

3 Nova Abordagem para Simulação

3.1. Introdução:

Neste capítulo, apresentar-se-á uma variante da abordagem em [1], que consiste na substituição das fotografias originais por modelos digitais de elevação (MDE) em conjunto com bases de dados de edificações e com um modelo para a vegetação. As bases de dados de edificações foram adquiridas no Instituto Pereira Passos (IPP) [8], órgão público vinculado à Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. Os modelos digitais de elevação utilizados foram os resultantes do projeto GLOBE [9]. A partir desse conjunto de dados, se consegue reproduzir o horizonte de um observador de forma muito semelhante às das fotografias citadas anteriormente. Além da substituição das fotografias pelos resultados do processamento dos dados indicados, agregou-se também à simulação um módulo computacional que representa a dinâmica orbital das constelações de satélites em estudo. Com isso, deseja-se obter estatísticas temporais de desvanecimentos e de eventos de desvanecimento, que não foram objeto de estudo na abordagem original [1], [2], [6] e [7]. Deve-se ressaltar aqui que na presente dissertação e na simulação utilizada não se considerou a influência do efeito Doppler nos resultados obtidos.

Entre as motivações para se implementar esta variante, pode-se citar:

- o barateamento do custo do processo de aquisição de dados e conseqüente simulação, uma vez que o procedimento de aquisição de fotografias em si também é um procedimento demorado e custoso;
- a possibilidade de se obter estimativas igualmente satisfatórias para os fatores de disponibilidade com relativa agilidade.

A principal desvantagem deste tipo de abordagem é a dificuldade de se obter bases de dados com resolução satisfatória e com um formato de apresentação dos dados padronizado. Na grande maioria das vezes, tais tipos de bases de dados possuem resolução muito baixa (quadrículas de 30" x 30" em

latitude e longitude) e a forma como estes dados são apresentados varia muito de instituição para instituição.

3.2.

Estrutura da simulação:

Basicamente, o procedimento de simulação consiste de uma série de sub-rotinas interligadas, cada uma com uma função específica. Podemos dizer, então, que estas funções são:

1. conversão e tratamento das bases de dados de edificações;
2. geração de observadores para simulação segundo critérios pré-estabelecidos;
3. geração das imagens para os observadores;
4. representação da dinâmica orbital dos satélites envolvidos;
5. estimação do desvanecimento sofrido pelo sinal proveniente dos satélites, segundo o modelo em [1];
6. geração de funções densidade de probabilidade e funções distribuições cumulativas para o desvanecimento sofrido pelo sinal proveniente dos satélites, o número de eventos, a duração de eventos, o número de inter-eventos e a duração de inter-eventos.

A simulação utilizada neste estudo pode ser resumida nos seguintes procedimentos, realizados em cada passo:

1. atualização das posições dos satélites da constelação;
2. determinação do estado de cada percurso entre um observador e um satélite cuja elevação supera o limiar inferior especificado, utilizando a imagem correspondente;
3. cálculo do desvanecimento para cada percurso identificado no item anterior, utilizando geradores de números aleatórios segundo o modelo apresentado no capítulo 2 para o estado determinado;
4. incremento dos histogramas relativos aos diversos parâmetros de interesse.

O procedimento é repetido até que todo o período de simulação (em dias) seja cumprido. Ao final da simulação, as distribuições cumulativas dos parâmetros de interesse são obtidas a partir dos histogramas correspondentes.

3.3. Bases de Dados de Edificações:

Como já fora citado anteriormente, nesta simulação fez-se uso de bases de dados fornecidos pelo Instituto Pereira Passos (IPP) [8], órgão vinculado à Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, em conjunto com modelos digitais de elevação (MDE) provenientes do projeto GLOBE [9].

Em tais bases de dados, cada arquivo representa uma área geográfica (bairro ou parte do mesmo) da cidade do Rio de Janeiro.

Na presente simulação, fez-se uso de 10 arquivos, posteriormente agrupados de modo a representar quatro regiões da cidade do Rio de Janeiro. São elas:

1. Copacabana;
2. Ipanema;
3. Tijuca;
4. Colégio e Irajá.

A escolha destas áreas foi feita com base na distribuição de alturas das edificações presentes em cada região e a distância entre bairros.

3.3.1. Formato de Apresentação dos Arquivos do IPP:

Uma característica muito importante a ser citada é o formato de apresentação das bases de dados. Tais características definem o tratamento dado a estas informações com o intuito de se obter os dados necessários à simulação.

