

DISPONIBILIDADE DO SAMSAT - SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DE DADOS  
VIA SATELITE USANDO A TÉCNICA AMDT

Giovanni Moura de Holanda  
Microlab/CPqD-TELEBRÁS

José Francisco M. S. Franco  
Raniêri de Araújo Gonçalves  
CPqD-TELEBRÁS  
Cx Postal 1579 - Campinas, SP.

RESUMO

A avaliação de confiabilidade de sistemas reparáveis, com unidades redundantes, consiste no emprego de técnicas e métodos devidamente elaborados que atendam a circunstâncias específicas. Este trabalho trata da análise de predição de disponibilidade do SAMSAT, através de modelos de Markov, onde são apresentados os resultados obtidos, envolvendo os Equipamentos de Banda-Básica das Estações do sistema, em função da estratégia de reparos.

1. INTRODUÇÃO

A análise de confiabilidade de sistemas complexos, composto por partes redundantes, com dispositivos para tolerância a falhas e facilidades de manutenção, implica, inicialmente, na escolha dos parâmetros que melhor traduzem as características de confiabilidade, juntamente com a metodologia para obtenção numérica desses parâmetros.

No caso particular do SAMSAT (sistema de comunicação de dados via satélite usando a técnica AMDT), a disponibilidade se apresenta como a escolha mais adequada para representar o nível de confiabilidade do sistema, indicando a probabilidade do mesmo se encontrar operacional num dado instante do tempo (1). Para a obtenção dos valores numéricos, um modelo de Markov que descreva o sistema como um processo markoviano (caracterizado por uma variável de estado discreta e uma variável de tempo contínua) (1,2), consiste num método de acesso aos valores de disponibilidade, apropriado e eficaz.

A disponibilidade do SAMSAT é caracterizada pela composição de três parâmetros: a disponibilidade das Estações de Referência (ER), das Estações Terminais Satélite (ETS) e de um enlace de tráfego de dados estabelecido entre duas ETS. Estas abordagens são baseadas na predição da taxa de falhas da estrutura de "hardware" dessas estações, na configuração aplicada na redundância e, na estratégia de reparos adotada, mediante a ocorrência de falhas.

Uma rápida revisão do modelo de Markov (2-5) é apresentada na seção 3 com o objetivo de mostrar os conceitos e terminologias, bem como o tratamento matemático, que nortearam a análise.

Os valores de disponibilidade obtidos através da metodologia adotada são apresentados nas seções 4-6, e dizem respeito aos Equipamentos de Banda-Básica (terminais AMDT) referentes às estações do sistema. Nestas seções também são tecidas considerações sobre o cálculo de disponibilidade, envolvendo os Equipamentos de

Rádio-Frequência (ERF).

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O SAMSAT é constituído por Estações Terminais Satélite (ETS), onde os usuários são conectados através de portas de acesso e, duas Estações de Referências (ER0 e ER1), responsáveis pelo controle, supervisão e operação do sistema (6).

A comunicação entre duas portas, pertencentes a ETS diferentes, entre as quais se estabelece um enlace, é feita através da técnica AMDT, utilizando-se recursos de um "transponder" do Brasilsat alocado para esta finalidade.

No contexto sistêmico, a Estação de Referência Primária (ER0) está preferencialmente ativa, ao passo que a Estação de Referência Secundária (ER1) encontra-se na condição de reserva, segundo o princípio de redundância "hot-standby", pronta para assumir a manutenção de sincronismo do sistema no caso da ER0 sair de operação. Esta mudança, entretanto, ocorre sem prejuízo da qualidade do serviço, ou seja, os enlaces estabelecidos são conservados sem que haja qualquer degradação no nível de confiabilidade do sistema (7).

Ainda com o intuito de prover serviços com alta confiabilidade, cada Estação de Referência apresenta redundância nas partes essenciais ao seu devido funcionamento, dentre elas, os Equipamentos de RF (ERF) e o Equipamento de Banda-Básica (EBR).

