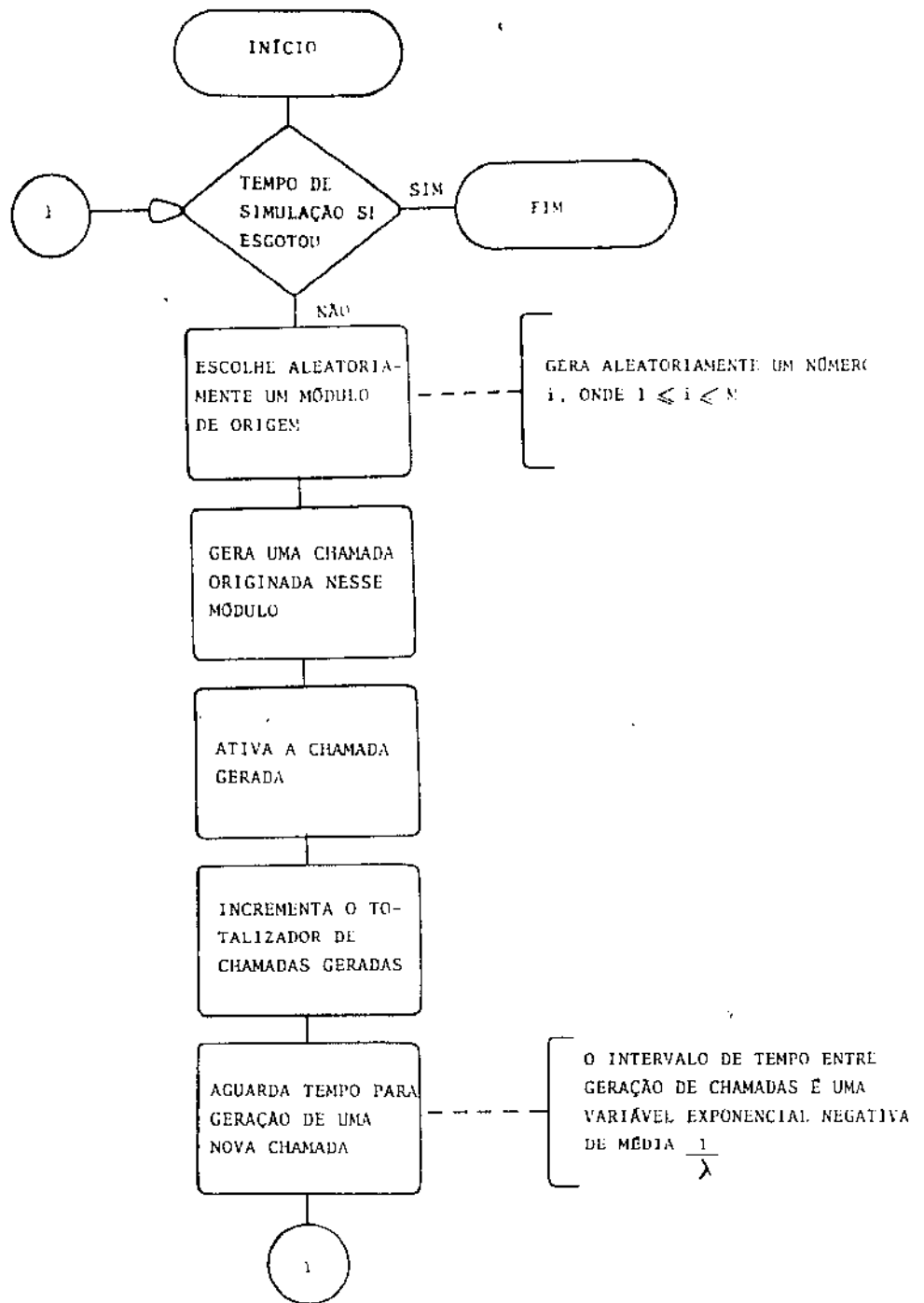
PROCESSOS DOS MODELOS ASSOCIADOS ÀS
DUAS ESTRUTURAS DE COMUTAÇÃO

PROCESSOS DOS MODELOS ASSOCIADOS ÀS DUAS ESTRUTURAS DE COMUTAÇÃO

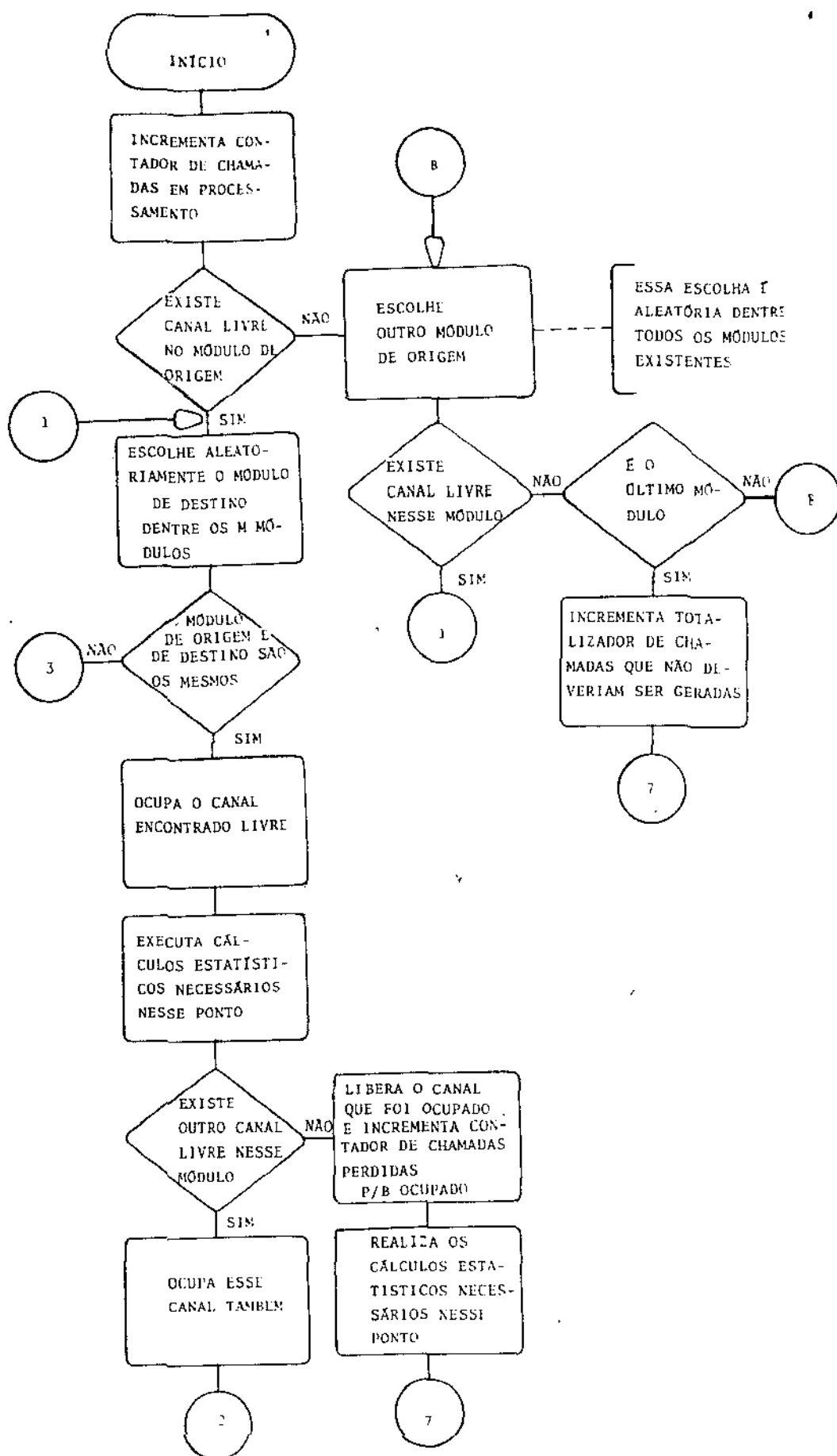
B.1 OBJETO SISTEMA

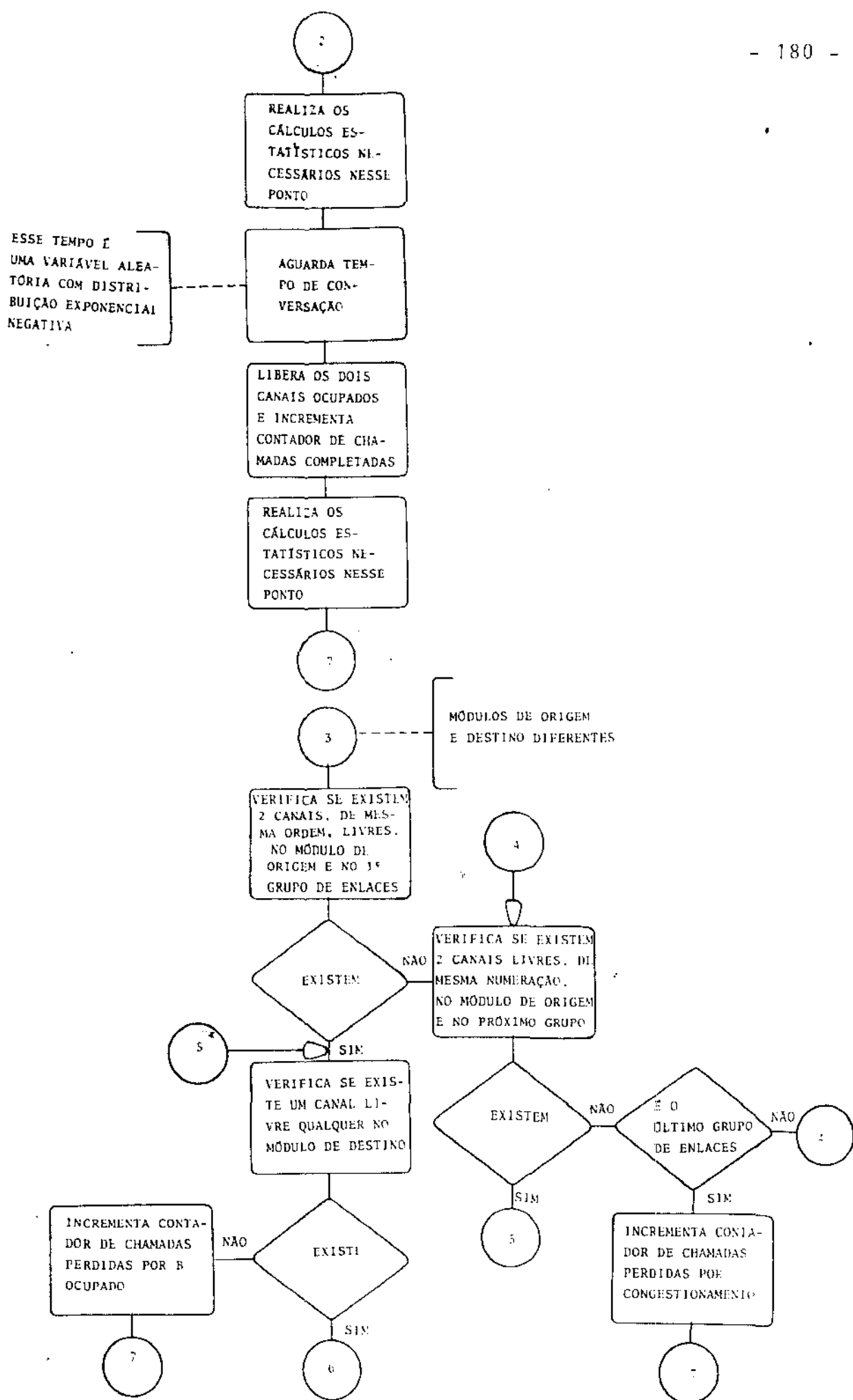


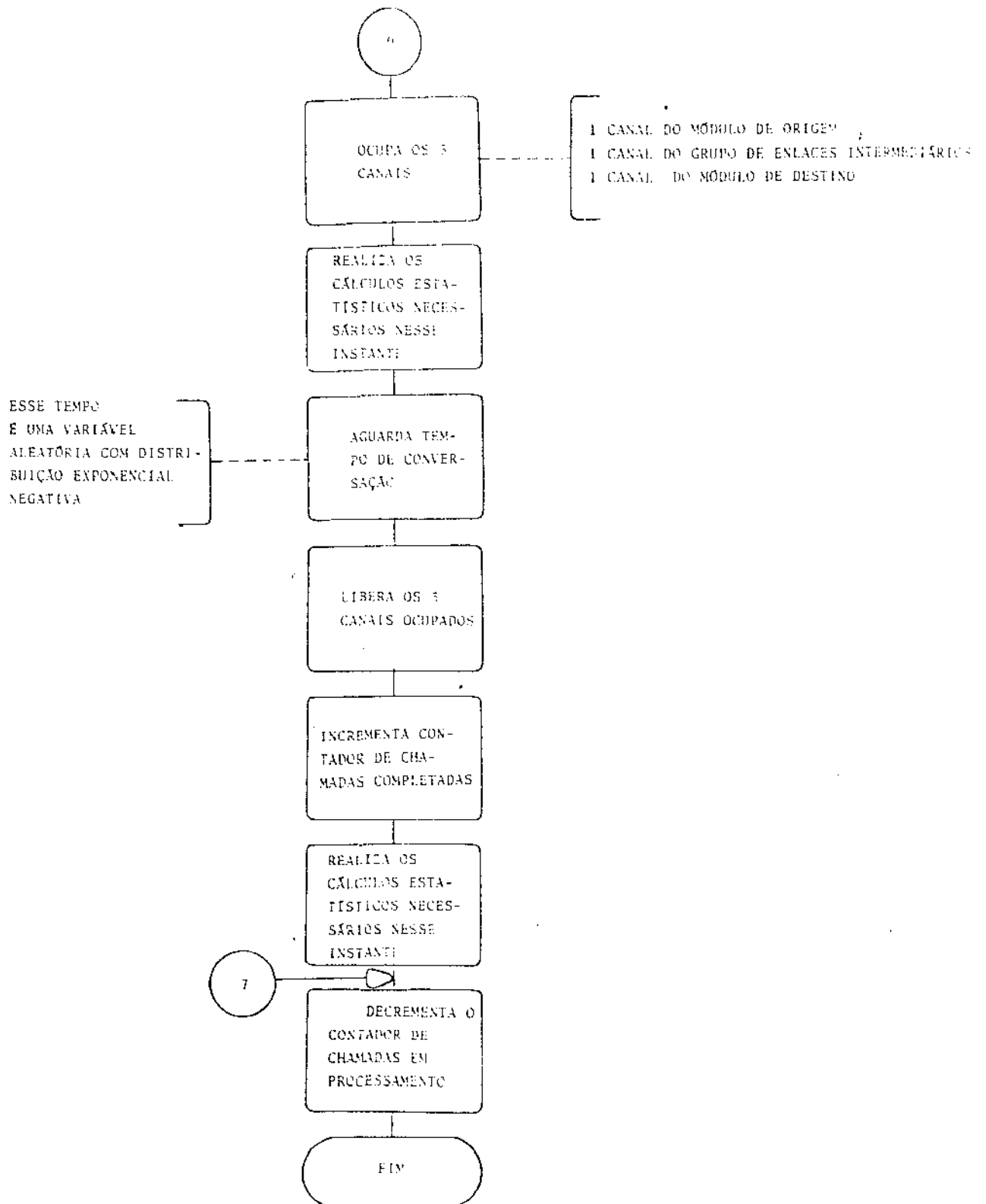
B.2 CLASSE GERADOR DE CHAMADAS



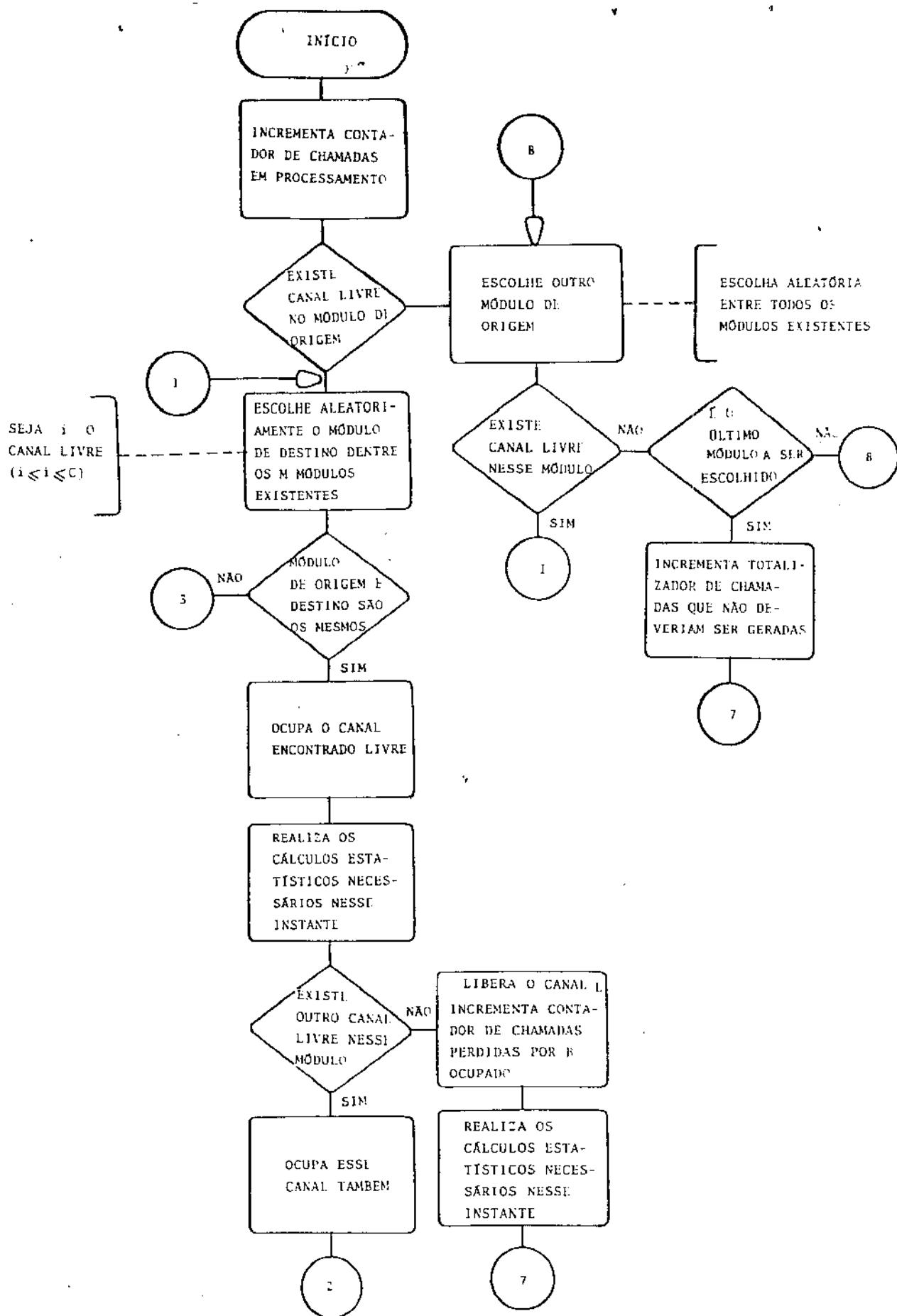
(MODELO ASSOCIADO À ESTRUTURA 1)