As bases de dados se apresentam sob a forma de arquivos de extensão “.DXF” (*Drawing Exchange File*). Estes são arquivos de texto próprios para intercâmbio de informações entre a plataforma AUTOCAD™ [10] e outras plataformas CAD / CAM.

De uma forma resumida, estes arquivos são listas de instruções e características que definem uma figura ou conjunto de figuras geométricas, a serem apresentadas na tela do computador. O próprio software se encarrega de mesclar todos estes objetos para formar a representação final. A representação gráfica do conteúdo de um dos arquivos utilizados, correspondente a parte da região de Ipanema, pode ser observada na figura 3-1.



Figura 3-1 – Exemplo de base de dados apresentada pelo IPP, sob o formato de arquivo de intercâmbio “.DXF” [8].

Nos arquivos do Instituto Pereira Passos, cada entidade (edifício, viaduto, praça, etc.) é classificada com um número, um nome e uma lista de coordenadas UTM geo-referenciadas.

3.3.2. Manipulação dos Dados de Edificações:

As bases de dados como se apresentavam originalmente, constituíam um obstáculo para a simulação. O tratamento de tais tipos de arquivos em seu formato original (.DXF) caracterizava um esforço grande e desnecessário uma vez que só se precisava de algumas das informações constantes nestes arquivos.

As entidades utilizadas foram apenas as edificações e os meio-fios. As edificações eram importantes por, juntamente com os dados topográficos provenientes do MDE, caracterizarem as áreas das imagens representativas do estado bloqueado. Os meio-fios foram utilizados para especificar as posições das árvores (que caracterizam as áreas das imagens representativas do estado sombreado) [8,9]. Como ilustração do resultado deste processamento parcial, a figura 3-2 mostra as edificações, os meios-fios e os observadores correspondentes à região de Ipanema.

