



MECANISMO DE ACESSO INICIAL BASEADO EM GEOLOCALIZAÇÃO PARA REDES DE ONDAS MILIMÉTRICAS

Alex Lambiase Schramm

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Rio de Janeiro
Dezembro de 2019

MECANISMO DE ACESSO INICIAL BASEADO EM GEOLOCALIZAÇÃO
PARA REDES DE ONDAS MILIMÉTRICAS

Alex Lambiase Schramm

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

Prof. Carlos Alberto Vieira Campos, D.Sc.

Prof. Daniel Sadoc Menasche, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2019

Schramm, Alex Lambiase

Mecanismo de Acesso Inicial baseado em Geolocalização para Redes de Ondas Milimétricas/Alex Lambiase Schramm. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

X, 75 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 73 – 75.

1. Ondas milimétricas. 2. Acesso inicial. 3. Redes celulares. I. Rezende, José Ferreira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MECANISMO DE ACESSO INICIAL BASEADO EM GEOLOCALIZAÇÃO PARA REDES DE ONDAS MILIMÉTRICAS

Alex Lambiase Schramm

Dezembro/2019

Orientador: José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

O uso de antenas diretivas em faixas de frequência acima de 10 GHz torna-se obrigatório devido à alta atenuação e outros fenômenos de propagação que ocorrem nessas bandas. Por conseguinte, o acesso inicial de usuários a redes celulares desse tipo torna-se lento pois exige que a estação base e o usuário façam *beamforming* antes que possam se comunicar. Uma alternativa para tornar mais rápido esse processo é pelo uso da informação de posicionamento do usuário, mas até o momento nenhum trabalho considerou o impacto de erros de geolocalização nesse processo. Neste trabalho, propõem-se dois novos mecanismos cientes dos erros de geolocalização que exploram um maior espaço angular para encontrar combinações de feixe com melhor desempenho. Além disso, foi proposto um mecanismo que antecede o acesso inicial, que busca recuperação rápida do enlace, reduzindo o tempo despendido para a retomada da qualidade do canal de dados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

GEOLOCATION BASED INITIAL ACCESS MECHANISM FOR MILLIMETER WAVE NETWORKS

Alex Lambiase Schramm

December/2019

Advisor: José Ferreira de Rezende

Department: Systems Engineering and Computer Science

The use of directional antennas in frequency bands above 10 GHz becomes mandatory due to the high attenuation and other propagation phenomena that occur in these bands. Therefore, user's initial access in cellular networks of this type becomes slower because it requires that the base station and the user do *beamforming* before communication. The use of user's positioning information is a possible way to speed up this procedure, but so far no work has considered the impact of geolocation errors in this process. In this work, we propose two new initial access mechanisms aware of the geolocation errors, which explore a greater angular space to find combinations of beam with improved performance. In addition, a mechanism that precedes initial access has been proposed, which seeks rapid retrieval of the link, reducing the time taken to resume data channel quality.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	1
2 Trabalhos Relacionados e Conceitos Básicos	4
2.1 Conceitos Básicos	4
2.1.1 Antenas Direcionais	5
2.1.2 <i>Beamforming</i>	9
2.1.3 Acesso Inicial	10
2.1.4 Infraestrutura de Redes de Ondas Milimétricas	10
2.2 Trabalhos Relacionados	12
2.2.1 Sem Informação de Contexto	12
2.2.2 Com Informação de Contexto	14
3 Propostas	17
3.1 Impacto do Erro de Geoposicionamento	18
3.2 Propostas de Algoritmos de <i>Beamforming</i>	20
3.2.1 Proposta Iterativo	23
3.2.2 Proposta Refinado	25
3.3 Proposta FAST-IA	28
4 Modelos para Avaliação de Desempenho	33
4.1 Modelo do Simulador	33
4.2 Métricas de desempenho	34
4.3 Modelo de Mobilidade	36
4.4 Estratégias Para Refazer o Acesso Inicial	39
4.5 Modelo de Propagação e Desvanecimento	46
5 Avaliação de Desempenho	51
5.1 Ambiente de simulação	52

5.2	Resultados Sem Mobilidade	54
5.3	Resultados Com Mobilidade	57
5.3.1	Estado do Canal	58
5.3.2	Raio da célula	58
5.3.3	Velocidade	60
5.3.4	Erro de Geoposicionamento	62
5.4	Resultados Sem FAST-IA	63
5.5	Resultados Com FAST-IA	69
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	72
	Referências Bibliográficas	73