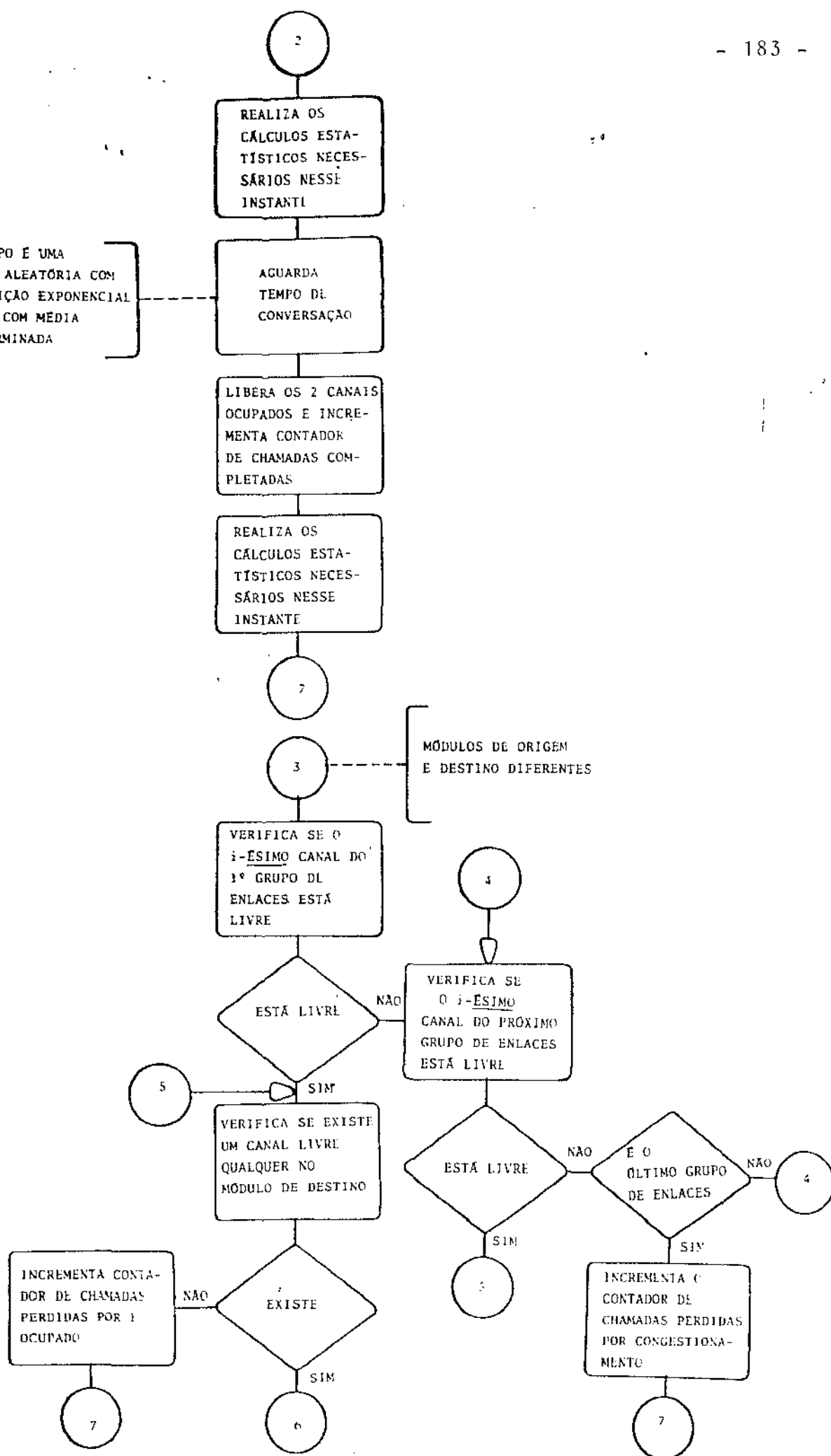


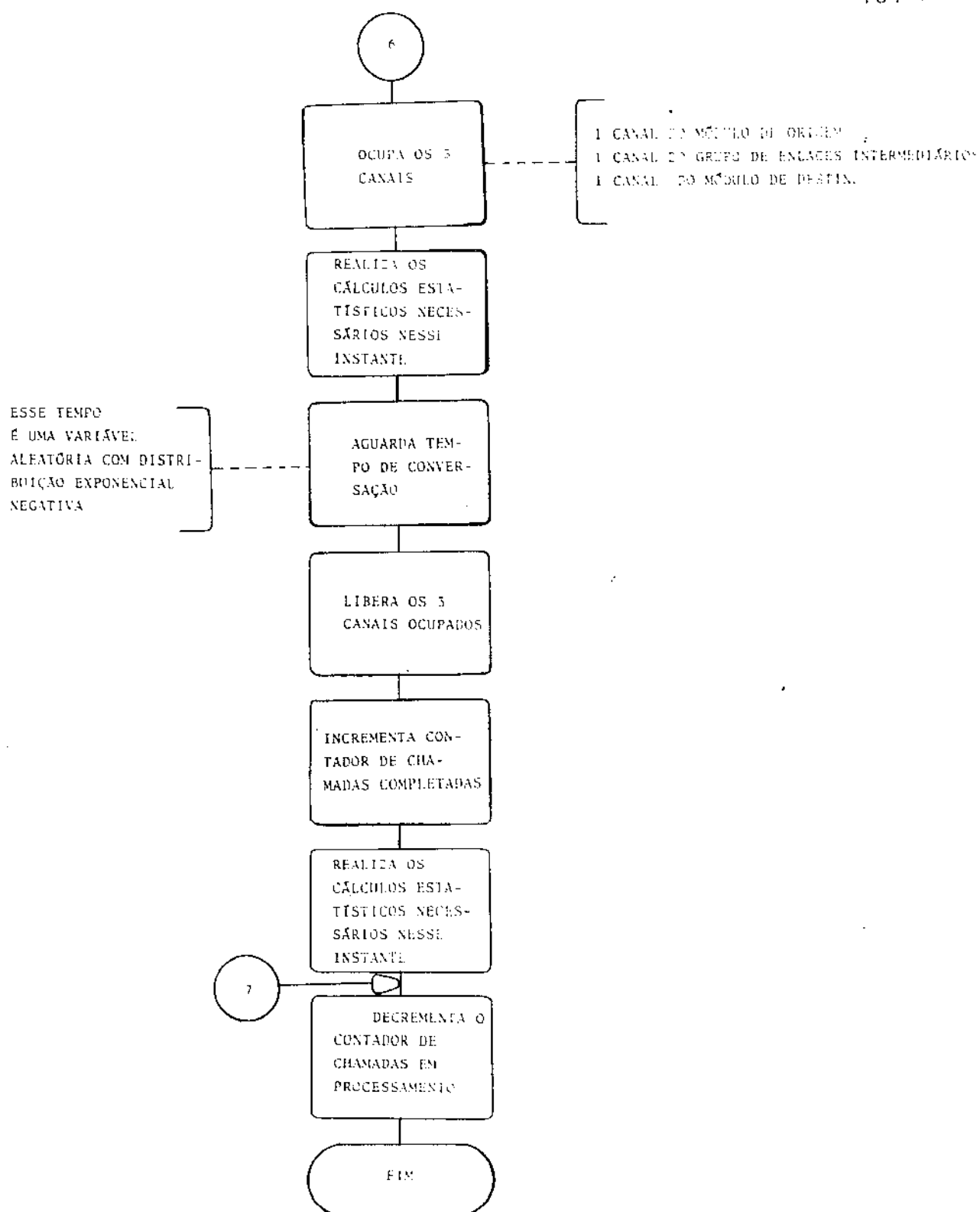


(MODELO ASSOCIADO À ESTRUTURA 2)



ESSE TEMPO É UMA
VARIÁVEL ALEATÓRIA COM
DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL
NEGATIVA COM MÉDIA
PRÉ-DETERMINADA





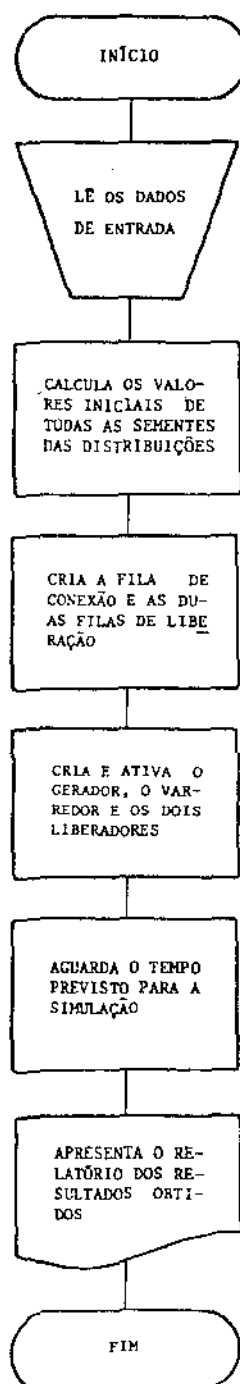
APÊNDICE C

CLASSES DE OBJETOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO DO
ÓRGÃO DE CONTROLE

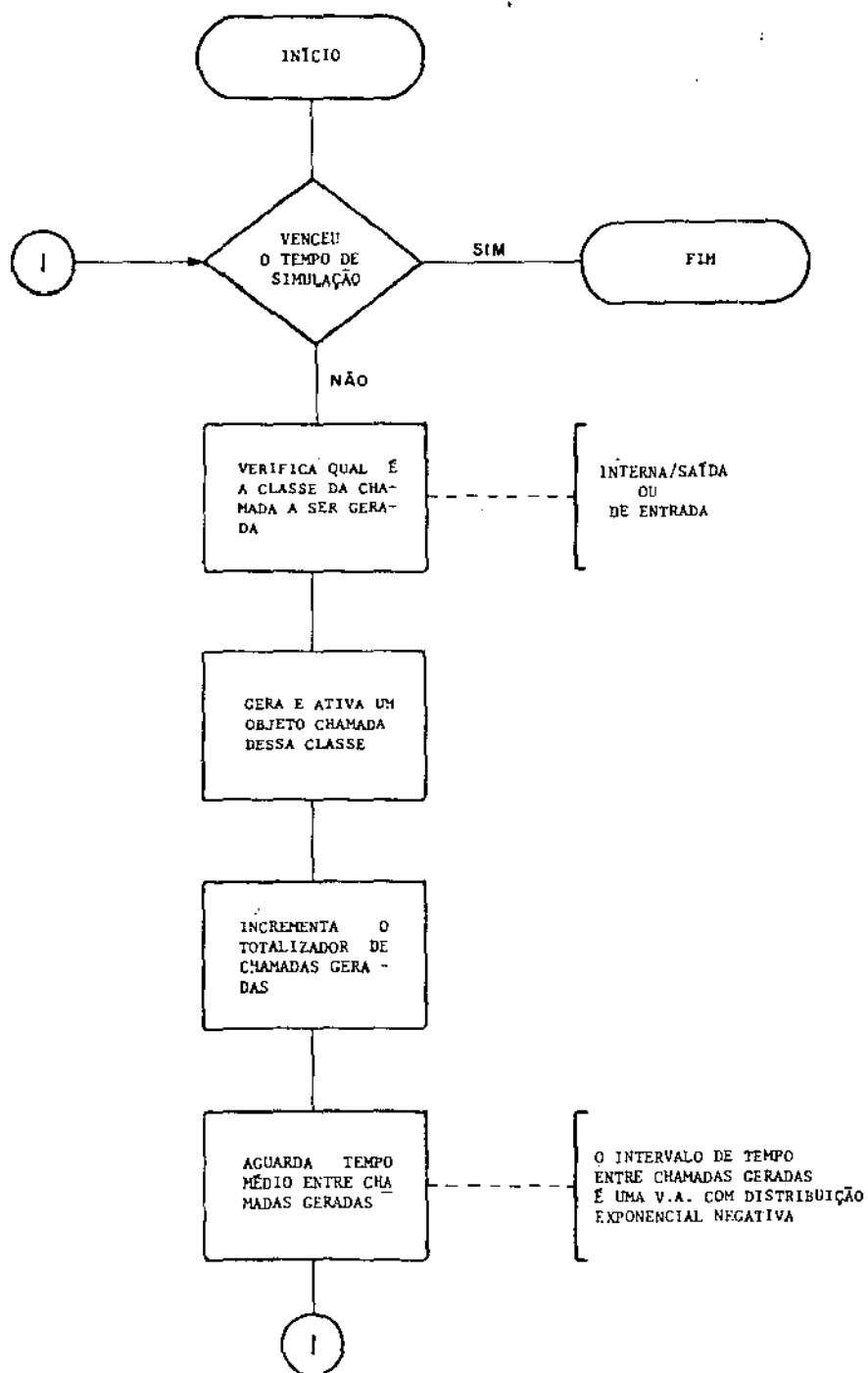
APÊNDICE C

CLASSES DE OBJETOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO DO ÓRGÃO DE CONTROLE