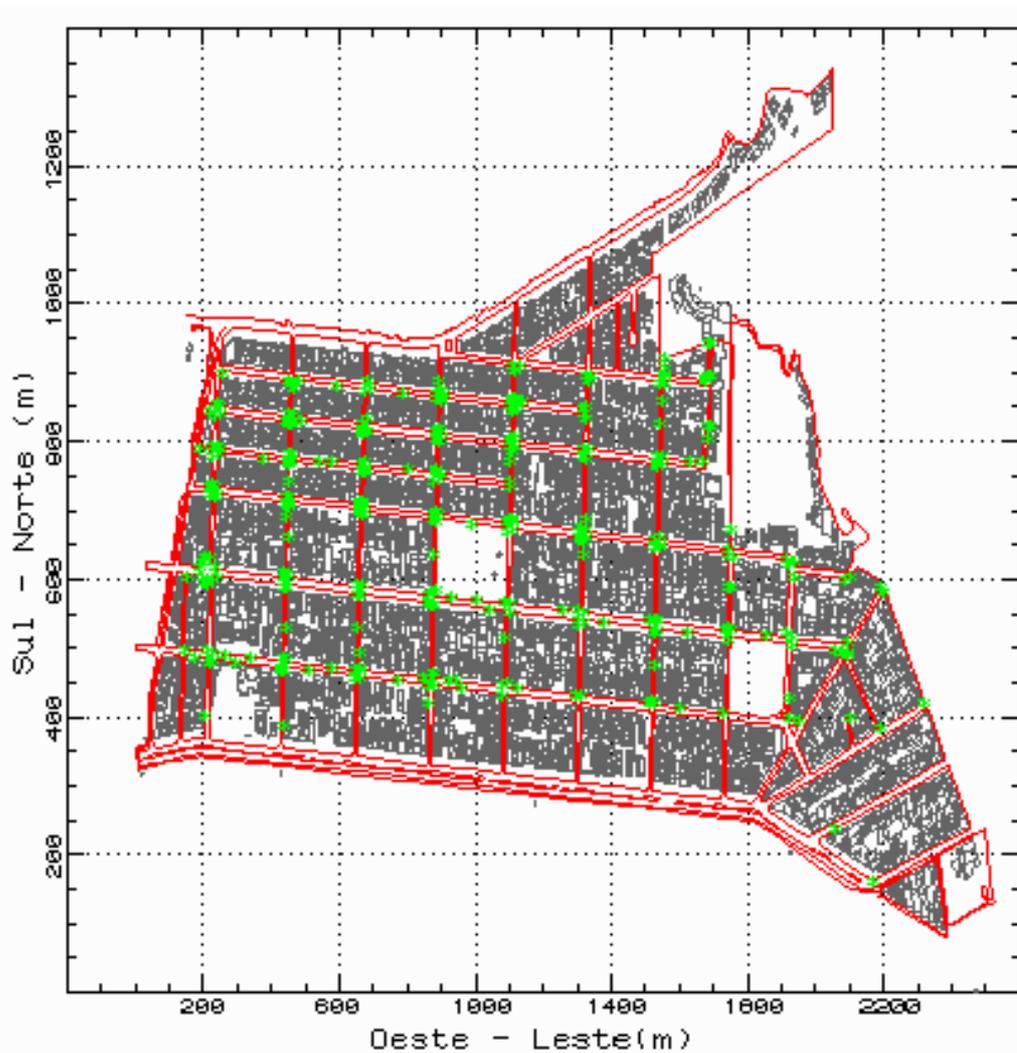


Figura 3-2 - Edificações (polígonos cinzas), meios-fios (polígonos vermelhos) e observadores (símbolos verdes) correspondentes à região de Ipanema.

As bases de dados correspondentes às regiões de Copacabana, Ipanema, Tijuca e Colégio/Irajá são caracterizadas por 8831, 5454, 13275 e 12946 edificações, respectivamente.

Como apresentado anteriormente, parte do desvanecimento contabilizado no modelo apresentado por Karasawa et al. [5] se deve ao sombreamento pela vegetação. Infelizmente, as bases de dados do IPP não fornecem informações sobre as posições de árvores em formato adequado à simulação. A solução adotada foi criar um sólido geométrico padronizado, mostrado na figura 3-3, para representar uma árvore e posicioná-lo repetida e uniformemente ao longo dos meios-fios, conforme indicado na figura 3-4. Embora saiba-se que as árvores típicas das regiões simuladas nem sempre serem perenes durante o ano, preferiu-se adotar um modelo considerando-as sempre perenes por uma questão

de simplificação do processo de simulação e devido a influência deste fator nos resultados ser pequena, considerando-se as características das regiões simuladas. As figuras 3-3 e 3-4 apresentam, também, as variáveis utilizadas no modelo de vegetação, assim como seus respectivos valores.

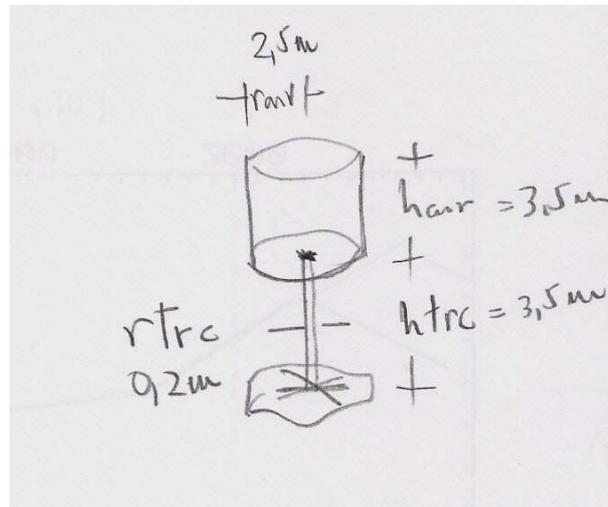


Figura 3-3 – Modelo de concepção do objeto árvore, utilizado nas simulações em estudo, com descrição dos seus parâmetros constituintes e suas respectivas dimensões.

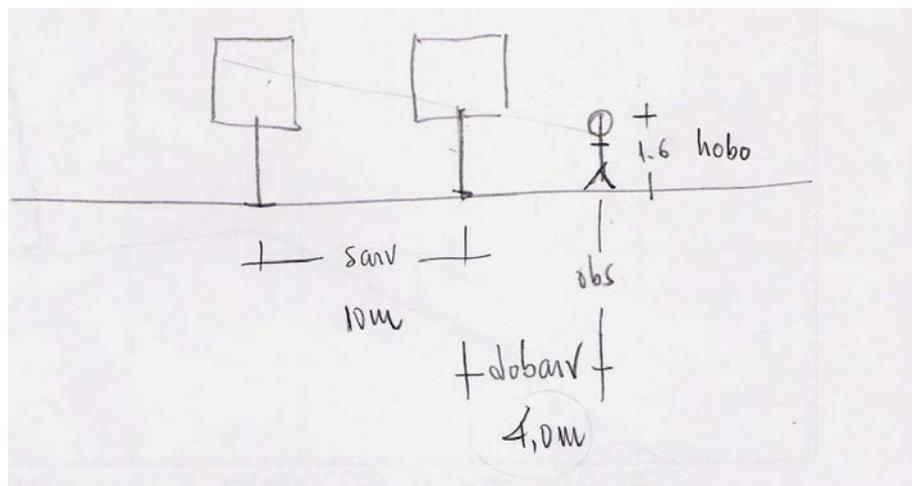


Figura 3-4 – Exemplo de posicionamento relativo árvore – observador, com descrição dos parâmetros de posicionamento dos mesmos.