O EBR é caracterizado por dois planos idênticos, alimentados individualmente por uma fonte de alimentação (UCV), sendo cada um formado por um Bloco de Controle (BCT) e um Bloco MODEM (BMD), como mostra a figura 1. Cada plano pode passar de ativo a reserva e vice-versa, com o plano que se encontra na condição reserva sendo atualizado frequentemente pelo plano ativo, sobre as condições operacionais do sistema. Desta maneira, a mudança de planos ocorre sem que o equipamento

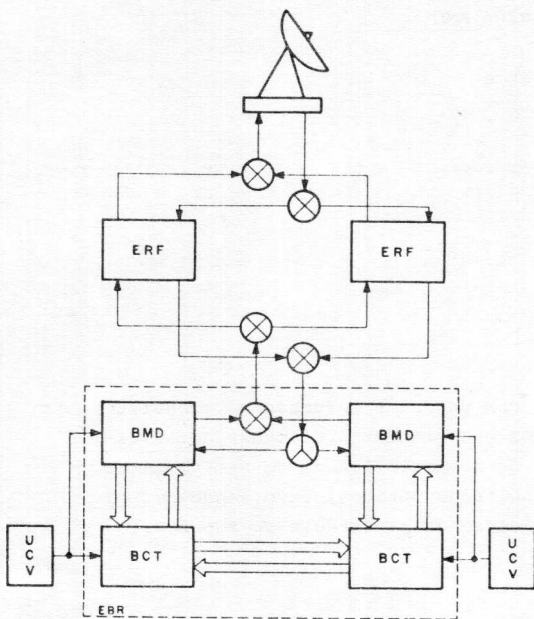


Fig 1  
DIAGRAMA DE BLOCOS ER0 e ER1

sofra interrupções de funcionamento.

Nas ETS, as fontes de alimentação (UCV) são redundantes (figura 2). Por motivo de redução de custos, o Equipamento de Banda-Básica (EBT) é formado apenas por um plano de controle, similar ao das ER, e Unidades de Linhas de Usuários (ULV/G).

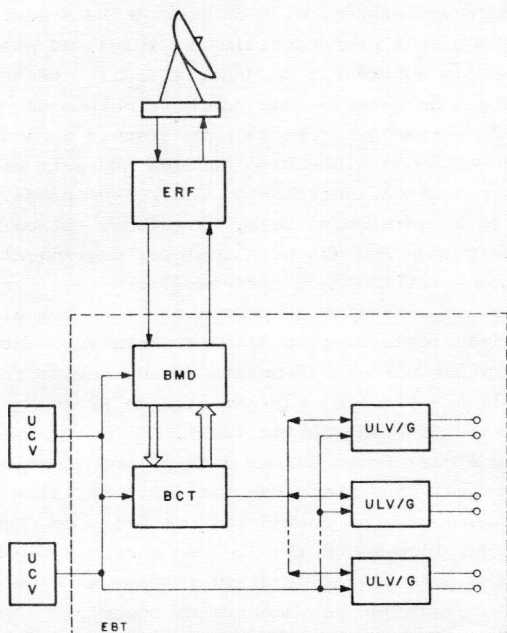


Fig 2  
DIAGRAMA DE BLOCOS DA ETS

### 3. MODELO DE MARKOV

Para sistemas complexos, sujeitos a falhas e reparos, o estabelecimento de um modelo estrutural através de um processo Markoviano, constitui um poderoso método de obtenção dos parâmetros de confiabilidade.

No sentido de formular o modelo de Markov, são definidos todos os estados mutuamente exclusivos do sistema, cujas probabilidades de transição entre eles obedecem as seguintes regras:

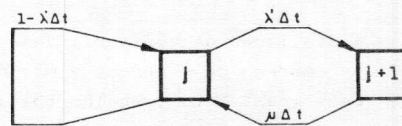


Fig 3  
PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO ENTRE DOIS ESTADOS

i) A probabilidade de transição no intervalo de tempo  $\Delta t$  de um estado para outro é dada por  $\lambda' \Delta t$ , onde  $\lambda'$  é a taxa de falha, considerada constante, associada aos estados em questão.

ii) A um estado pode estar associada uma probabilidade de reparo  $\mu$ . No intervalo  $\Delta t$ , a probabilidade de retorno ao estado anterior é  $\mu \Delta t$ .

iii) As probabilidades de ocorrerem mais de uma transição no intervalo  $\Delta t$  são desprezadas por se caracterizarem por termos infinitesimais de ordem superior.