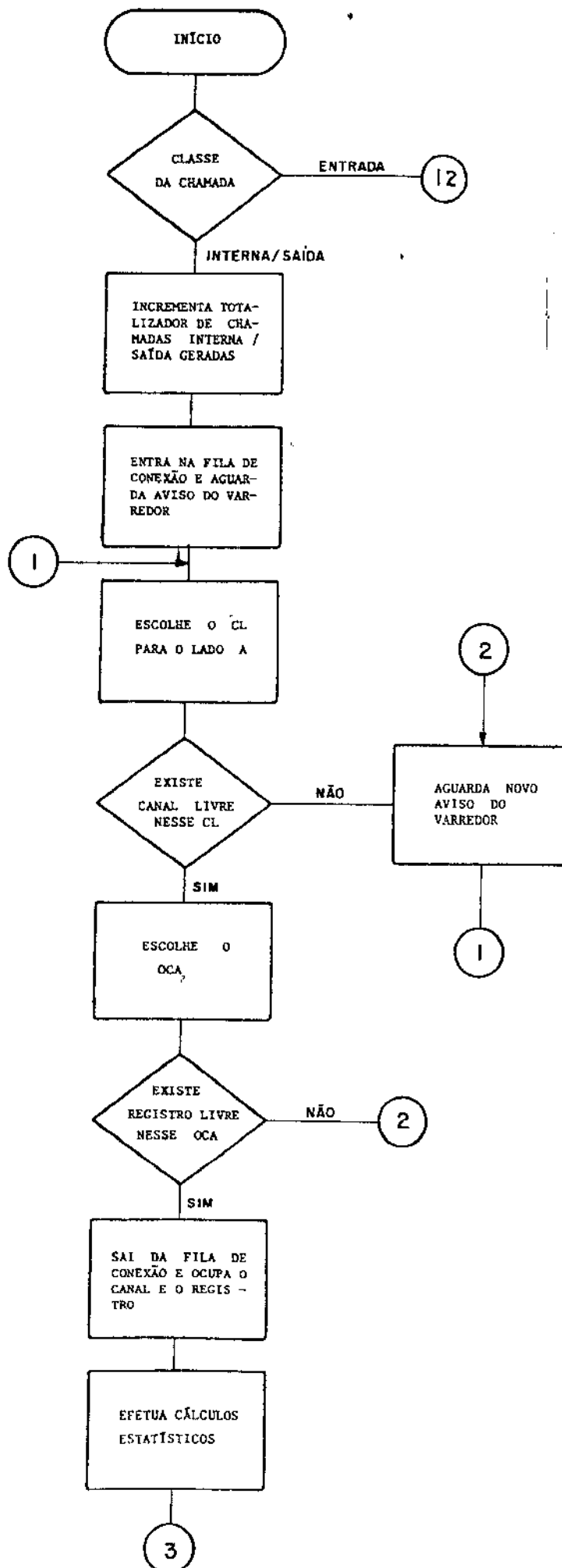
C.1 OBJETO SISTEMA

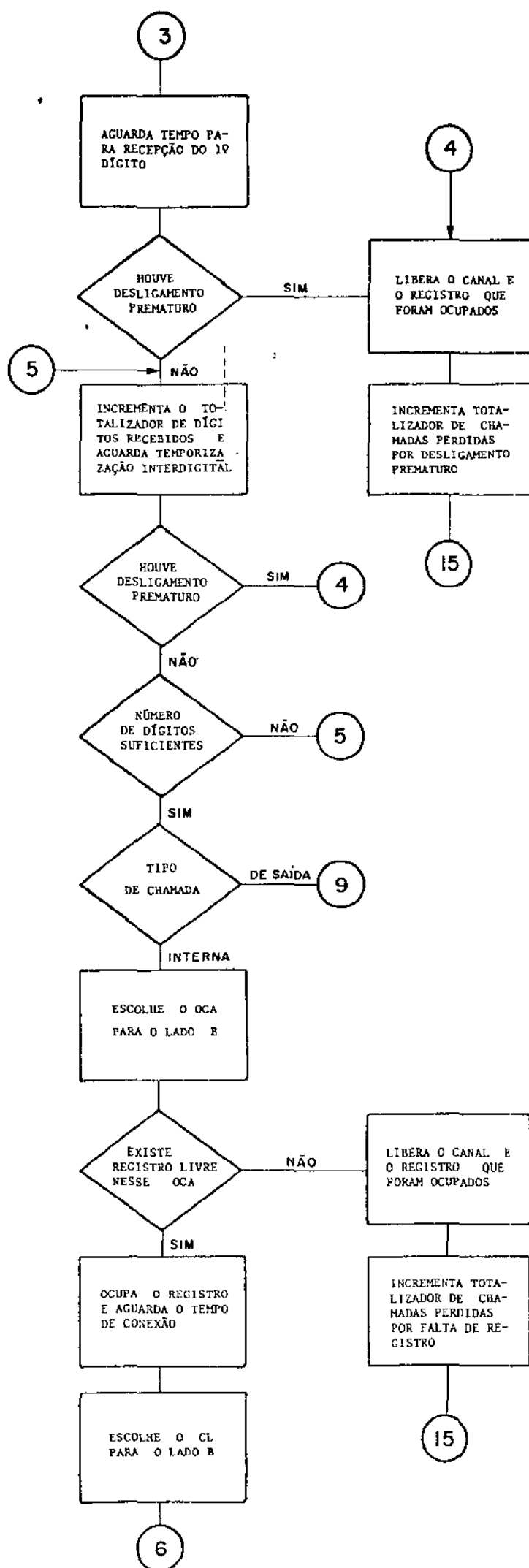


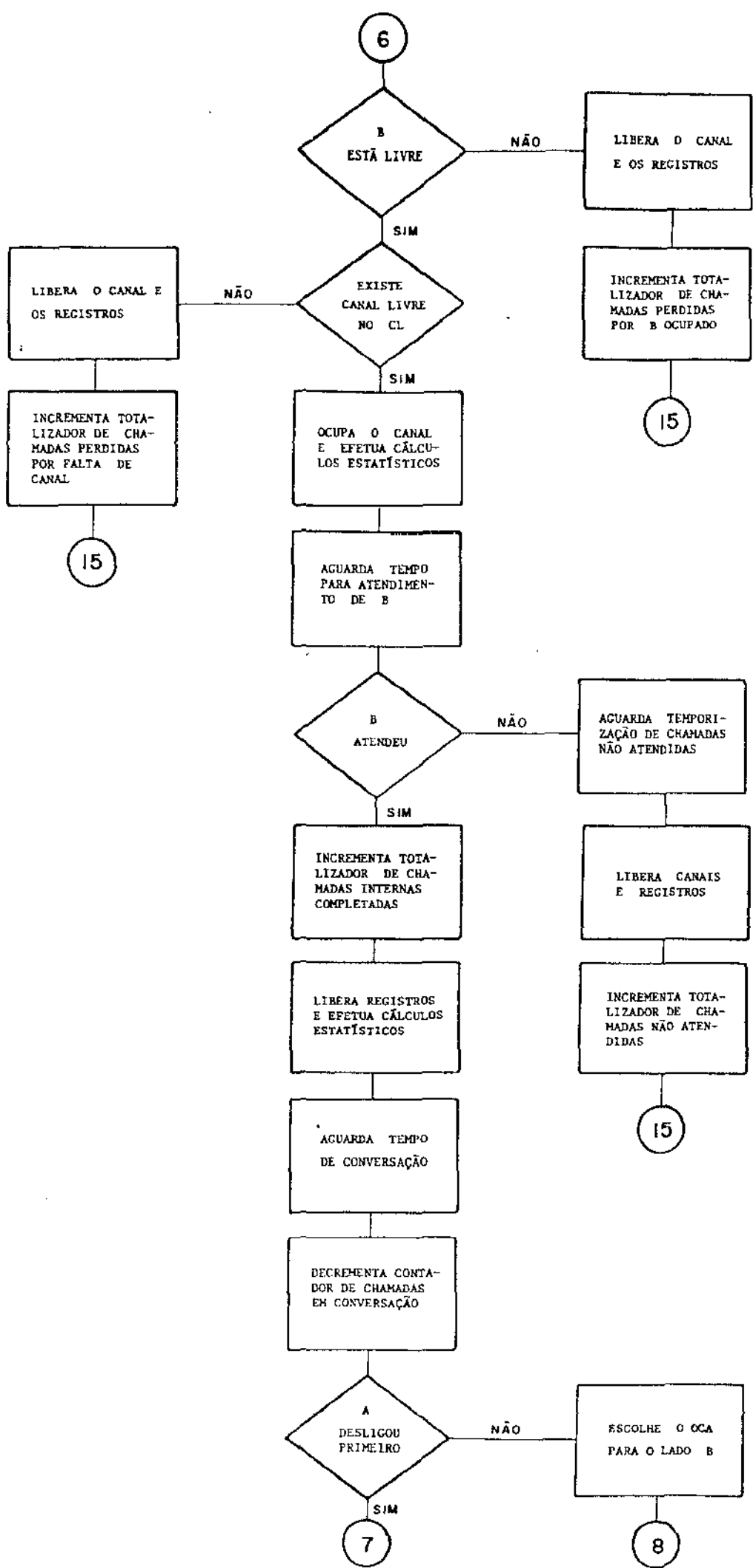
C.2 GERADOR DE CHAMADAS

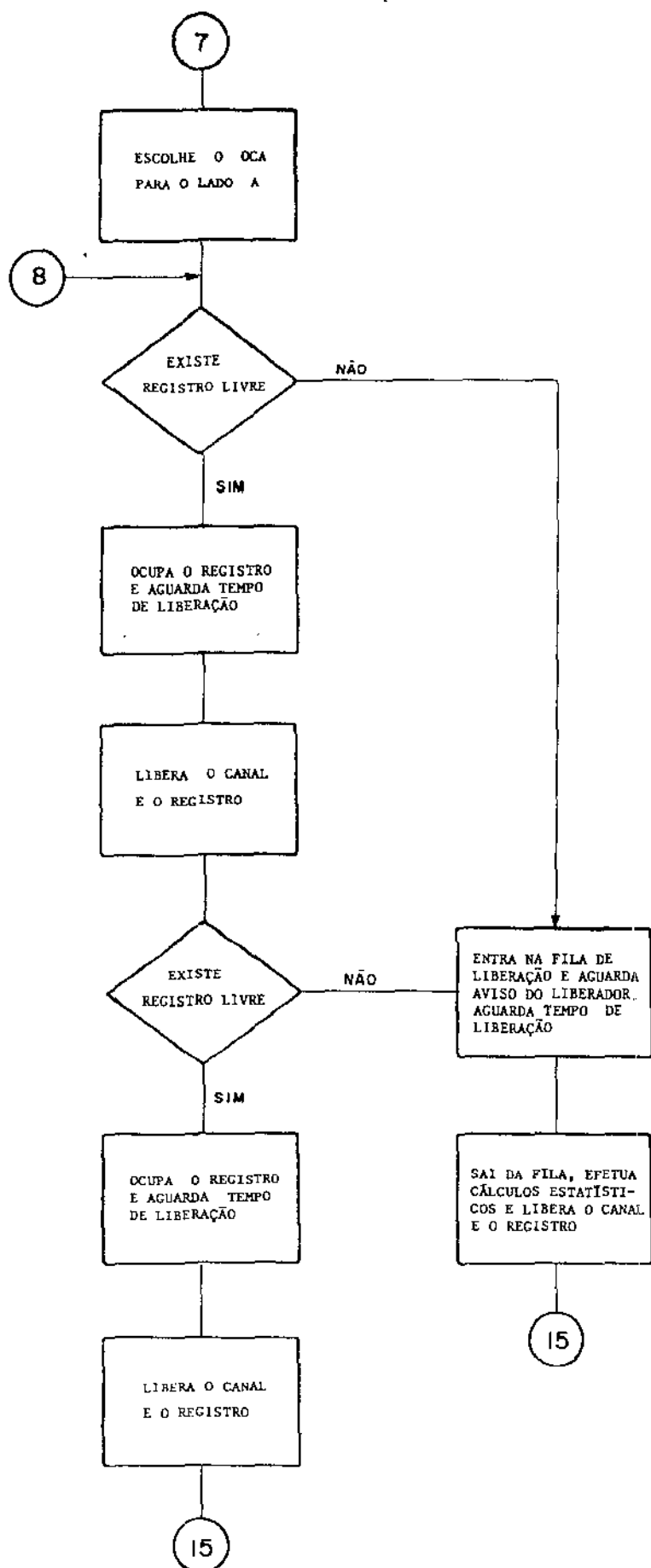


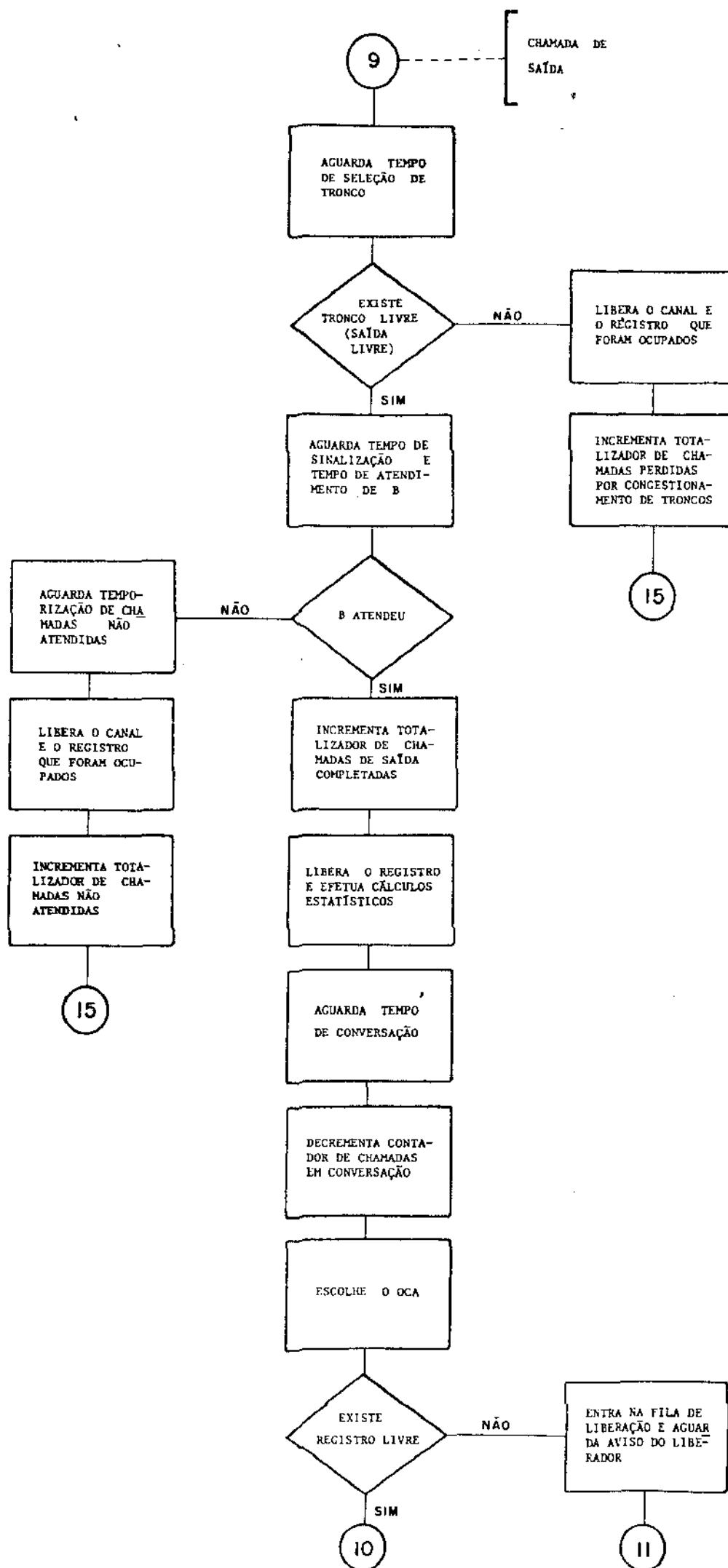
C.3 CHAMADA

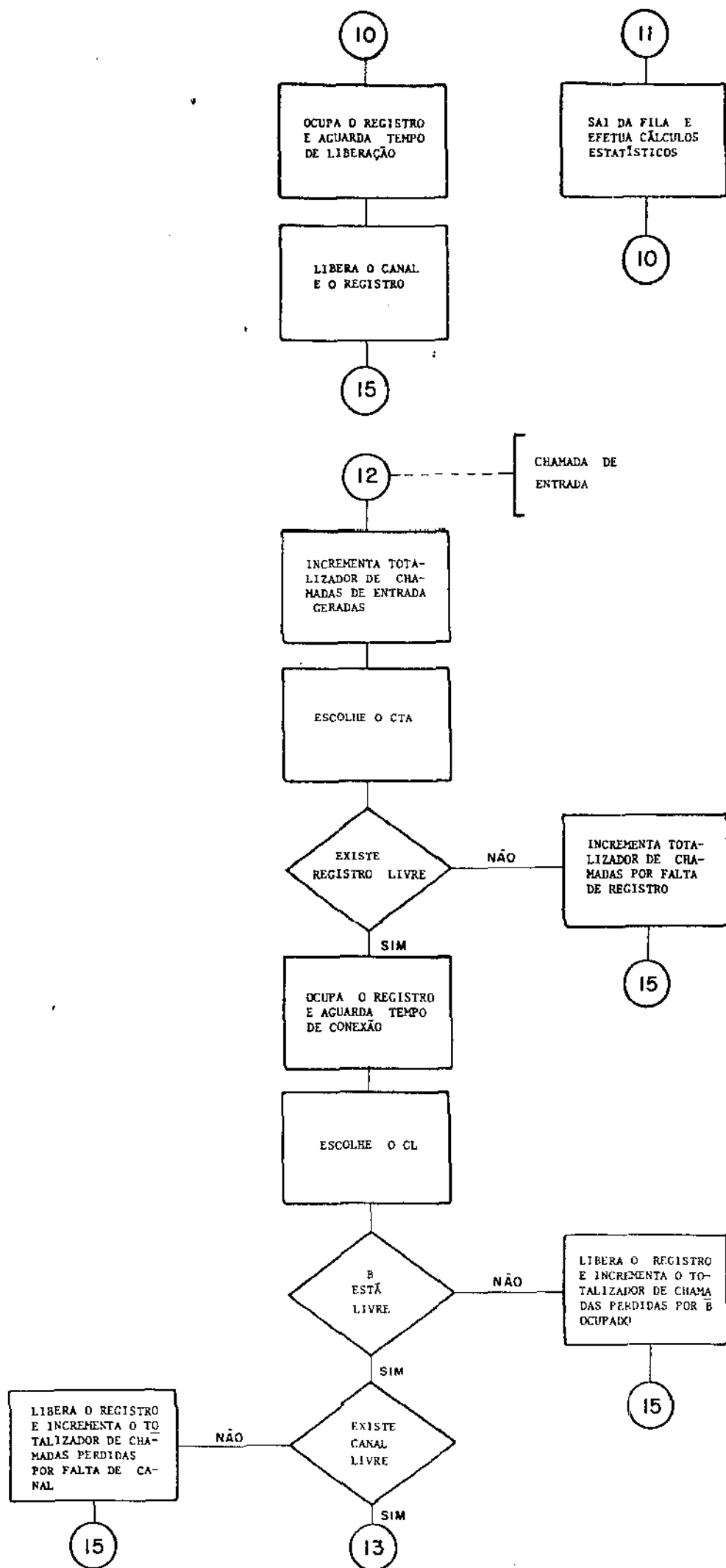