Os observadores foram igualmente localizados sobre os meios-fios. Evitou-se nesta simulação a ocorrência de situações nas quais o observador se encontrasse imediatamente abaixo da copa das árvores. Nesta situação, um percentual elevado da imagem correspondente a esse observador, a partir de uma dada elevação, se encontraria completamente encoberto pela vegetação, o

que seria uma situação pouco representativa para as estimativas. Foi dada forte preferência a observadores localizados nas esquinas das quadras, conforme mostra a figura 3-2. Em princípio, estas localizações são mais favoráveis à recepção dos sinais dos satélites. Por outro lado, foram evitadas as posições situadas nas periferias das regiões estudadas, que produziriam artificialmente, em algumas regiões, imagens com forte predominância do estado C.

Nas regiões de Copacabana, Ipanema, Tijuca e Colégio / Irajá foram localizados, respectivamente, 373, 307, 347 e 286 observadores.

Para gerar a imagem correspondente a cada observador selecionado, a elevação do seu horizonte foi inicialmente determinada para cada azimute múltiplo de 1° , utilizando unicamente o MDE. Esta imagem inicial apresenta apenas os estados livre (acima do horizonte) e bloqueado (abaixo do horizonte). Em seguida, os dados de edificações e de vegetação são submetidos a processamento adicional através do uso de rotinas de geometria computacional, sendo o resultado obtido superposto à imagem inicial, de forma a gerar a imagem final correspondente a cada observador selecionado. Como ilustração do resultado deste processamento, a figura 3-5 mostra a imagem final correspondente a um observador localizado na região de Ipanema. Nesta figura, os estados C, S e B são apresentados nas cores azul, verde e vermelha, respectivamente.

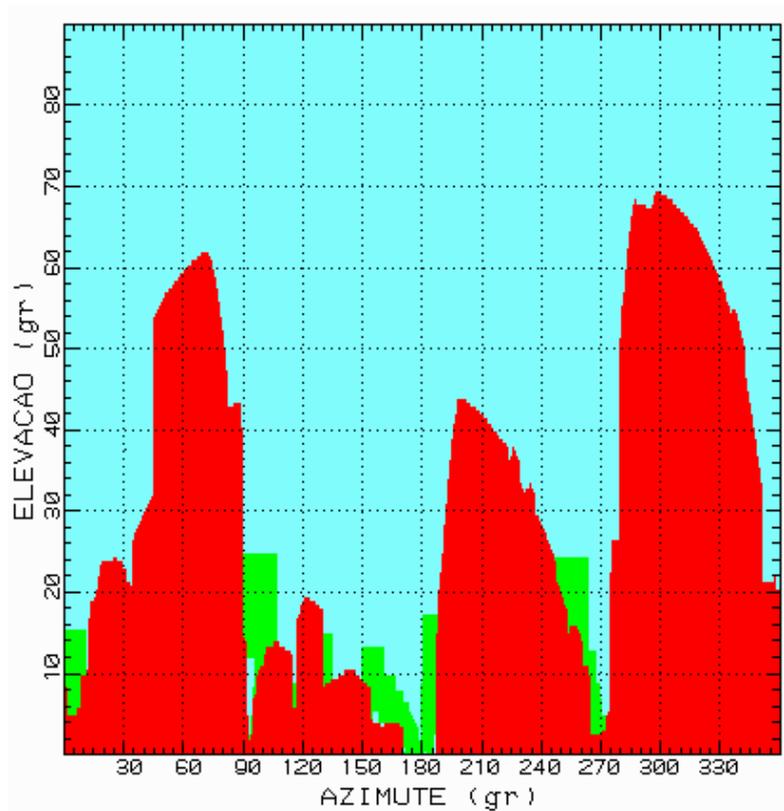


Figura 3-5 - Imagem correspondente a um observador localizado na região de Ipanema, com os estados C, S e B apresentados nas cores azul, verde e vermelha, respectivamente.