Lista de Figuras

2.1	Gráfico de atenuação no espaço livre	4
2.2	Esquemática do somatório de sinais para formar um diagrama de irradiação direcional.	6
2.3	Matrizes de antenas.	7
2.4	Matriz de Antenas	8
2.5	Processo para criação de um enlace de ondas milimétricas.	12
2.6	Exemplo de execução do algoritmo de busca exaustiva.	13
2.7	Exemplo de execução do algoritmo de busca iterativa.	14
2.8	Funcionamento de um alg. de BF baseado em informações de contexto.	15
2.9	Diagrama do processo do algoritmos de IC.	15
3.1	Análise geométrica do erro de geoposicionamento.	19
3.2	Simulação da diferença angular média provocada pelo erro de geoposicionamento até uma distância de 200 metros.	20
3.3	Diagrama para estabelecer um enlace baseado em nossas propostas.	21
3.4	Fluxogramas gerais baseado dos algoritmos propostos.	22
3.5	Representação do algoritmo <i>Proposta Iterativo</i>	23
3.6	Fluxograma do algoritmo <i>Proposta Iterativo</i>	24
3.7	Diagrama para estabelecer um enlace baseado na <i>Proposta Refinado</i>	26
3.8	Fluxograma do algoritmo <i>Proposta Refinado</i>	27
3.9	Representação do algoritmo <i>FAST-IA</i>	28
3.10	Representação do algoritmo <i>FAST-IA</i>	30
3.11	Fluxograma do algoritmo <i>FAST-IA</i>	31
4.1	Modelo do simulador em redes de ondas milimétricas.	34
4.2	Introdução do usuário no cenário de mobilidade	37
4.3	Movimentação do usuário no interior da célula	38
4.4	Estratégia Intervalo Fixo	40
4.5	Estratégia Reativa	41
4.6	Amostra temporal de um cenário aplicando o Intervalo Fixo.	42
4.7	Amostra temporal de um cenário aplicando o Reativo.	43

4.8	Características do protocolo de intervalo fixo no cenário de mobilidade	45
4.9	Características do protocolo reativo no cenário de mobilidade	46
4.10	Representação das funções de probabilidade do estado do canal	48
4.11	Representação das funções de probabilidade do estado do canal	49
5.1	Capacidade efetiva em função da distância com $t_{frame} = 500ms$	55
5.2	Capacidade efetiva em função da distância com $t_{frame} = 1000ms$	55
5.3	Capacidade nominal em função da distância com $t_{frame} = 500ms$	56
5.4	Tempo de acesso inicial em função da distância com $t_{frame} = 500ms$	57
5.5	Comportamento no tempo da estratégia Reativo com diferentes estados de canal.	58
5.6	Comportamento no tempo das estratégias para iniciar o IA com diferentes raios de células.	59
5.7	Comportamento no tempo da estratégia Fixo com diferentes velocidades do USR.	60
5.8	Comportamento no tempo da estratégia Reativa com diferentes velocidades do USR.	61
5.9	Comportamento do GPS Simple s no tempo da estratégia Fixo com diferentes velocidades do USR.	61
5.10	Comportamento no tempo do Intervalo Fixo com diferentes erros de geoposicionamento.	62
5.11	Comportamento no tempo do Reativo com diferentes erros de geoposicionamento.	62
5.12	Capacidade efetiva com o algoritmo Exaustivo	65
5.13	Capacidade efetiva com o algoritmo GPS Simple s.	66
5.14	Capacidade efetiva do Reativo com decaimento da taxa de 50% comparando todos os algoritmos.	68
5.16	Comparação percentual do tempo empregado para dados com e sem o uso do FAST-IA	70
5.15	Comparação da capacidade efetiva com e sem o uso do FAST-IA.	71

Lista de Tabelas

5.1	Parâmetros de simulação	54
-----	-----------------------------------	----

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, vem crescendo a necessidade por novas tecnologias de comunicação sem fio que proporcionem o aumento da taxa de dados em redes celulares. No entanto, com a escassez de faixas de frequência abaixo de 10 GHz [1], operar em ondas milimétricas ($\gg 10$ GHz) passou a ser uma alternativa promissora, mesmo que existam grandes desafios em trabalhar com frequências tão elevadas [2]. Logo, as redes de que operam em ondas milimétricas possuem características de propagação que as tornam úteis para uma variedade de aplicações, incluindo a transmissão de grandes quantidades de dados de computadores, comunicações celulares e radares [3].

Diversos tipos de equipamentos de comunicação sem fio, como rádio, telefone celular ou satélite, faz o uso de um intervalo específico na frequência para poder operar. Por isso, os provedores de serviços de telecomunicações fazem uso de diversas tecnologias que possuem uma largura de banda específica que proporciona a capacidade necessária para poder transmitir os dados que foram requeridos. Por exemplo, os serviços voltados para voz requerem no mínimo 6 kHz de largura de banda para transmissão da informação, enquanto para imagens requerem cerca de 6 MHz. Pois, o envio de uma imagem detém uma maior quantidade de informações a serem transportadas em comparação com os serviços de voz. Logo, quando aumentamos a quantidade de informações transmitidas o uso de frequências elevadas se mostra como solução, pela grande faixa de largura de banda que está disponível. É aqui que as ondas milimétricas que dispõem de uma larga faixa de espectro livre torna-se promissora. Pois, isso permite alocar canais com largura de banda superiores a 400 Mhz. Tais canais permitem alcançar altas taxas de transferência revelando-se uma maneira eficiente de enviar grandes quantidades de dados [3].