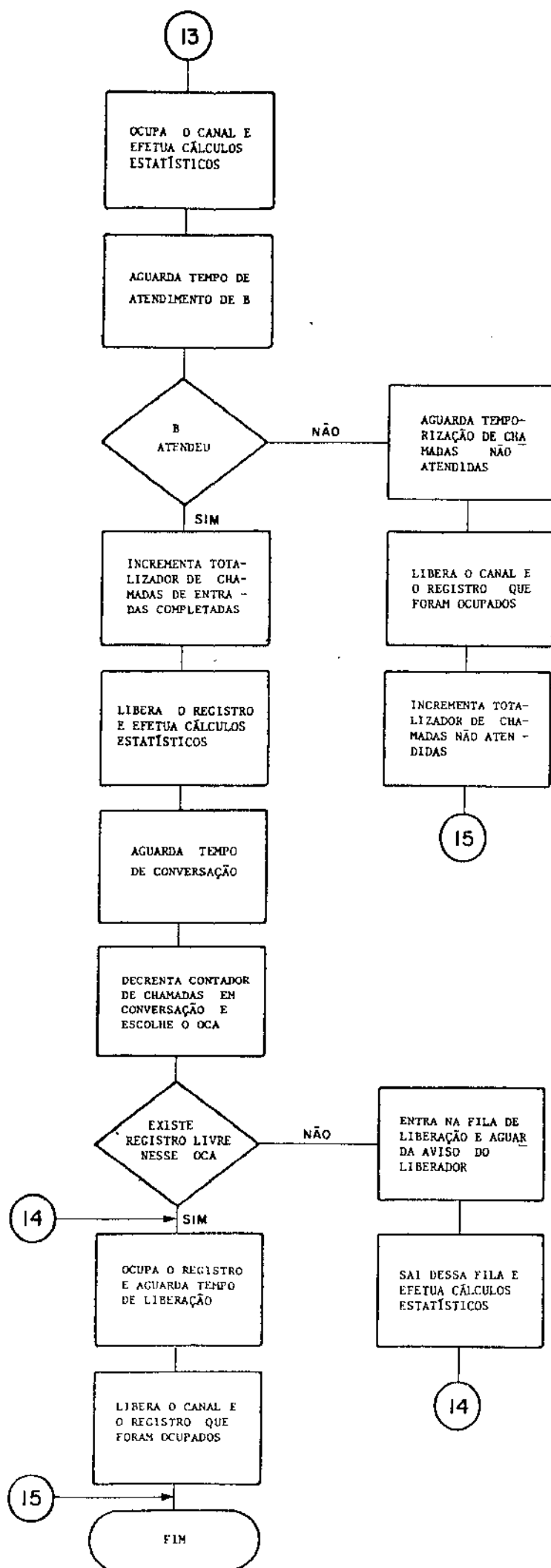




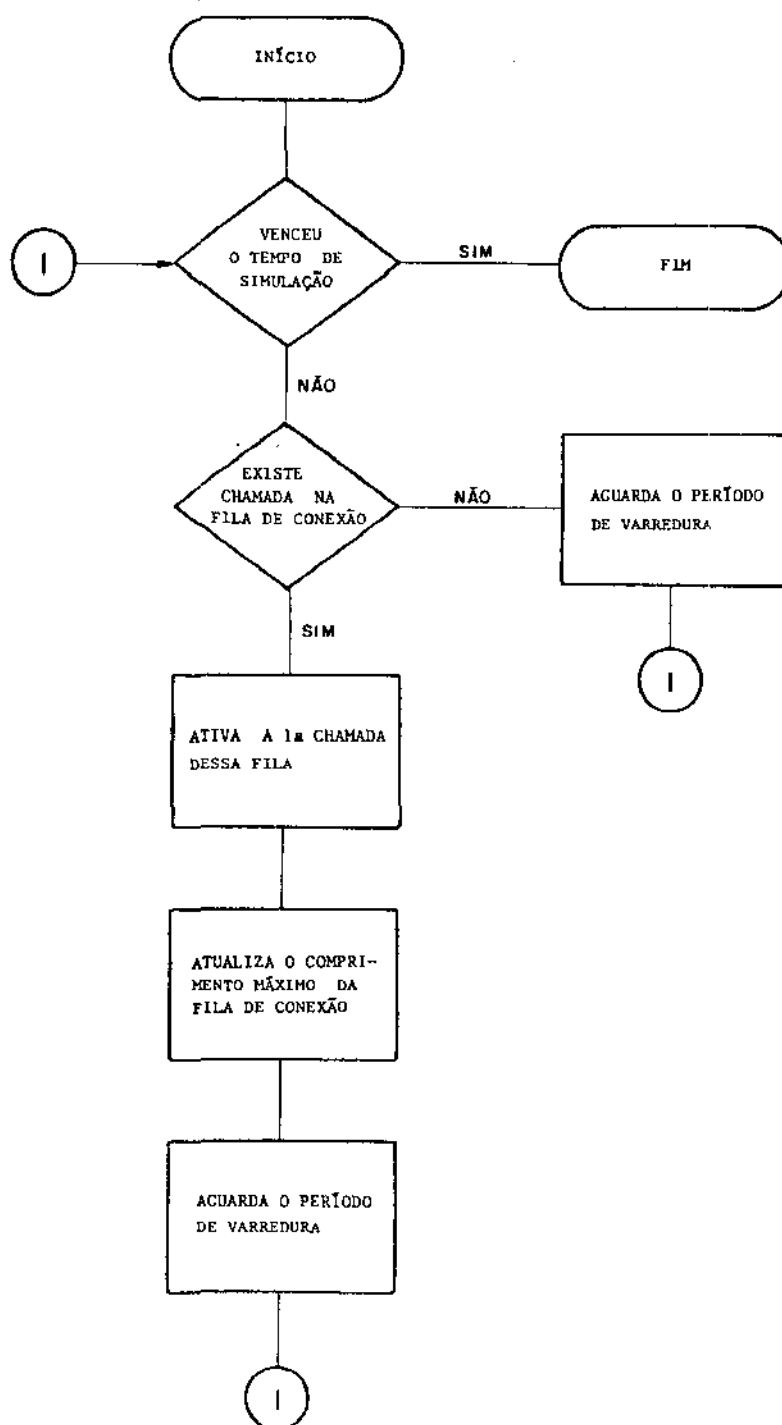




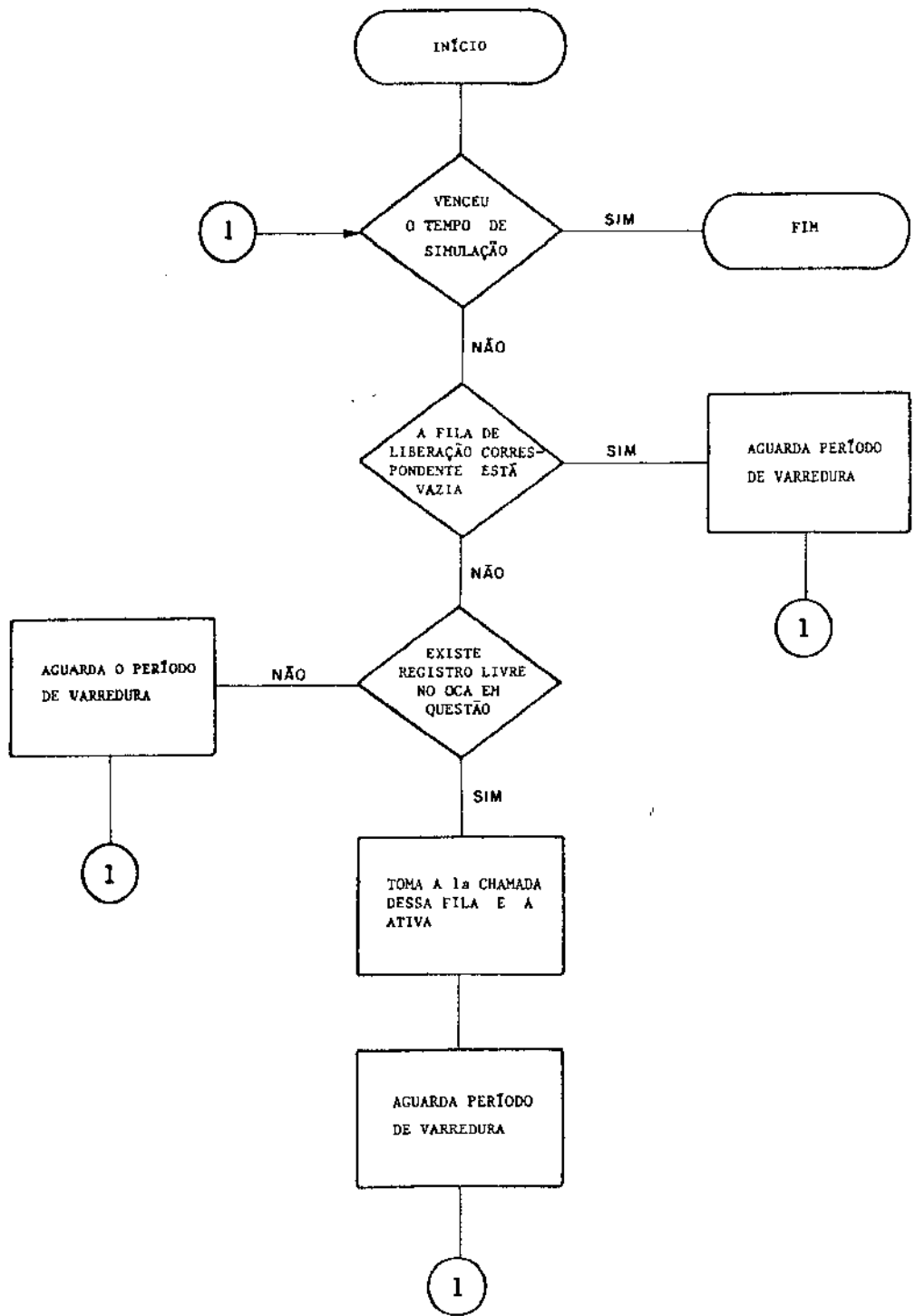




C.4 VARREDOR



C.5 LIBERADOR

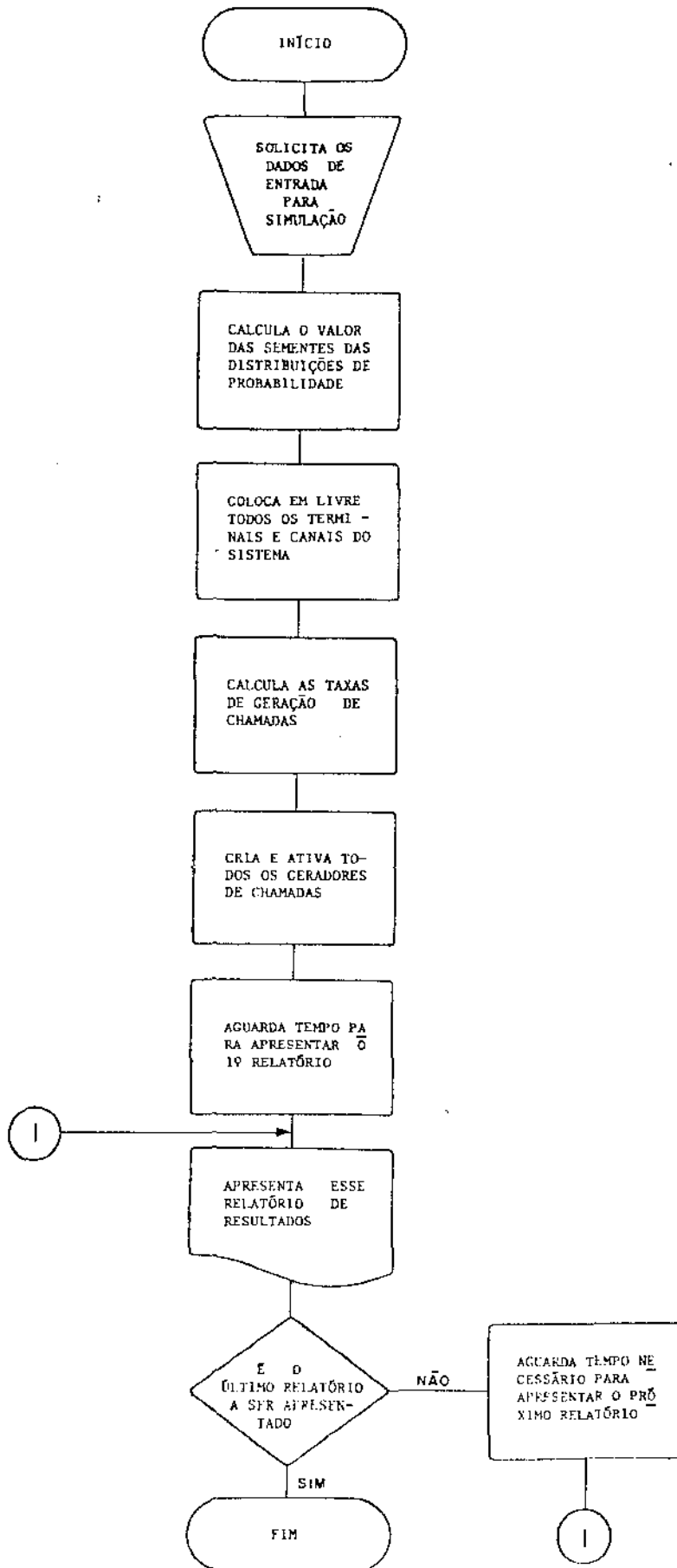


APÊNDICE D

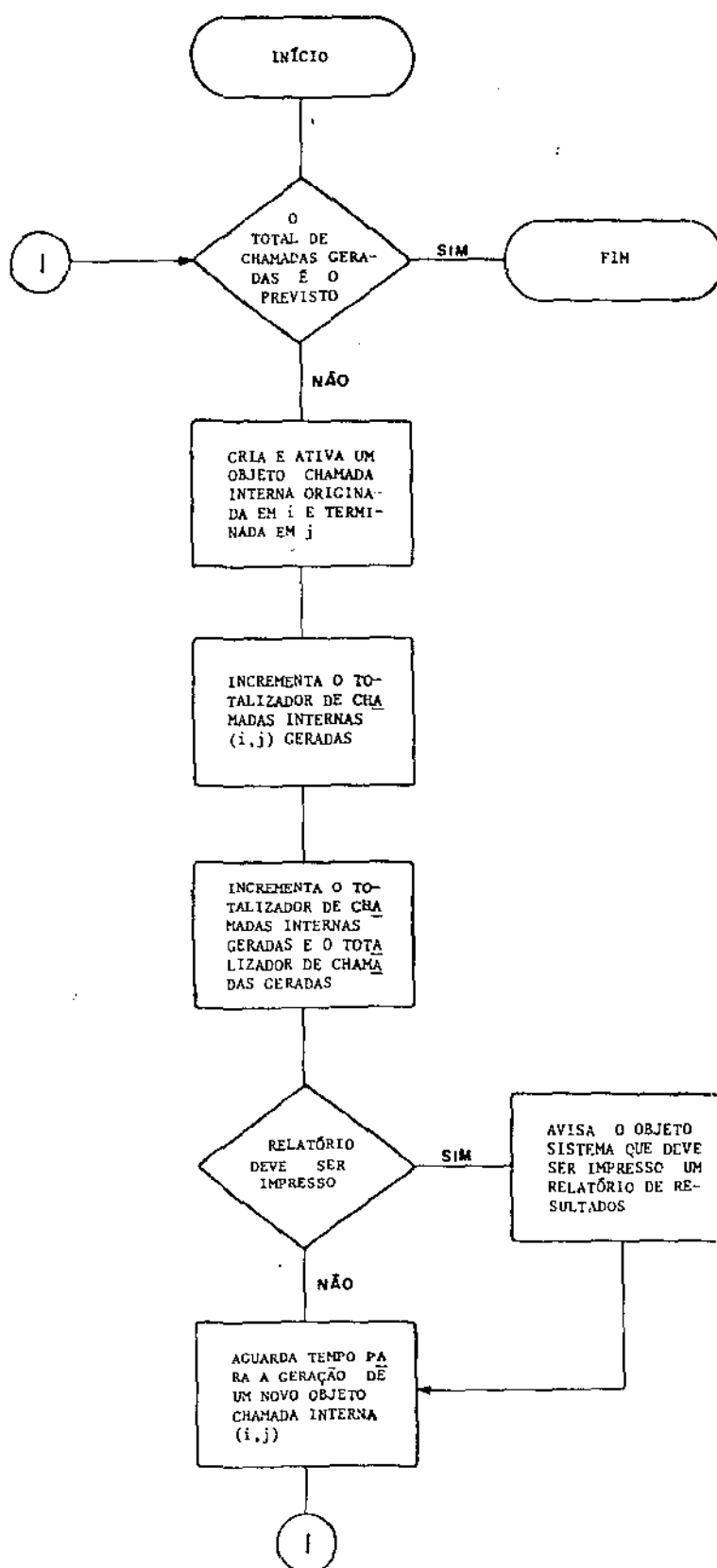
CLASSES DE OBJETOS DO MODELO DA
REDE DE COMUTAÇÃO DA CENTRAL