3.4. Dinâmica Orbital:

A presente implementação [11]-[13] considera N_{po} planos orbitais, cada um caracterizado pela sua inclinação i_k (ângulo entre estes planos e o plano equatorial da Terra) e pela longitude Ω_k do seu nó ascendente ($k = 1, \dots, N_{po}$). O nó ascendente é o ponto da linha dos nós (interseção do plano orbital do satélite com o plano equatorial da Terra) no qual o satélite transita do hemisfério Sul para o Norte. Deve-se fornecer, ainda, os valores a_k do semi-eixo maior e e_k da excentricidade ($0 \leq e_k < 1$) da elipse que descreve a órbita dos satélites localizados no plano orbital k . Adicionalmente deve-se fornecer o ângulo ω_k (argumento do perigeu) medido no plano orbital entre a linha dos nós e o eixo origem-perigeu correspondente, sendo o perigeu o ponto de menor altitude da órbita. A presente implementação supõe a existência, em cada plano orbital, de uma distribuição uniforme de N_{spo} satélites, caracterizada pelo espaçamento angular constante entre as anomalias médias de dois satélites consecutivos. Finalmente, supõe conhecida a anomalia média M_o no instante inicial de cada satélite que descreve esta órbita.

Obviamente, o número total N_s de satélites da constelação é obtido somando-se os números de satélites em todos os planos orbitais.

3.4.1. Órbitas Elípticas:

Omitindo os índices do parágrafo anterior, tem-se que a posição (r, θ) ou (x'', y'') de cada um destes satélites no plano da órbita em função do tempo t , supondo o sistema de coordenadas polar com origem no centro da Terra e com ângulos medidos no sentido anti-horário a partir do eixo origem-perigeu mostrado na figura 3-6 (sistema perifocal), é determinada pelas expressões:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta} \quad (3.1)$$

$$\theta = 2 \arctan \left[\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan(E/2) \right] \quad (3.2)$$

$$x'' = r \cos \theta; \quad y'' = r \sin \theta \quad (3.3)$$

Nas expressões acima, $p = a(1 - e^2)$, θ é a anomalia verdadeira e a anomalia excêntrica E é obtida, no caso mais geral, como o resultado da solução numérica da equação:

$$E - e \sin E = M \quad (3.4)$$

onde a anomalia média M é dada por:

$$M = M_o + \frac{2\pi}{T} t \quad (3.5)$$

sendo $T = 2\pi (a^3/m)^{1/2} = 9.952004586 \times 10^{-3} a^{3/2}$ o período da órbita e $m = GM_T = 398600.5 \text{ km}^3/\text{s}^2$ (G é a constante gravitacional e M_T é a massa da Terra).

Desta forma, a posição (x', y', z') de cada satélite em função do tempo t , no sistema de coordenadas equatorial (inercial) mostrado na figura 3-7 é determinada pela transformação:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega \cos \Omega - \sin \omega \cos i \sin \Omega & -\sin \omega \cos \Omega - \cos \omega \cos i \sin \Omega \\ \cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos i \cos \Omega & -\sin \omega \sin \Omega + \cos \omega \cos i \cos \Omega \\ \sin \omega \sin i & \cos \omega \sin i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

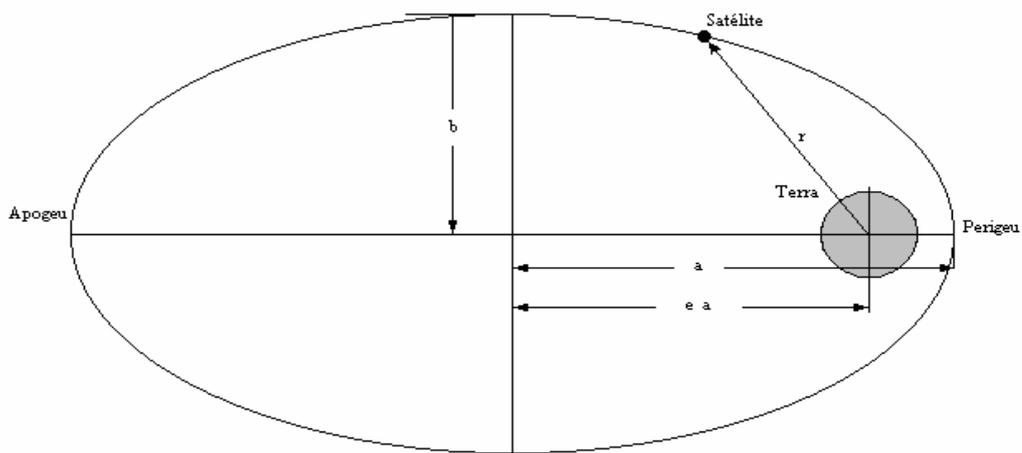


Figura 3-6 - Geometria de uma órbita no sistema perifocal (reproduzida da referência [11]).