A partir dessas condições é possível estabelecer as equações de transição de estado. Assim, a probabilidade do sistema se encontrar no estado  $j$  no instante  $t + \Delta t$  é dada por:

$$P_j(t + \Delta t) = (1 - \lambda' \Delta t) P_j(t) + \mu \Delta t P_{j+1}(t) \quad (1)$$

rearranjando:

$$(P_j(t + \Delta t) - P_j(t)) / \Delta t = -\lambda' P_j(t) + \mu P_{j+1}(t) \quad (2)$$

No limite, quando  $\Delta t \rightarrow 0$ , da equação (2) obtém-se:

$$dP_j(t) / dt = -\lambda' P_j(t) + \mu P_{j+1}(t) \quad (3)$$

ou

$$P_j'(t) = -\lambda' P_j(t) + \mu P_{j+1}(t) \quad (4)$$

As probabilidades  $P_j(t)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ , em um processo Markoviano com  $N$  estados, são obtidas através da resolução de um sistema de  $(N-1)$  equações diferenciais, obtidas diretamente do modelo mais a condição:

$$\sum_{j=1}^N P_j(t) = 1$$

Em se tratando de sistemas complexos, com elevado número de estados, a obtenção e resolução das expressões é um trabalho extenso, sendo necessário a utilização de métodos computacionais. O tratamento das equações através da formulação matricial proporciona uma avaliação direta das grandezas de confiabilidade, otimizando inclusive, o esforço computacional.

Com este propósito e considerando um modelo com N estados caracterizado por um processo Markoviano, a equação (4) pode ser reescrita da seguinte maneira (2):

$$P'_j(t) = \sum_{k=1}^N P_k(t) \lambda_{kj} \quad \text{com} \quad \lambda_{jj} = - \sum_{k=1, k \neq j}^N \lambda_{jk}$$

onde  $\lambda_{jk}$  é constante e representa a taxa de transição do estado  $j$  para o estado  $k$ .

Na forma matricial, tem-se  $\underline{P}' = \underline{P}A$

onde  $A$  é a matriz das taxas de transição com elementos  $\lambda_{jk}$ , podendo ser dividida segundo as transições entre os estados operacionais e de falhas, facilitando a obtenção da probabilidade na qual o sistema se encontra num estado operacional, o que estabelece a disponibilidade do mesmo. Assim, tem-se:

$$A = \begin{bmatrix} A_{oo} & A_{of} \\ A_{fo} & A_{ff} \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde  $A_{of}$  representa, por exemplo, a submatriz envolvendo as taxas de transição entre os estados operacionais (O) e os de falha (F).

Similarmente, o vetor  $\underline{P}$  pode ser dividido em  $\underline{P} = (\underline{P}_O \underline{P}_F)$ . Desta maneira,

$$\underline{P}' = (\underline{P}'_O \underline{P}'_F) = (\underline{P}_O \underline{P}_F) \begin{bmatrix} A_{oo} & A_{of} \\ A_{fo} & A_{ff} \end{bmatrix} \quad (6)$$

No modelo de Markov para a obtenção da disponibilidade (D) do sistema, não existem estados absorvedores, o processo é ergódico, caracterizado pela probabilidade de ocupação de qualquer estado ser independente do estado inicial. Para se chegar à expressão de disponibilidade, é preciso encontrar as probabilidades estacionárias de ocupação dos estados operacionais.

Como em regime estacionário  $P'(t) = 0$ , logo  $\underline{P}A = 0$ , e

$$\sum_{k=1}^N P_k = 1$$

substituindo a primeira coluna de  $A$  por 1 (2), obtém-se a seguinte expressão:

$$\underline{P}A_m = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \Rightarrow \underline{P} = [1 \ 0 \ \dots \ 0] [A_m]^{-1}$$

$$A_m = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \lambda_{N2} & \dots & \lambda_{NN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Considerando os estados operacionais, resulta

$$D = \underline{P}_O I = [1 \ 0 \ \dots \ 0] [A_m]^{-1} I \quad (8)$$

sendo  $I$  o vetor coluna de elementos unitários com dimensão igual ao número de estados operacionais.

#### 4. DISPONIBILIDADE DAS ER

No estabelecimento de um modelo de Markov que descreve o comportamento de um sistema, o grau de complexidade envolvido está relacionado com o número de es-

tados e as possibilidades de transição entre eles. Dentro desse contexto, uma configuração onde a quantidade de estados é reduzida, implica na obtenção de um modelo relativamente mais simples, com razoável facilidade de manuseio e elaboração. Esta configuração representa uma estimativa conservativa, atribuindo à avaliação uma considerável margem de segurança. Diante dessas circunstâncias, os resultados são obtidos com um nível de precisão compatível com o grau de detalhamento levantado na estruturação do modelo.