CLASSES DE OBJETOS DO MODELO DA REDE DE COMUTAÇÃO DA CENTRAL

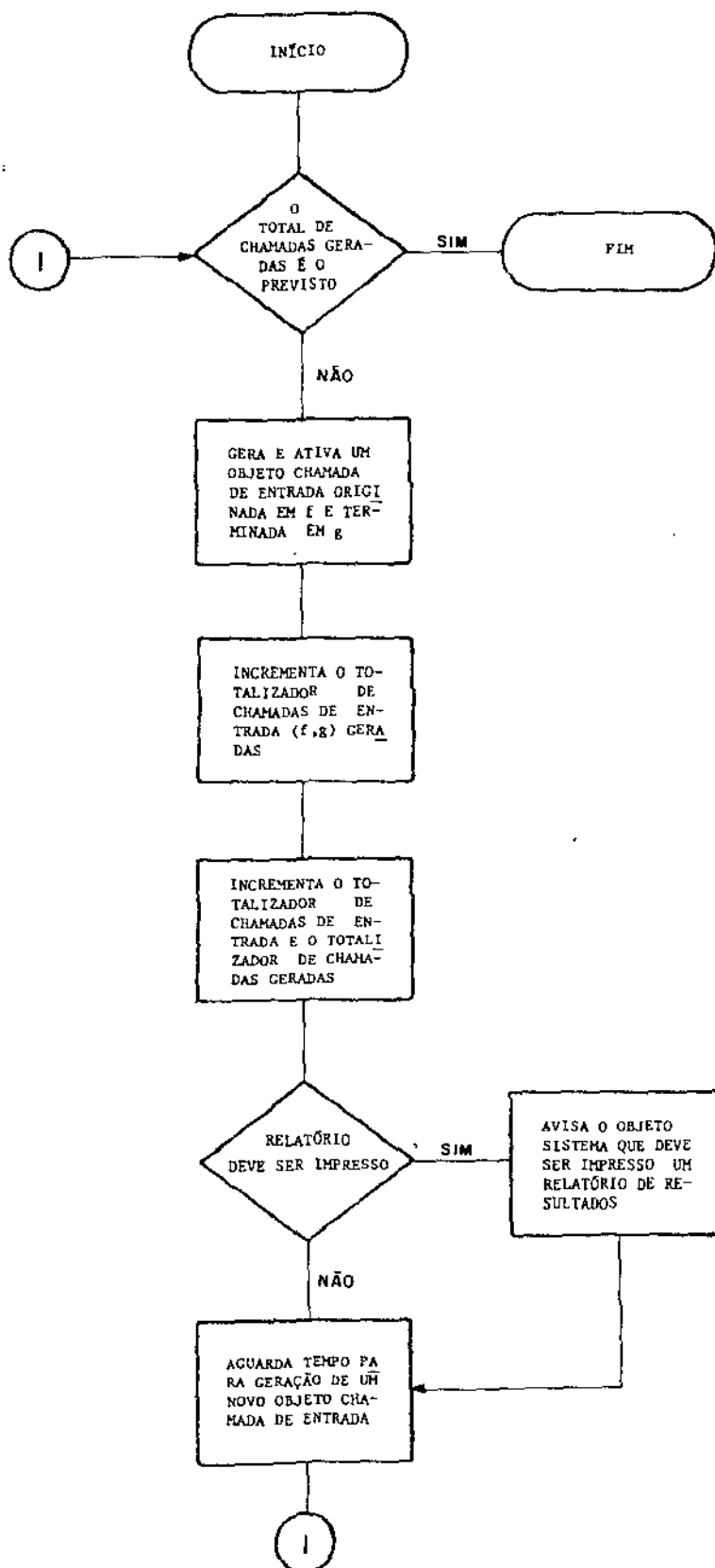
D.1 OBJETO SISTEMA



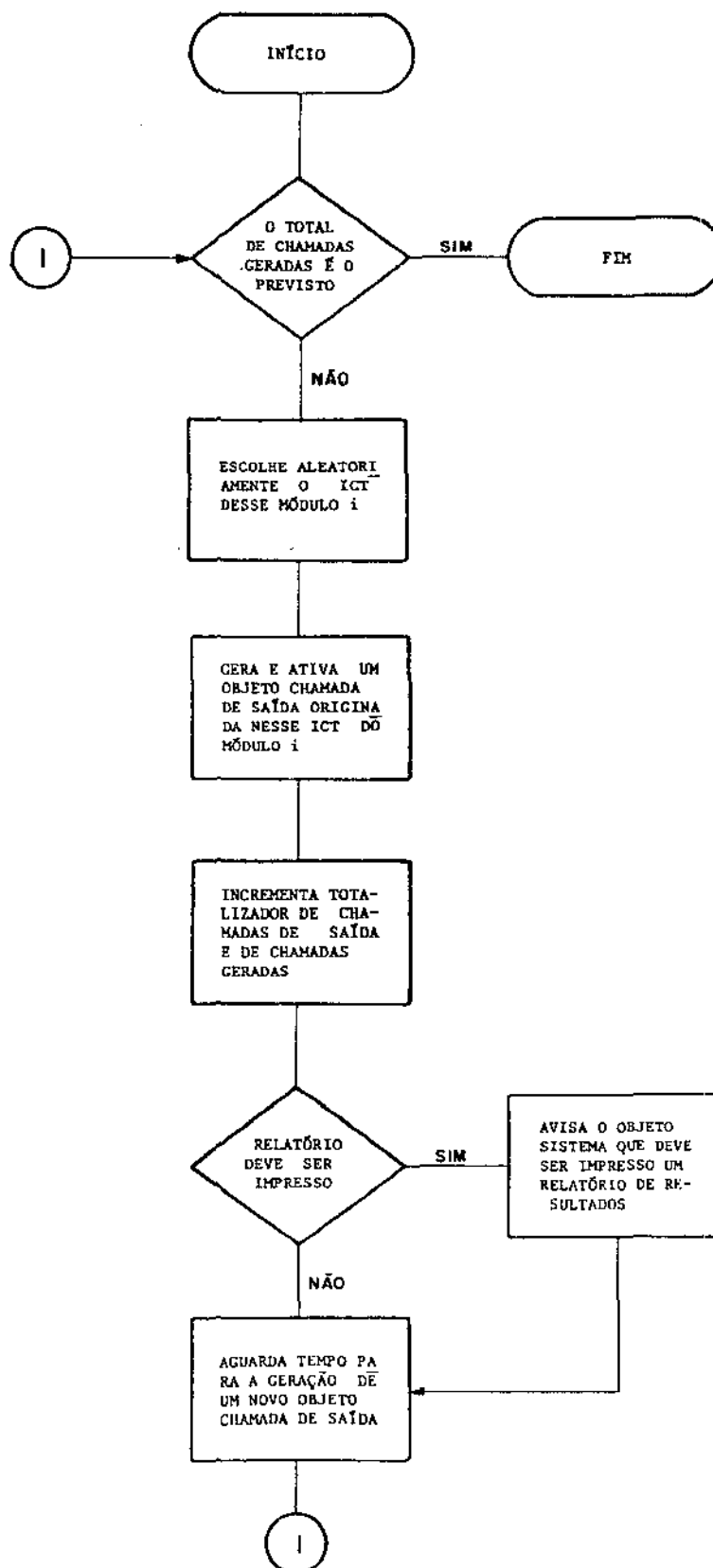
D.2 GERADOR DE OBJETOS CHAMADAS INTERNAS

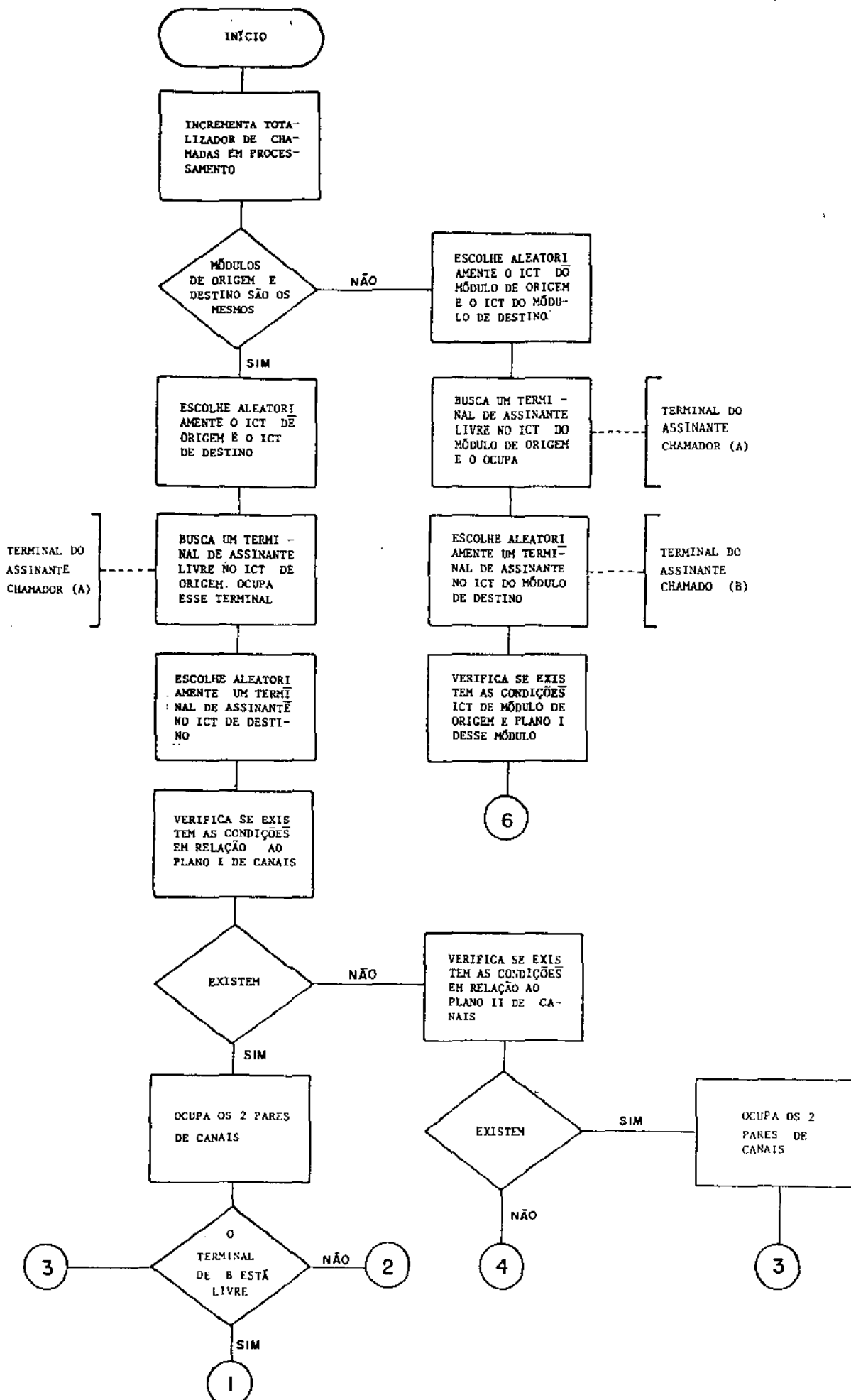


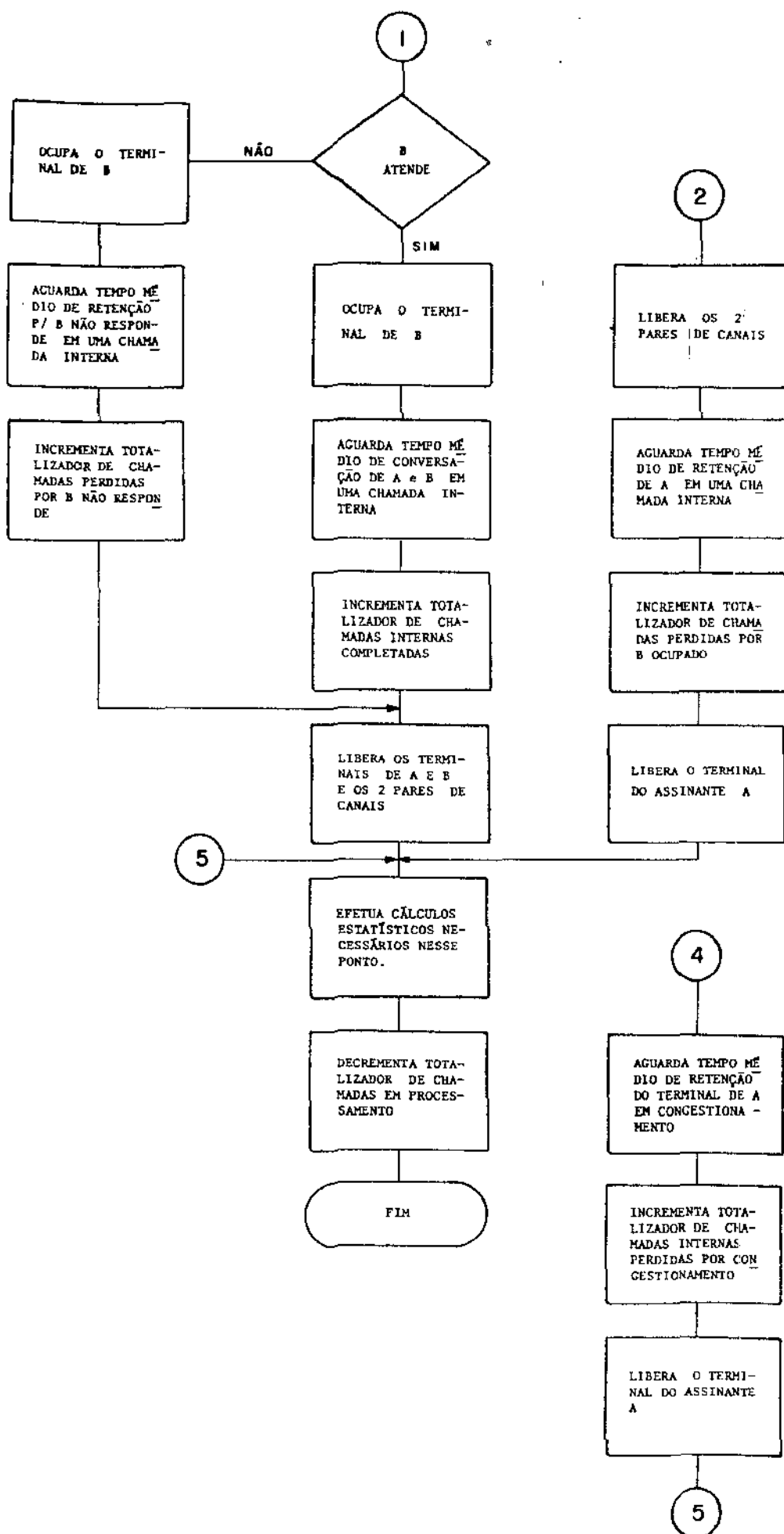
D.3 GERADOR DE OBJETOS CHAMADAS DE ENTRADA