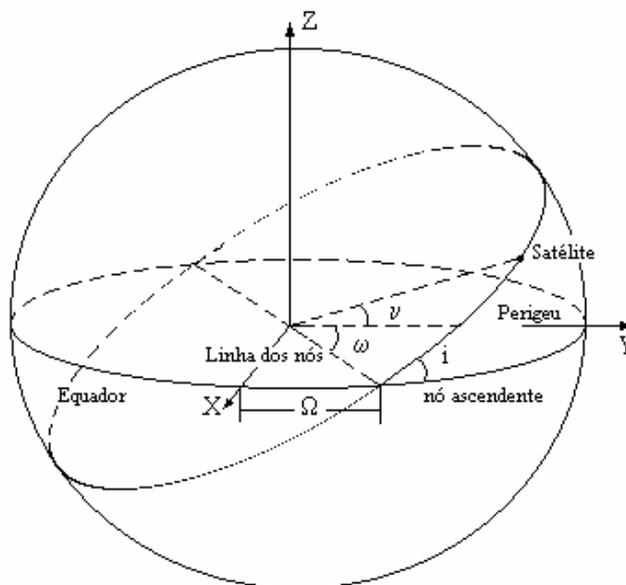


Figura 3-7 - Orientação de uma órbita no sistema inercial (reproduzida da referência [11]).

3.4.2. Órbitas Circulares:

No caso de órbitas circulares ($e_k = 0$), as equações (3.2) e (3.4) mostram que as anomalias média, excêntrica e verdadeira tornam-se iguais ($\theta = E = M$). Portanto, conhecida a anomalia média θ_{ok1} de um satélite no instante inicial, aquelas dos demais satélites situados no mesmo plano orbital k podem ser obtidas através da expressão:

$$\theta_{okn} = \theta_{ok1} + 2\pi(n-1)/N_{spo} \quad n = 1, \dots, N_{spo} \quad (3.7)$$

A anomalia média θ_{o11} do primeiro satélite do primeiro plano orbital (ângulo entre a linha dos nós do primeiro plano orbital e a linha da origem à posição inicial do primeiro satélite deste plano) será adotada como referência. Definindo-se a fase relativa $(\delta\theta)_{k1}$ entre o plano orbital k e o primeiro plano orbital, a anomalia média inicial θ_{ok1} do primeiro satélite do plano orbital k introduzida na expressão (3.7) fica caracterizada por:

$$\theta_{ok1} = \theta_{o11} + \delta\theta_{k1} \quad k = 1, \dots, N_{po} \quad (3.8)$$

Por outro lado, a expressão (3.1) mostra que, no caso de órbitas circulares ($e_k = 0$), tem-se $r = a$. Neste caso, a posição (a, θ) ou (x'', y'') de cada satélite em função do tempo t no sistema perifocal é determinada pelas expressões:

$$\begin{cases} x'' = a \cos \theta \\ y'' = a \sin \theta \\ \theta = \theta_0 + \frac{2\pi}{T} t \end{cases} \quad (3.9)$$

Simplificando a expressão (3.6), a posição (x', y', z') de cada satélite em função do tempo t no sistema de coordenadas equatorial (inercial, cujo eixo z' é perpendicular ao plano equatorial da Terra) pode, no caso de órbitas circulares, ser obtida a partir de [11]:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Omega & -\cos i \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos i \cos \Omega \\ 0 & \sin i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

É conveniente utilizar um sistema de coordenadas geo-estacionário, que acompanhe a rotação da Terra em torno do seu eixo (z , no presente caso). A posição (x, y, z) de cada satélite em função do tempo t , neste novo sistema de coordenadas, é obtida da posição (x', y', z') resultante das expressões (3.6) ou (3.10) através da rotação

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

onde

$$\alpha = \lambda_o + (\omega_T + \omega_\Omega)t \quad (3.12)$$

sendo λ_o a longitude no instante inicial, $\omega_T = 7.292115856 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ a velocidade angular de rotação da Terra e ω_Ω a velocidade angular da precessão dos nós ascendentes, devida ao formato não esférico da Terra e seus efeitos sobre o seu campo gravitacional. Este parâmetro é calculado a partir da expressão [11], [12]

$$\omega_\Omega = 2.0183 \cdot 10^{-6} (R_T/a)^{3.5} \cos i \quad (3.13)$$

sendo $R_T = 6378.14 \text{ km}$ o raio da Terra e o resultado expresso em rad/s . Portanto, neste sistema de coordenadas, os planos orbitais (fixos no sistema inercial) possuem uma rotação em torno do eixo z no sentido oposto ao da rotação da Terra, com a velocidade angular $(\omega_T + \omega_\Omega)$.