Desta maneira, se o modelo for capaz de fornecer resultados satisfatórios, em consonância com as expectativas de confiabilidade recomendadas (8), a análise de modelos mais complexos torna-se dispensável.

A seguir, são apresentados dois modelos para o sistema composto apenas pelas Estações de Referência, onde algumas considerações foram feitas com o intuito de simplificar o diagrama de estados, reduzindo o esforço despendido tanto na análise quanto no tratamento matemático.

Conforme descrito na seção 2, cada Estação de Referência pode ser visualizada apresentando redundância de 1 elemento em "hot-standby". Quanto às funções básicas, as duas Estações desempenhamo mesmo papel frente ao sistema, então, é razoável supor como uma primeira estimativa quatro planos idênticos e redundantes. Essa estimativa permite compor um diagrama de estados para avaliação da disponibilidade das ER, cujas taxas de transição são mostradas na figura 4.

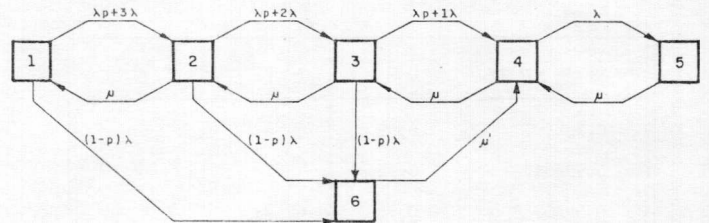


Fig. 4

DIAGRAMA DE ESTADOS DAS ER - I

Notação:

- Estado 1 → 4 planos em condições de operação.
- Estado 2 → 3 planos em condições de operação e 1 em falha.
- Estado 3 → 2 planos em condições de operação e 2 em falha.
- Estado 4 → 1 plano em operação e 3 em falha.
- Estado 5 → falha dos 4 planos. Representa um estado não operacional do modelo.
- Estado 6 → falha não coberta no plano que estava ativo. Também representa um estado não operacional.

$\lambda$  → taxa de falha relativa a cada plano, obtida a partir da norma MIL-HDBK-217-D(9).

$P$  → fator de cobertura de falhas (3), ou seja, a capacidade de detecção de falhas com a subsequente mu

dança de plano.

$\mu \rightarrow$  taxa de reparo associada ao estado 5, considera da constante.

$\mu' \rightarrow$  taxa de reparo associada ao estado 6. Em condições normais  $\mu' > \mu$ , também considerada constante.

A partir do diagrama de estados apresentado na figura 4, obtêm-se as seguintes expressões:

$$P'_1(t) = -4\lambda P_1(t) + \mu P_2(t) \quad (9)$$

$$P'_2(t) = (\lambda p + 3\lambda) P_1(t) - (3\lambda + \mu) P_2(t) + \mu P_3(t) \quad (10)$$

$$P'_3(t) = (\lambda p + 2\lambda) P_2(t) - (2\lambda + \mu) P_3(t) + \mu P_4(t) \quad (11)$$

$$P'_4(t) = (\lambda p + \lambda) P_3(t) - (\lambda + \mu) P_4(t) + \mu P_5(t) + \mu' P_6(t) \quad (12)$$

$$P'_5(t) = \lambda P_4(t) - \mu P_5(t) \quad (13)$$

$$P'_6(t) = (1-p)\lambda P_1(t) + (1-p)\lambda P_2(t) + (1-p)\lambda P_3(t) - \mu' P_6(t) \quad (14)$$

Consequentemente,

$$A_m = \begin{bmatrix} 1 & (\lambda p + 3\lambda) & 0 & 0 & 0 & (1-p)\lambda \\ 1 & -(3\lambda + \mu) & (\lambda p + 2\lambda) & 0 & 0 & (1-p)\lambda \\ 1 & \mu & -(2\lambda + \mu) & (\lambda p + \lambda) & 0 & (1-p)\lambda \\ 1 & 0 & \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \mu & -\mu & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \mu' & 0 & -\mu' \end{bmatrix} \quad (15)$$

Utilizando a equação (8), através de um programa computacional, com a matriz  $A_m$  (15) relativa a esse modelo, obtêm-se os valores de disponibilidade em função de alguns parâmetros de entrada, conforme mostra a tabela I.

| DISPONIBILIDADE DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA (Der) | p    | $\mu$ | $\mu'$ |
|--|------|-------|--------|
| 0,9999997  | 0,99 | 1     | 6      |
| 0,9999993  | 0,98 | 1     | 6      |
| 0,9999988  | 0,96 | 2     | 6      |
| 0,9999978  | 0,95 | 1     | 4      |

TABELA I - DISPONIBILIDADE DAS ER ( $D_{er}$ )

Os resultados apresentados na tabela I dizem respeito aos Equipamentos de Banda-Básica (Controle e MODEM) das Estações de Referência. A seção 6 trata da extensão dessa análise para as demais estações do SAMSAT, apresentando os parâmetros de um enlace de tráfego de dados, assim como a implicação resultante da avaliação envolvendo também os Equipamentos de RF.