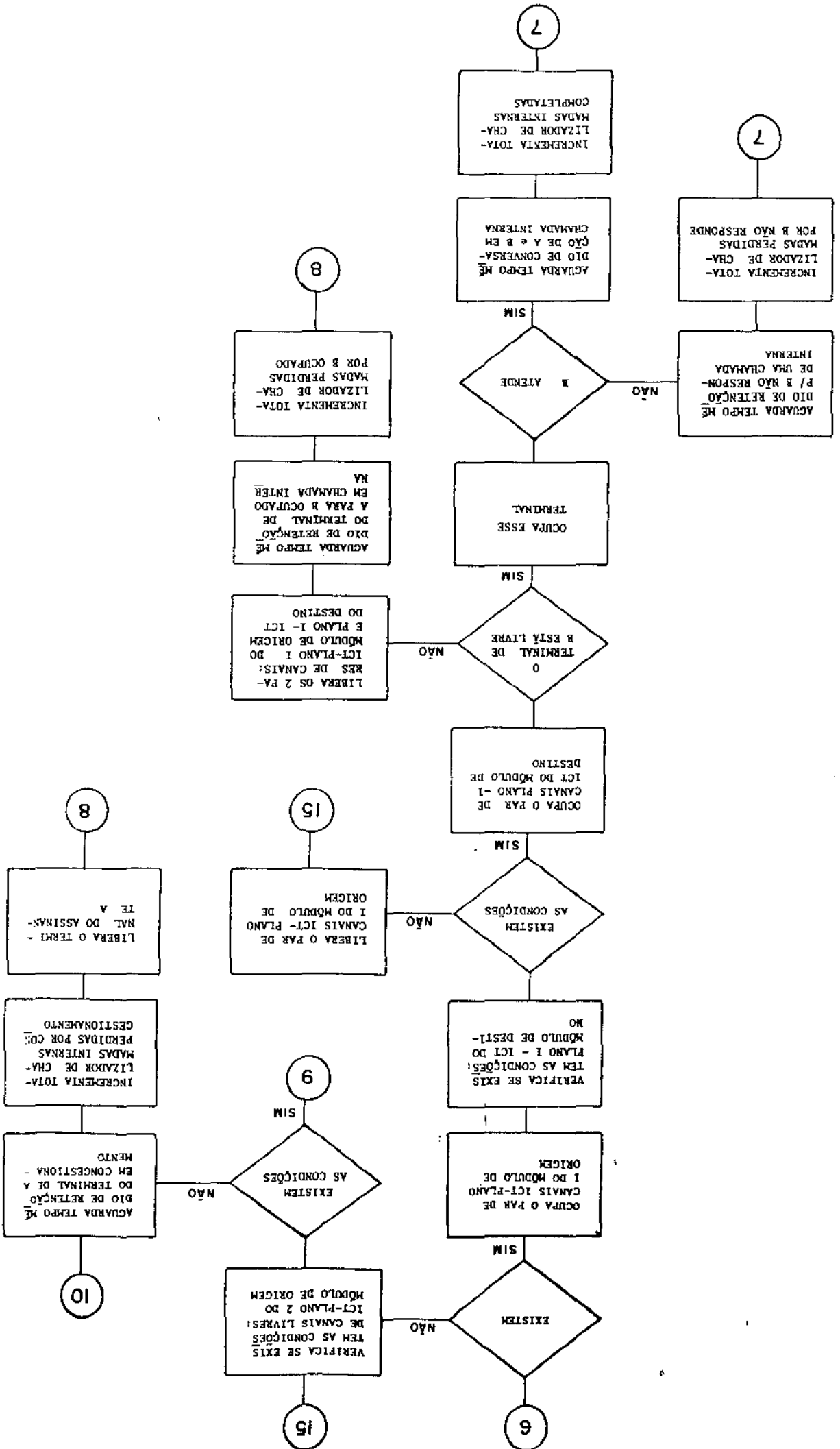


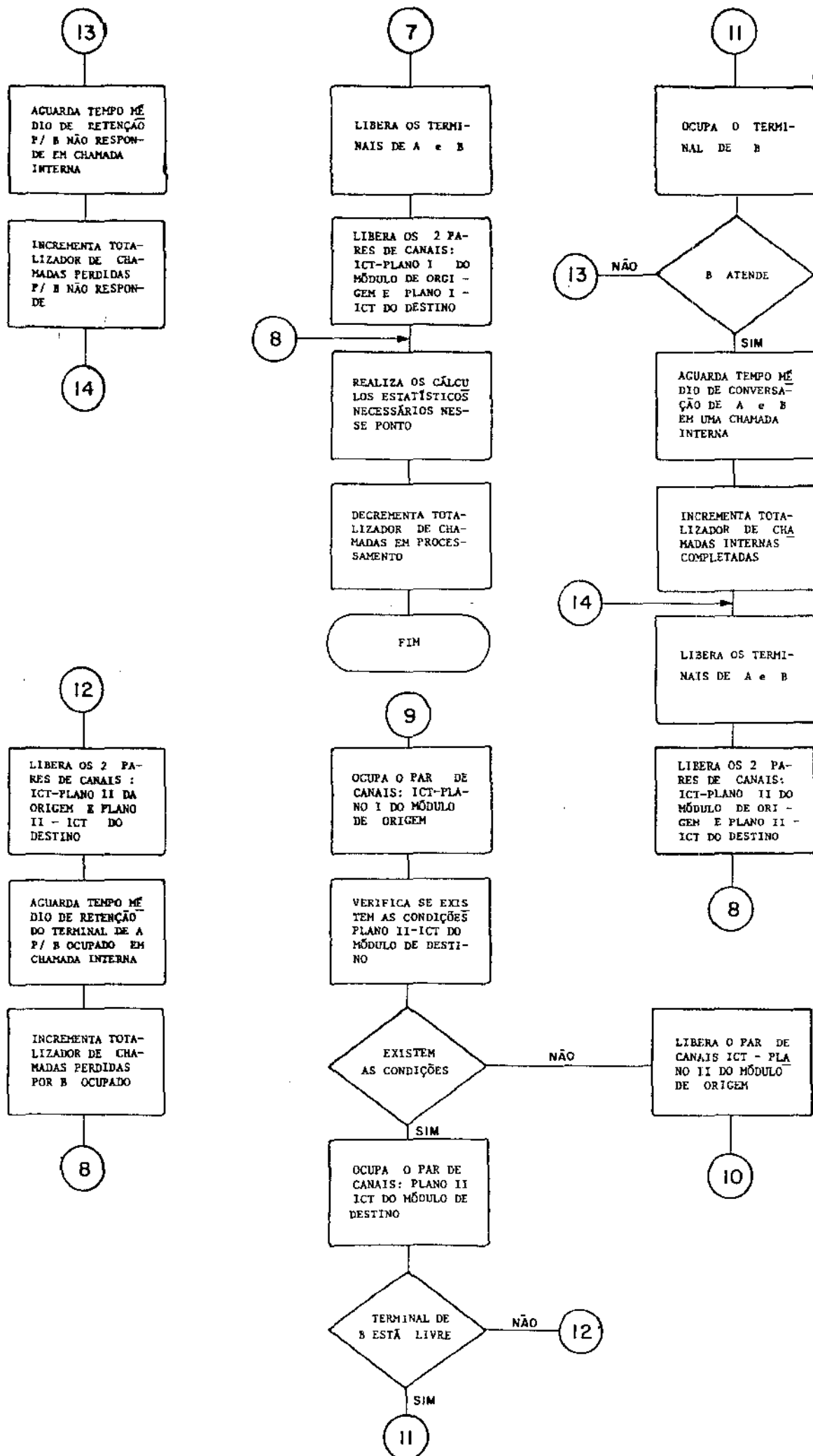
D.4 GERADOR DE OBJETOS CHAMADAS DE SAIDA