3.5. Estatísticas de Desvanecimento e de Eventos:

Neste trabalho, apresentam-se algumas estatísticas referentes à disponibilidade dos sistemas em estudo. Entre as estatísticas obtidas, citam-se:

1. função distribuição cumulativa de desvanecimento;

2. probabilidade de ocorrência de estados combinados para diversidade de N satélites ($N = 0, \dots, 4$);
3. função distribuição cumulativa de número de eventos de desvanecimento;
4. função distribuição cumulativa de duração de eventos de desvanecimento;
5. função distribuição cumulativa de número de inter-eventos de desvanecimento;
6. função distribuição cumulativa de duração de inter-eventos de desvanecimento.

3.5.1.

Definição dos Processos Aleatórios de Eventos e Inter-Eventos:

O conhecimento das distribuições de número e duração de eventos e inter-eventos de desvanecimento, que representam características dinâmicas do sinal recebido, é de grande valia para estudos de sistemas de comunicações. De fato, alguns parâmetros de sistema devem ser alterados dinamicamente, de forma a reagir aos desvanecimentos citados [14],[15].

Define-se um evento de desvanecimento como o intervalo de tempo no qual a intensidade do desvanecimento permanece acima de um dado limiar. Da mesma forma define-se um inter-evento de desvanecimento como o intervalo de tempo entre ocorrências de eventos de mesma duração.

Nesse contexto, o processo aleatório de duração de desvanecimentos pode ser estudado segundo dois pontos-de-vista. A variável aleatória é a mesma para ambos os processos: o intervalo no qual o desvanecimento excede um limiar fixo. Contudo, o peso estatístico atribuído a cada variável é diferente. No primeiro caso, aqui referenciado por processo A (duração de eventos), a um intervalo de D segundos é dado um peso D . No segundo caso, aqui referenciado como processo B (número de eventos), ao mesmo intervalo é dado um peso um. Em outras palavras, no processo A contabiliza-se o tempo total, composto pela soma de todos os intervalos de tempo com uma mesma duração, em que o desvanecimento excede um dado limiar fixo. Já no processo B contabiliza-se o número de intervalos de tempo que possuam uma mesma duração.

Nas figuras 3-8 e 3-9 e na tabela 3-1 abaixo, observam-se as definições destes processos.

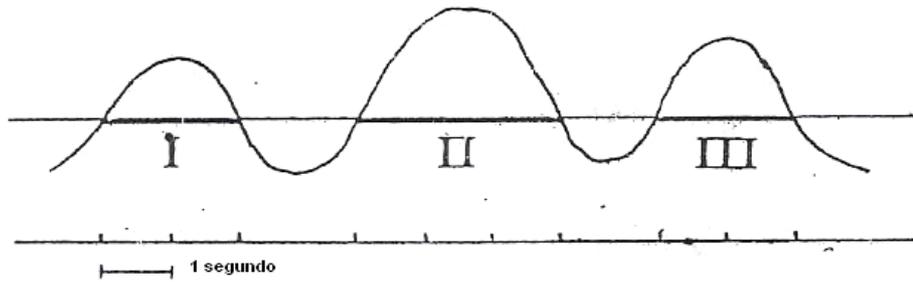


Figura 3-8 – Definição dos processos aleatórios e sua correspondência em termos de número de eventos e duração de eventos (reproduzido da referência [14]).

I	II	III
$D = 2s$	$D = 3s$	$D = 2s$
$P_A = 2 = D$	$P_A = 3 = D$	$P_A = 2 = D$
$P_B = 1$	$P_B = 1$	$P_B = 1$

Tabela 2 – Definição dos processos aleatórios A (duração de eventos) e B (número de eventos), onde D , P_A e P_B representam respectivamente: duração do desvanecimento, peso estatístico atribuído a A e peso estatístico atribuído a B (reproduzida da referência [14]).