Para o primeiro modelo apresentado, os resultados obtidos foram condizentes com os valores esperados, indicando alta disponibilidade diante da complexidade envolvida pelo sistema. Desta forma, torna-se desnecessário o prosseguimento em modelos mais detalhados, com equações mais extensas e maior tempo de análise. Entretanto, na figura 5 é apresentada uma configuração que

retrata um maior número de situações, nas quais o sistema pode se encontrar, tratando-se de um modelo menos conservativo.

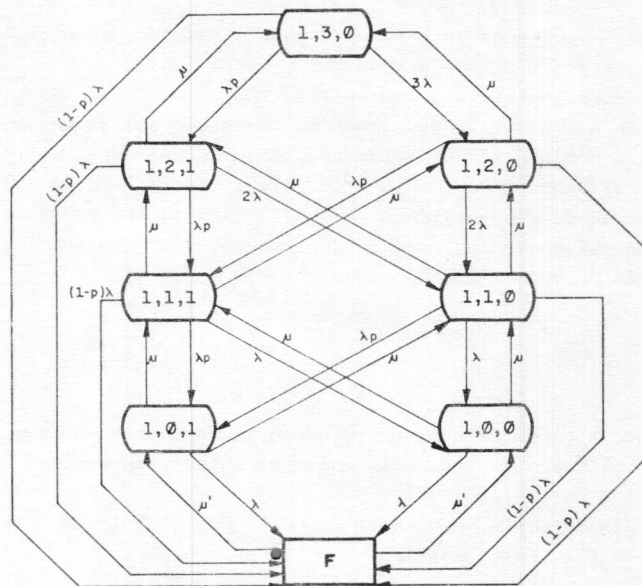


Fig. 5

#### DIAGRAMA DE ESTADOS DAS ER-II

Para esta configuração, um conjunto de três números é utilizado para denotar os estados do sistema. Os parâmetros relativos às taxas de transição obedecem a mesma notação do modelo anterior. No caso, como o número de estados assume proporções significativas, uma representação geral é adotada para descrever os estados, simbolizados por  $(x, y, z)$ .

$x = 1$  representa plano ativo, o sistema encontra-se em operação.

$y$  indica o número de planos reserva em condições operacionais.

$z = 1$  indica a ocorrência de chaveamento entre planos, ou seja, o plano que estava ativo falhou e o reserva assumiu.

$z = 0$  indica a não ocorrência de chaveamento.

#### 5. DISPONIBILIDADE DAS ETS

No caso de uma ETS, a disponibilidade é dada diretamente pelo tempo médio na qual passa em operação e o tempo médio dispensado nos reparos (1).

$$D_{ets} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \quad (16)$$

Na equação (16) o MTBF (tempo médio entre falhas) é o inverso da taxa de falhas associada à estrutura de "hardware", obtida pelo método apresentado no MIL-HDBK-217 D (9) e, o MTTR (tempo médio para reparos), o inverso da taxa de reparos. A tabela II apresenta valores de disponibilidade do Equipamento de Banda-Básica

de uma ETS, em função da estratégia de reparos.

| Disponibilidade de uma Estação Terminal ( $D_{ets}$ ) | MTTR (h) |
|---|----------|
| 0,999915  | 0,5      |
| 0,99983   | 1        |
| 0,99966   | 2        |
| 0,99949   | 3        |

TABELA II - DISPONIBILIDADE DE UMA ETS ( $D_{ets}$ )

#### 6. DISPONIBILIDADE DE UM ENLACE

No SAMSAT, o estabelecimento de um enlace abrange as duas ETS envolvidas na comunicação, as Estações de Referência e, naturalmente, o satélite. A avaliação de disponibilidade aqui apresentada não engloba as interrupções proporcionadas pelos efeitos de propagação, erros humanos de operação e indisponibilidade do satélite devido a falhas ou interferências do sol.