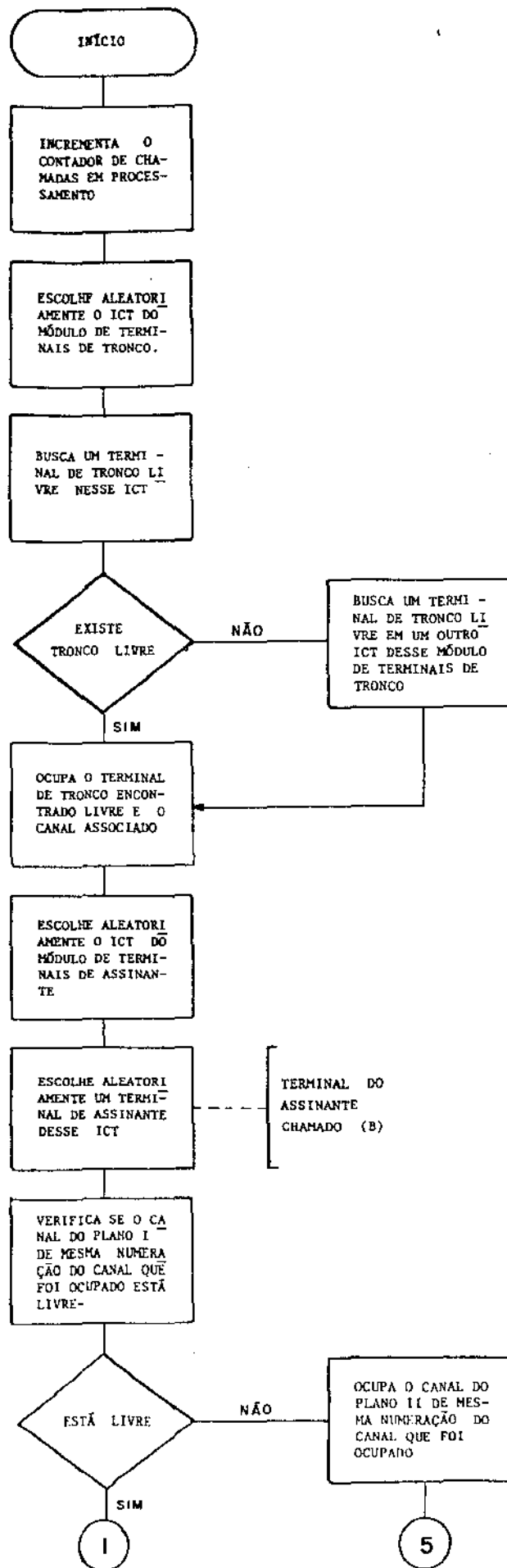


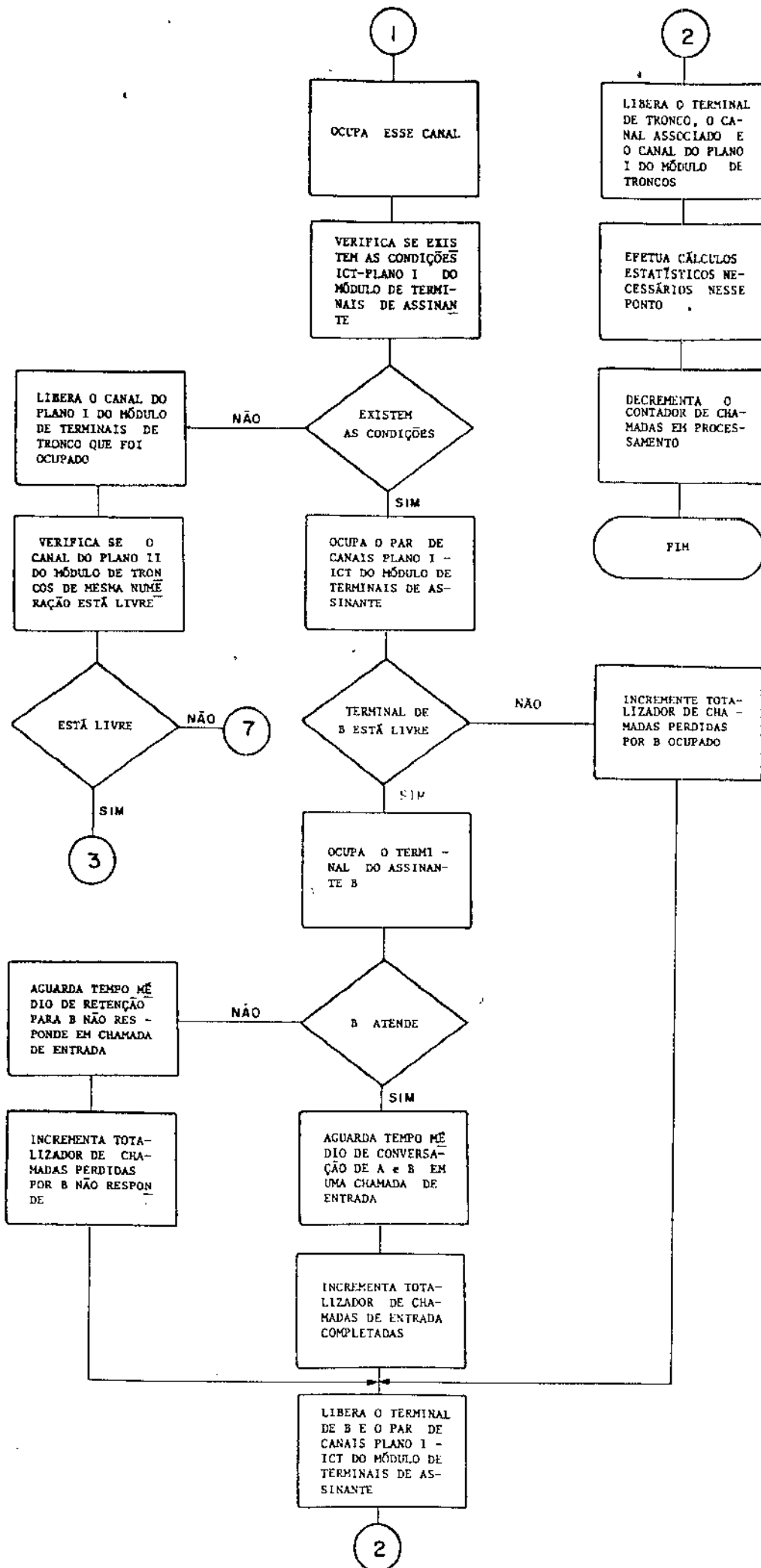


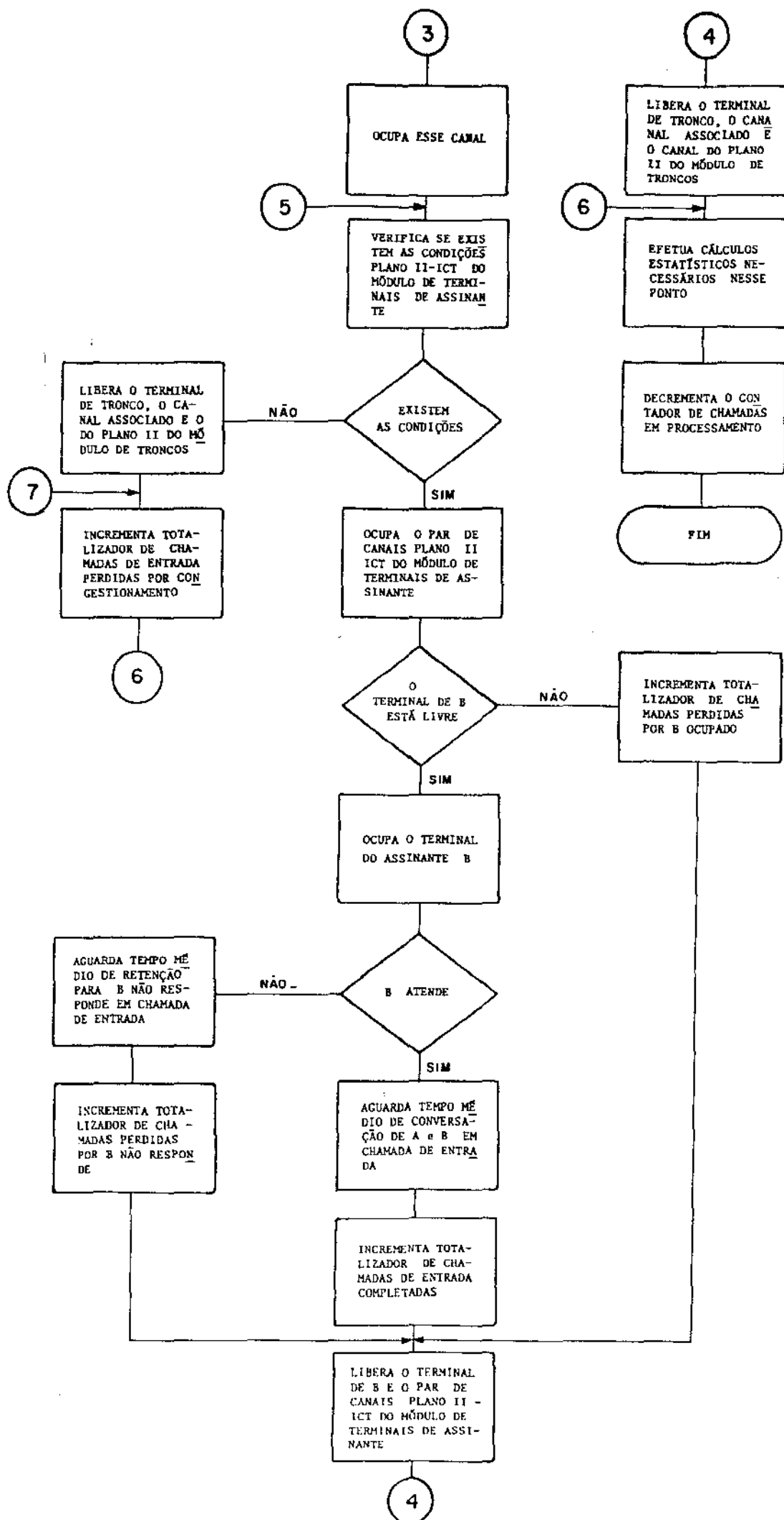




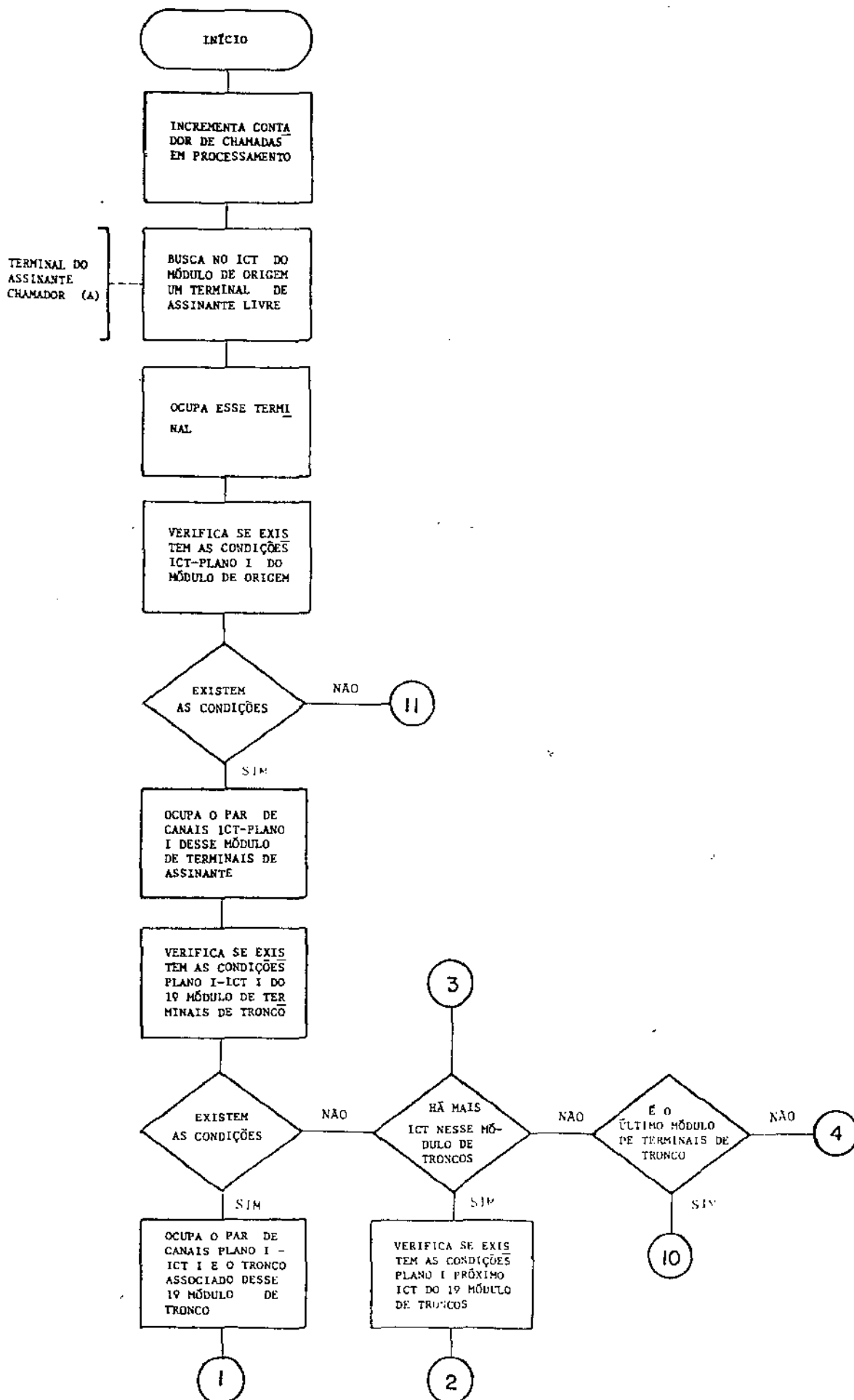


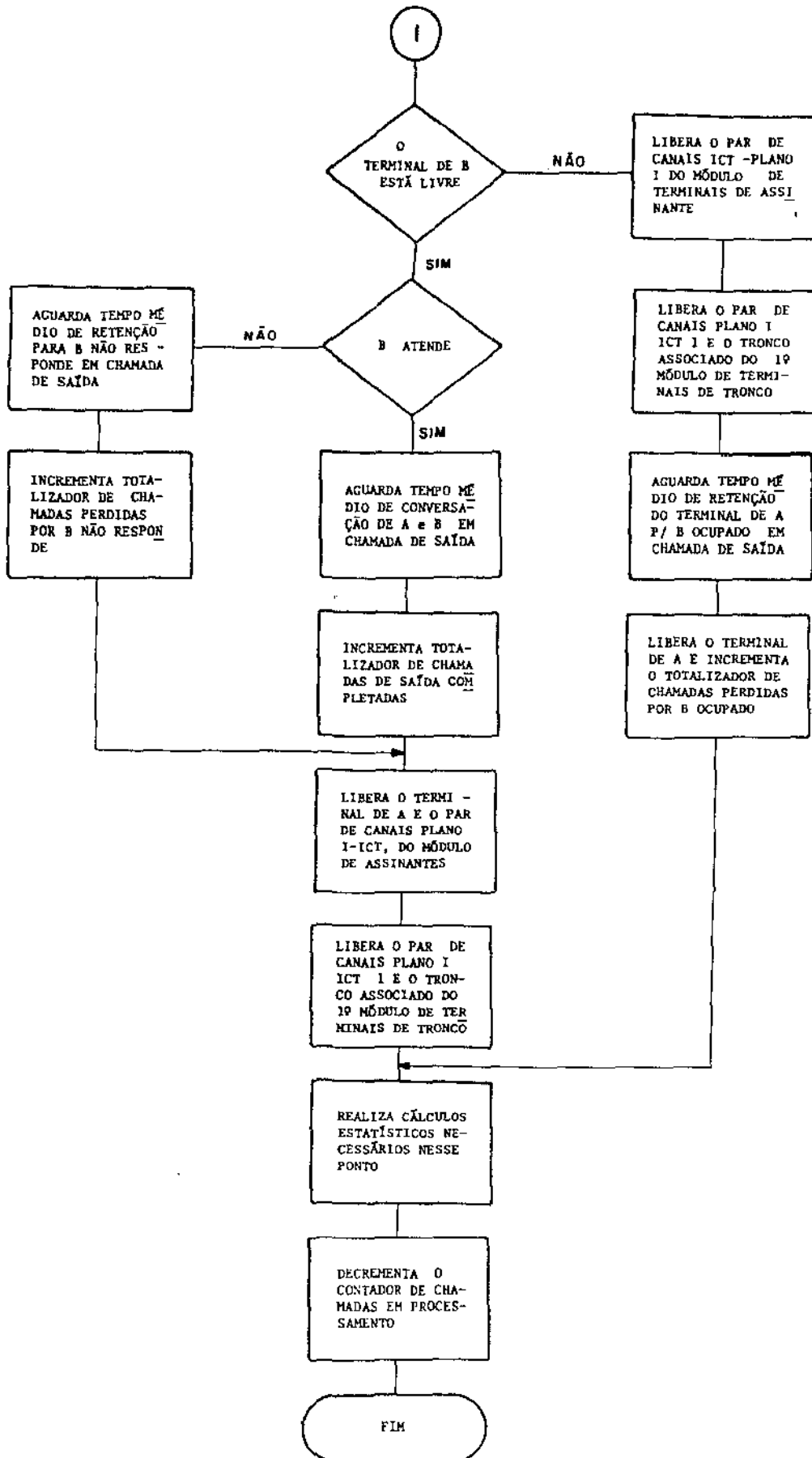


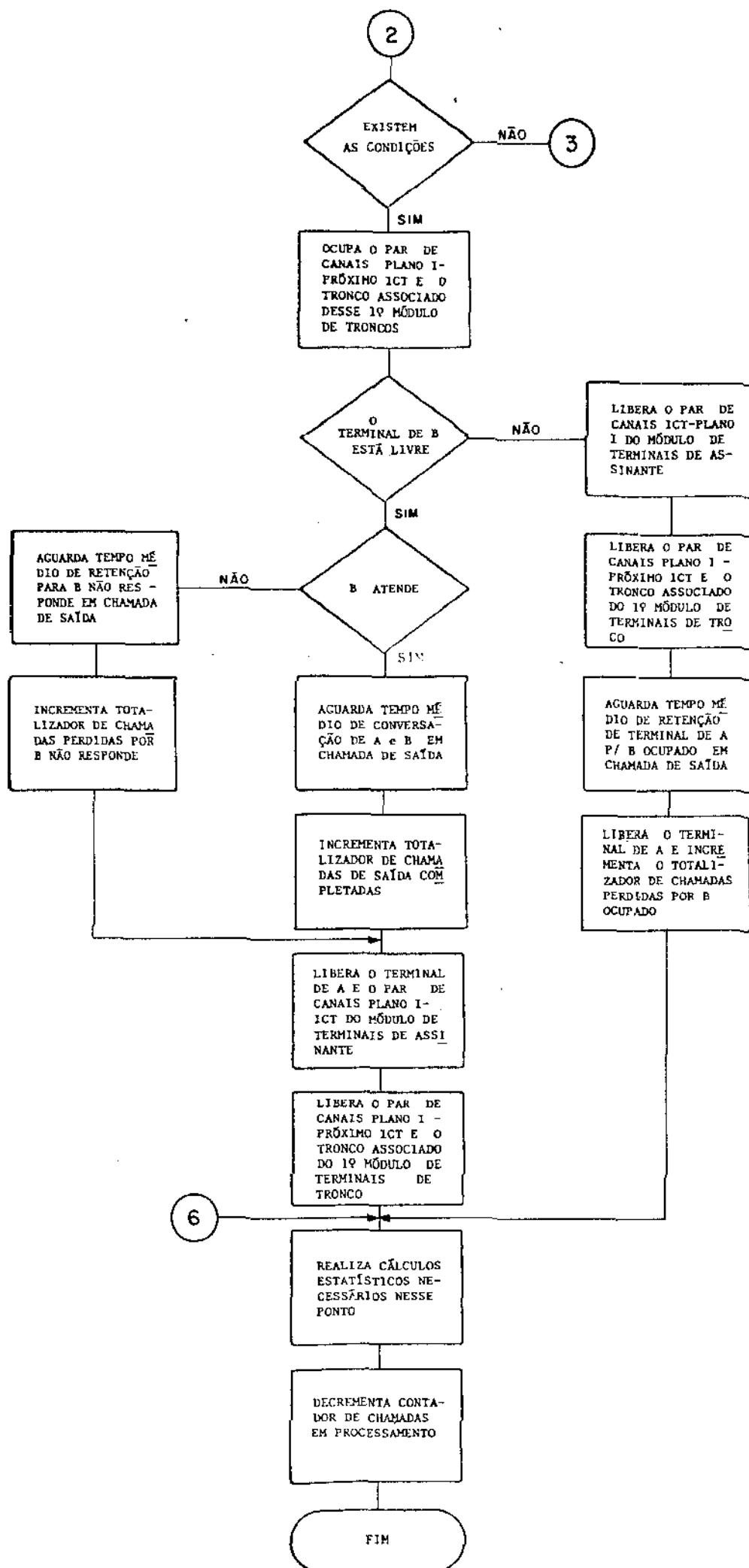


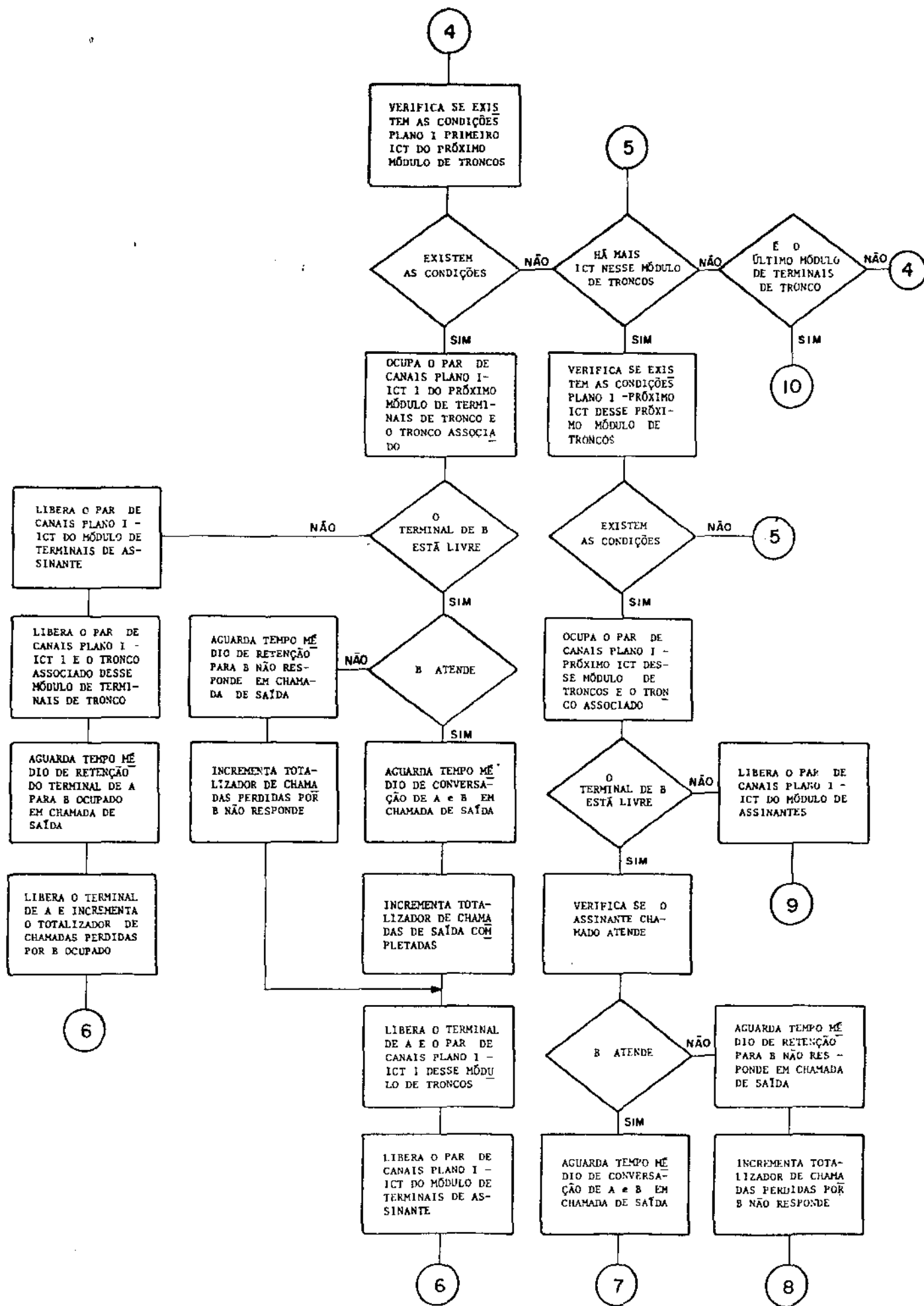


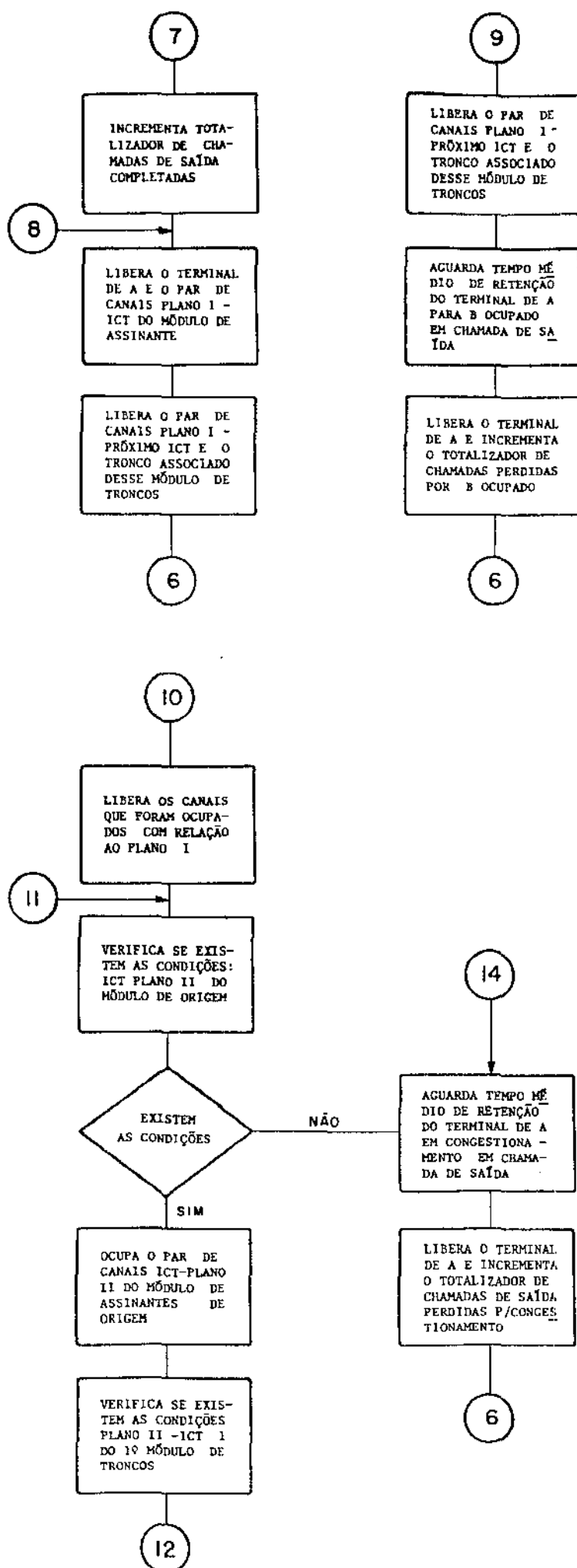
D.7 CHAMADA DE SAÍDA

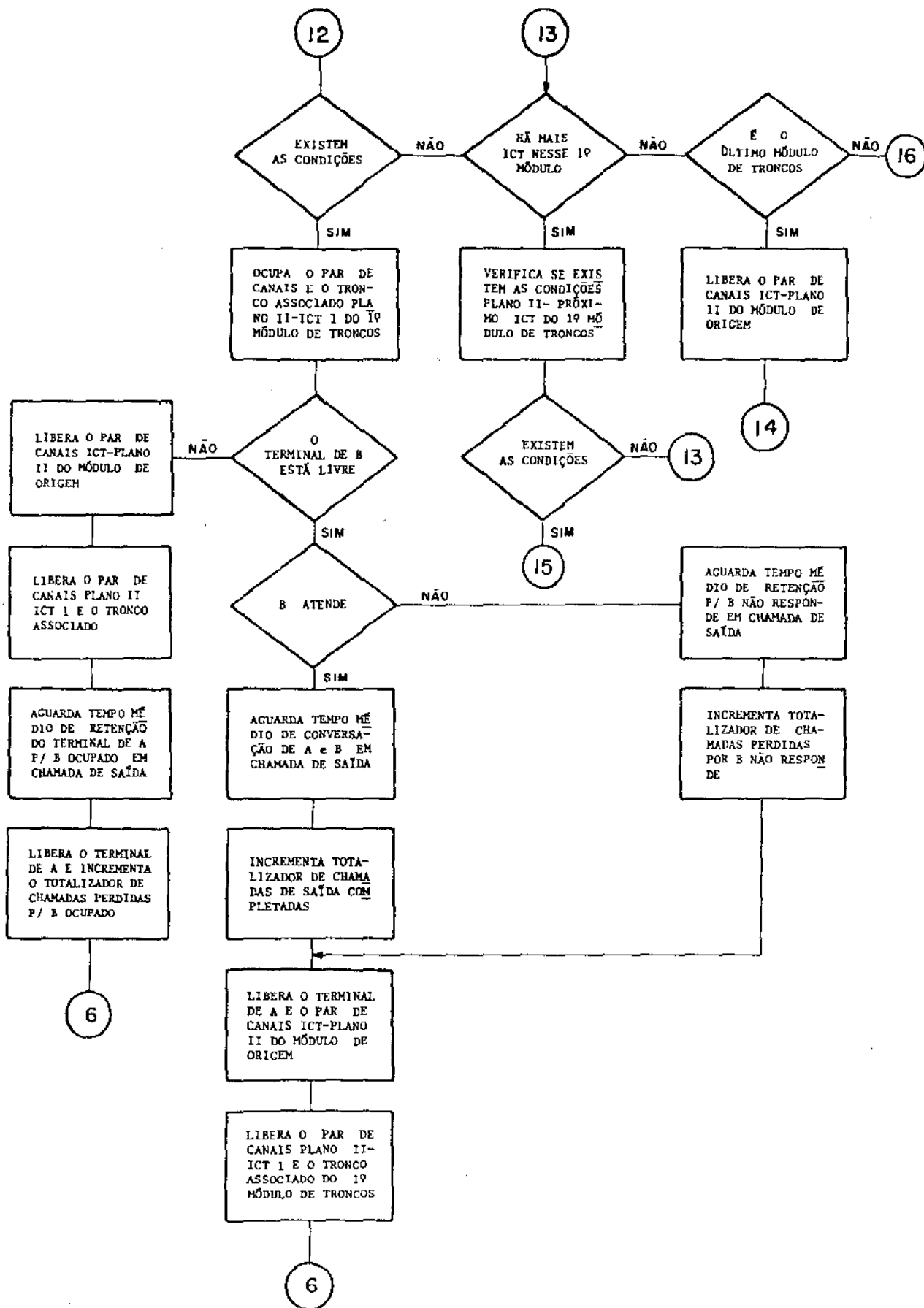


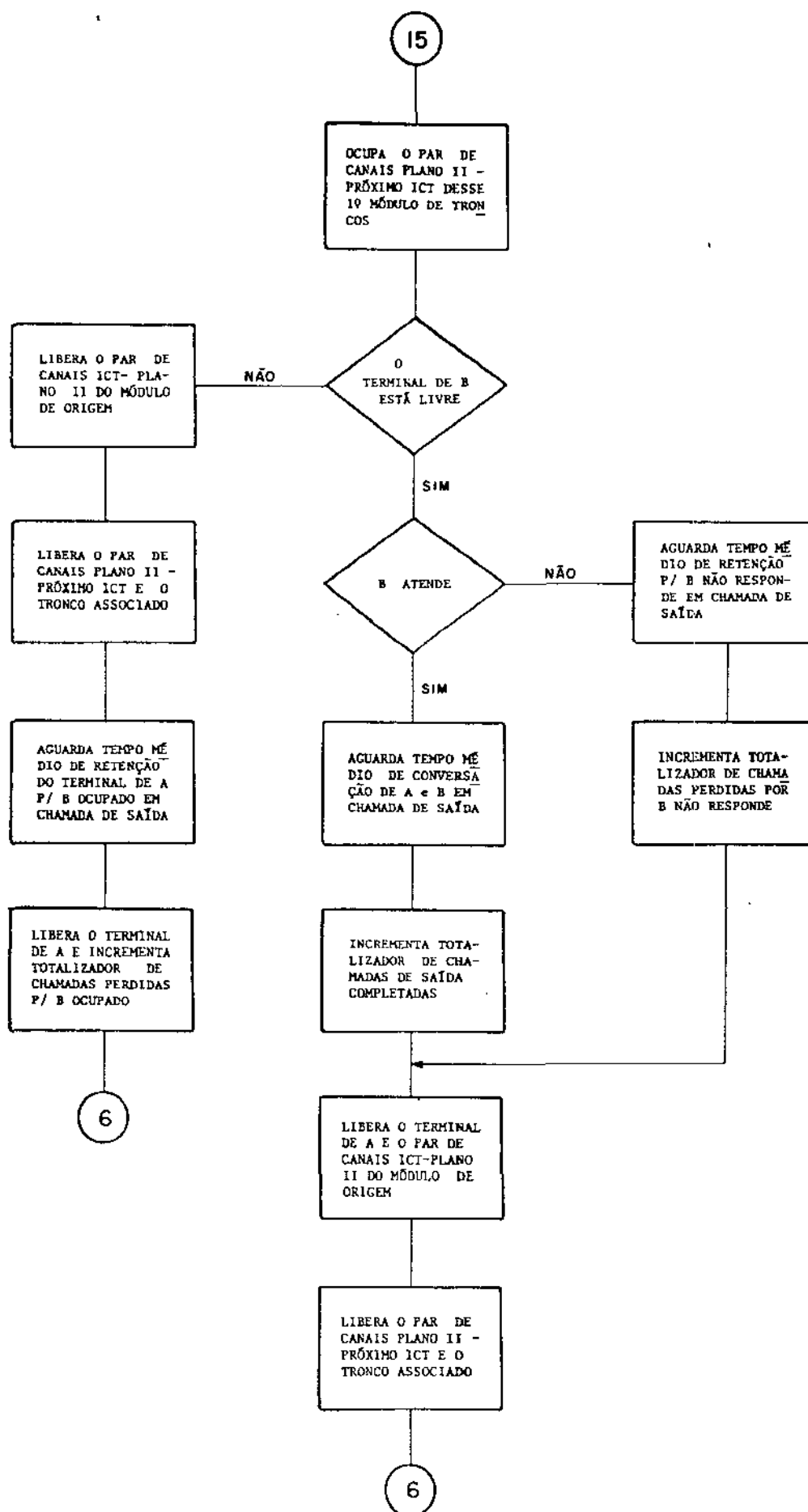


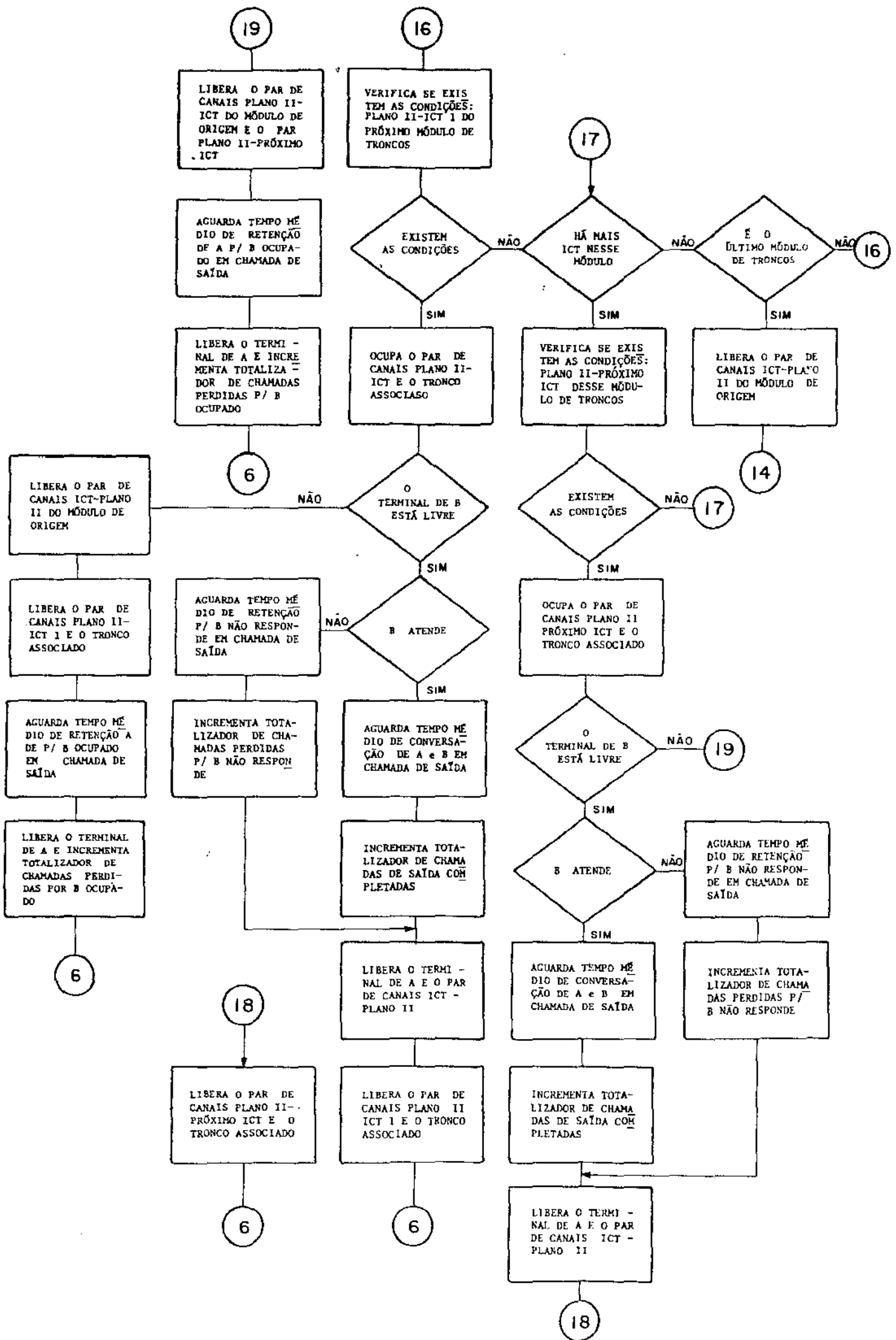












REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SHANNON,R.E.
Systems Simulation, the Art and Science
Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey 1975
2. MIHRAN,G.A.
Simulation: Statistical Foundations and Methodology
Academic Press - New York 1972
3. SCHRUBEN,L.W.
Establishing the Credibility of Simulations
Simulation, Vol. 3, Março 1980, pp. 101-105
4. GORDON,G.
System Simulation
Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1969
5. FELLER,W.
An Introduction to Probability Theory and Its Applications, Vol.II, John Wiley & Sons, Inc., New York 1971
6. BIRTWISTLE,G.M. ; DAHL,O.J. ; MYHRHAUG,B. ; NYGAARD,K.
Simula Begin
Auerbach Publishers Inc., Philadelphia, Pa. 1973
7. PICQUENARD,A.
Complementos de Telecomunicação, Vol. I e II, Pub. Interna, Departamento de Telecomunicações, ITA, São José dos Campos 1973.
8. EKAMBARAM,S.K.
Fundamentos Estatísticos da Inspeção por Amostragem
Editora Polígono, São Paulo 1971
9. DUMMER,G.W. & GRIFFIN,N.B.
Electronics Reliability - Calculation and Design
Pergamon Press Ltd. Oxford 1966
10. GNEDENKO,B. ; BÉLIAEV,Y. ; SOLOVIEV,A.
Méthodes Mathématiques in Théorie de la Fiabilité
Editions MIR, Moscou 1972
11. MINA,R.R.
Introduction to Teletraffic Engineering
Telephony Publishing Corporation, Chicago 1974

12. NIEDERCORN, J.H. & KANDOOLE, B.F.
A nonlinear Model of the U.S. Economy
Simulation, Vol. 1, Janeiro 1980, pp. 27-33
13. GREEN, W.L. & SPECKHART, F.H.
CSMP
Simulation, Vol. 4, Abril 1980, pp. 131-133
14. SHAFFER, W.A.
Dynamo
Simulation, Vol. 4, Abril 1980, pp. 134-136