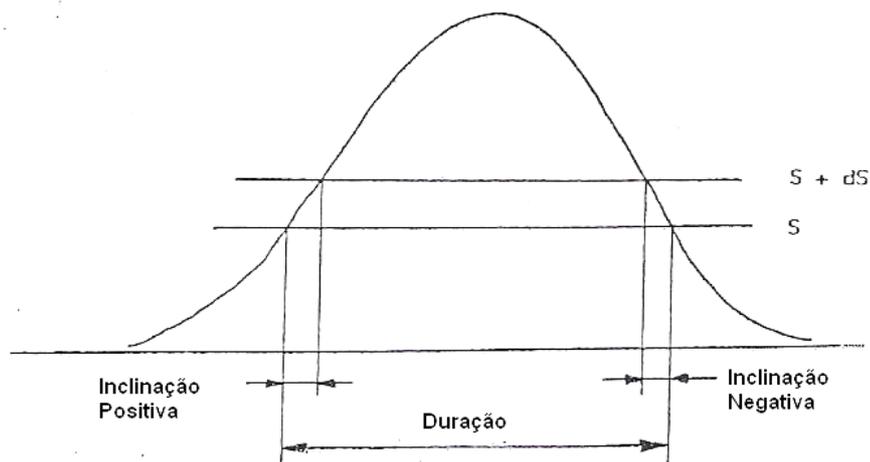


Figura 3-9 – Definição da duração de um dado desvanecimento, em um dado limiar S , detalhando-se as variações positivas e negativas, indicando-se o início e o fim do evento, respectivamente (reproduzido da referência [14]).

A distribuição cumulativa resultante do processo A é interpretada como a fração do tempo total de ultrapassagem do limiar adotado, composto por intervalos de tempo de duração superior a um dado valor. A distribuição resultante do processo B é interpretada de forma familiar como a percentagem de ocorrências nas quais a duração dos desvanecimentos é superior a um dado valor.

O processo A é muito útil na distinção entre critérios de qualidade e disponibilidade no desenvolvimento de enlaces rádio satélite-Terra. O processo B fornece informações importantes ao planejamento de comunicações via satélite com um recurso a bordo em comum.

É importante se ressaltar que os dois processos não são independentes, uma vez que eles são relacionados segundo a seguinte expressão:

$$n_A(D) = Dn_B(D) \quad (3.14)$$

onde n_B é o número de durações de comprimento D e n_A é o número total de segundos constituídos por intervalos de duração de comprimento D . A equação (3.14) também determina uma relação entre as duas distribuições cumulativas.

De forma análoga à definida no caso das estatísticas de eventos, pode-se definir os processos aleatórios de número e duração de inter-eventos de desvanecimento, como processos aleatórios análogos aos processos A e B, respectivamente, onde a variável aleatória é substituída pelo intervalo de tempo no qual a atenuação se mantém abaixo de um dado limiar fixo. Na figura 3-10, observa-se a definição da variável aleatória de inter-eventos.

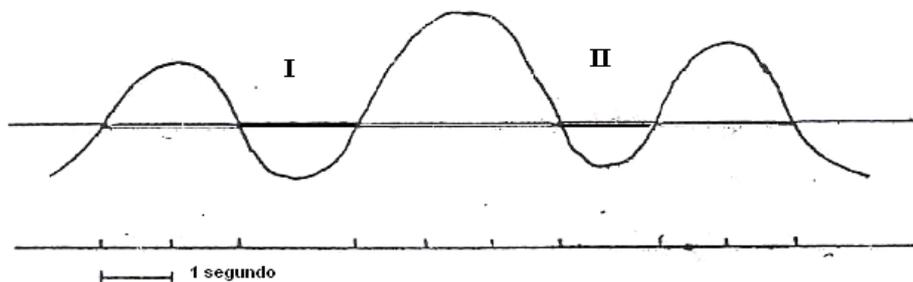


Figura 3-10 – Definição da variável aleatória de inter-eventos, onde I e II são casos de inter-eventos (adaptado da referência [14]).

Ainda quanto à importância do conhecimento de tais processos aleatórios, cabe ressaltar que o conhecimento das estatísticas de inter-eventos fornecem informações sobre o quão freqüentemente esquemas de compensação de desvanecimentos devem ser utilizados ao longo de um processo de comunicação.

O conhecimento da dinâmica dos processos aleatórios de número e duração de eventos e inter-eventos de desvanecimento tem particular importância no desenvolvimento de diversas aplicações sistêmicas, tais como códigos corretores de erro, esquemas de modulação e esquemas adaptativos de diminuição dos efeitos do desvanecimento.