Desta maneira, a disponibilidade do enlace entre dois usuários ligados as suas respectivas ETS é dada por:

$$D_{enl} = D_{ets_1} \cdot D_{er} \cdot D_{ets_2} = D_{ets}^2 \cdot D_{er} \quad (17)$$

onde:

$$D_{ets} = D_{ebt} \cdot D_{erf} \quad e \quad D_{er} = D_{ebr} \cdot D_{erf}$$

Sendo  $D_{ebt}$  a disponibilidade do Equipamento de Banda-Básica das ETS,  $D_{ebr}$  a disponibilidade do Equipamento de Banda-Básica das ER e,  $D_{erf}$  a disponibilidade dos Equipamentos de RF.

A tabela III apresenta valores de disponibilidade para um enlace, a partir dos valores mostrados nas tabelas I e II, onde são considerados apenas os Equipamentos de Banda-Básica.

| DISPONIBILIDADE DE UM ENLACE ( $D_{enl}$ ) | DISPONIBILIDADE DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA ( $D_{er}$ ) | DISPONIBILIDADE DE UMA ESTAÇÃO TERMINAL SATÉLITE ( $D_{ets}$ ) |
|--|---|--|
| 0,999829                                   | 0,9999997   | 0,999915   |
| 0,999659                                   | 0,9999993   | 0,99983  |
| 0,999319                                   | 0,9999993   | 0,99966  |

TABELA III - DISPONIBILIDADE DE UM ENLACE ( $D_{enl}$ )

A avaliação envolvendo também a disponibilidade dos Equipamentos de RF complementam os valores encon-

trados na tabela III, no sentido de definir a disponibilidade do enlace. Neste procedimento conjunto, é esperado que o nível de confiabilidade dos Equipamentos de RF esteja de acordo com os requisitos adotados na concepção do sistema, de forma que o valor de disponibilidade do enlace atenda às necessidades do usuário.

#### 7. CONCLUSÃO

O modelo de Markov apresentou-se como uma ferramenta eficiente e de relativa facilidade de manuseio na análise dos parâmetros de disponibilidade em questão, proporcionando a obtenção dos resultados mostrados nas tabelas I, II e III, os quais satisfazem os propósitos adotados na concepção e execução do projeto SAMSAT.

Vale salientar ainda, como mostram os resultados, a importância da estratégia de reparos para os valores de disponibilidade apresentados.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Jorge Moreira de Souza as valiosas sugestões; a André Luis R.G. de Carvalho o apoio computacional prestado; e a Biba Capodeferro os serviços de edição de texto.

#### REFERÊNCIAS

- (1) M.L. Shooman, "PROBABILISTIC RELIABILITY: AN ENGINEERING APPROACH. New York; McGraw Hill, 1968.
- (2) J.M. Souza, M.R.B. Martini, "AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS". In: Introdução à tolerância a falhas (mini curso). 2º Simpósio em Sistemas de Computadores Tolerantes a falhas, Campinas, pp. 5-62, 1987.
- (3) T.F. Arnold, "The concept of coverage and its effect on the reliability model of a repairable Systems", IEEE Trans. on computers, vol.C-22, pp. 251-254, mar. 1973.
- (4) J.A. Buzzacott, "Markov approach to find failure times of repairable systems" IEEE Trans. on Reliability, vol.R-19, pp.128-133, Nov. 1970.
- (5) I.A. Papazoglov, E.P. Gyftopoulos, "Markov process for reliability analyses of large systems", IEEE Trans. on Reliability, vol. R-26, pp.232-237, Aug. 1977.
- (6) R.A. Gonçalves, "Sistema de comunicação de dados via satélite usando a técnica AMDT com multifrequência-SAMSAT", 4º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Anais, pp.173-177, Rio de Janeiro, 1986.
- (7) R.A. Gonçalves, et al., "Filosofia e mecanismos de tolerância a falhas utilizados no SAMSAT", 2º Simpósio em Sistemas de Computadores Tolerantes a Falhas, Anais, Campinas-SP, pp.63-74, 1987.
- (8) ITU-CCIR. Plenary Assembly, 16., Dubrovnik, 1982. Recommendations and reports of the CCIR. Vol.IV part I. Fixed-Satellite Service. Geneva, ITU, 1982.
- (9) Military Standardization Handbook 217 D, "Reliability Prediction of Electronic Equipment", 1982.