15. CELLIER, F.E. & PRITSKER, A.A.B.
Gasp
Simulation, Vol. 4, Abril 1980, pp. 137-139
16. ATKINS, M.S.
A Comparison of SIMULA and GPSS for Simulating Sparse
Traffic
Simulation, Vol. 3, Março 1980, pp. 93-100
17. SCIULLI, J.A.
Satellite Circuit Simulator for Satellite Data Transmission
Systems
Telecommunications, Vol. 3, Março 1980, pp. 58-60
18. HELSGAUN, K.
DISCO - a SIMULA-based Language for Continuous Combined
and Discrete Simulation
Simulation, Vol. 7, Julho 1980, pp. 1-12
19. PRESCOTT, J.R.
Using Simulation in Small Business
Simulation, Vol. 1, Janeiro 1979, pp. 17-22
20. LEVI, A. & CARDILLO, D.D.L.
Simulation of a Rotating Track Production Line
Simulation, Vol. 11, Novembro 1978, pp. 155-166
21. PIMENTEL, J.R. & McVEY, E.S.
Digital Simulation Using Format Number Transforms
Simulation, Vol. 2, Fevereiro 1979, pp. 47-53

22. WEST,D.H.D.
Updating Mean and Variance Estimates: An Improved Method
Communications of the ACM, Vol. 22, nº 9, Setembro 1979,
pp. 532-535
23. MARKLAND,R.E.
A Simulation Approach to Real Estate Investment Analysis
Computer & Ops.Res., Vol. 6, pp. 121-128
24. DE BUSSY,L.C.
Méthode d'Évaluation de la Capacité d'Écoulement du
Trafic du Réseau de Connexion d'un Central Téléphonique
Spatial
Revue Technique Thomson-CSF, Vol. 11, nº 1, Mars 1979,
pp. 189-228
25. JAFARI,H. ; LEWIS,T.G. ; SPRAGINS;J.D.
Simulation of a Class of Ring-Structured Networks
IEEE Transactions on Computers, Vol. C-29, nº 5, Maio
1980, pp. 385-392
26. MONTGOMERY,D.C. & CONARD,R.G.
Comparison of Simulation and Flight-test Data for
Missile Systems
Simulation, Vol. 2, Fevereiro 1980, pp. 63-72
27. HEFFES,H.
A Class of Data Traffic Processes - Covariance Function
Characterization and Related Queuing Results
The Bell System Technical Journal, July-August 1980,
pp. 897-929
28. FREDERICKS,A.A.
Congestion in Blocking Systems - A Simple Approximation
Technique
The Bell System Technical Journal, July-August 1980,
pp. 805-827
29. MEYER,P.L.
Probabilidade - Aplicações à Estatística
Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de
Janeiro 1976