Com o comprimento de onda reduzido ($\ll 30$ mm), os gases presentes na atmosfera da Terra, mudanças climáticas e uma grande quantidade de materiais, tais como o corpo humano e até mesmo o oxigênio, se tornaram uma barreira para essa faixa de frequência em consequência da alta atenuação [4]. Então, pode-se presumir que esse

aumento considerável na perda de propagação do sinal durante o seu trajeto, reduz a área de cobertura de uma estação base que opera em ondas milimétricas.

Por outro lado, trabalhando em frequência milimétricas buscando um alto ganho nas taxas de transmissão, devido a possibilidade de trabalhar com larguras de banda de até 1 Ghz. Mas, para amenizar os problemas de atenuações no meio de propagação, podemos fazer o uso de transmissões altamente direcionais. Pois, como o comprimento de onda é muito reduzido na faixa milimétrica, viabilizou-se projetar antenas formadas por uma matriz com um grande número de elementos, e através dela formar vetores de apontamento que são orientáveis de acordo com a sua necessidade, aumentando o ganho no sentido do feixe [5].

A utilização da matriz de elementos proporciona um grande número de possibilidades na escolha de feixe, tanto para a estação base milimétrica (EBmm) quanto para o usuário (USR), gerando uma vasta quantidade de combinações possíveis de feixes entre ambos. Devido às diferentes escolhas de feixes para se estabelecer um enlace houve a necessidade da elaboração de mecanismos que procuram escolher qual a melhor combinação de feixes usar, em cada instante. Esse processo é chamado de *beamforming*. Diversos trabalhos propõem diferentes estratégias para executar esse processo de escolha [6–8].

Considerando-se que um USR em estado de repouso tem disponível um certo número de EBmm para se associar, denomina-se de problema do acesso inicial o procedimento onde o USR descobre qual a melhor EBmm e estabelece a comunicação na camada de enlace [9], sendo a condição necessária para iniciar qualquer tipo de comunicação em sistemas celulares. Esse procedimento nas redes de ondas milimétricas é bem mais custoso do que nos sistemas celulares anteriores pois ele está diretamente relacionado ao mecanismo de *beamforming*. Além disso, devido à elevada intermitência do canal sem fio nessa banda, o USR deve realizar o procedimento de acesso inicial (*Initial Access* - IA) com uma certa frequência, tornando significativo o tempo gasto nesse processo e afetando diretamente a QoS (*Quality of Service*) do sistema.

Como os algoritmos de *beamforming* (BF) afetam diretamente a latência do acesso inicial [10], a investigação desses mecanismos é de grande importância. Um método de BF que serve de referência para várias outras propostas é o método exaustivo. Nesse método, o USR e a EBmm testam exaustivamente todas as combinações de feixes possíveis e escolhem aquela com maior relação sinal-ruído. A desvantagem desse método está relacionado ao tempo necessário para a realização desse processo que cresce proporcionalmente com o aumento do número de feixes. Por outro lado, ele traz como principal vantagem a escolha da melhor combinação de feixes a cada instante. Como dito anteriormente, a necessidade de se realizar periodicamente esse processo pode tornar esse método inviável em algumas condições

de canal. Para mitigar esse problema, uma outra classe de algoritmos, proposta na literatura, leva em conta a informação de contexto [8], trocada por um canal de controle em micro-ondas. Nessa classe de mecanismos baseada em contexto uma das formas mais estudadas é o uso do geoposicionamento [8, 11, 12].

Neste trabalho, analisamos o impacto do erro de geoposicionamento nos mecanismos de *beamforming* que se baseiam nessa informação para apressar o processo de acesso inicial. Em seguida, propomos dois níveis de estratégias. O primeiro são métodos de *beamforming* conscientes desses erros e os comparamos com mecanismos existentes na literatura. O segundo propomos um teste preliminar dos feixes e havendo a recuperação da taxa durante esse processo o acesso inicial não será refeito.

Para realizar essa comparação, definimos uma metodologia, e uma métrica de desempenho associada, que permite capturar de forma justa o compromisso entre o tempo na escolha da combinação de feixes USR-EBmm e a relação sinal-ruído obtida. A comparação é feita em função da distância USR-EBmm, do erro de geoposicionamento, das variações do canal e velocidade de deslocamento do USR. Os resultados mostraram que os algoritmos propostos são menos suscetíveis às imprecisões dos sistemas de localização, assim com a realização de um teste prévio dos feixes gerou um ganho médio da taxa de transmissão de dados.

O restante da dissertação está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2, descrevemos os trabalhos relacionados ao problema de acesso inicial em redes de ondas milimétricas e as soluções por eles propostas. No Capítulo 3, apresentamos nossas propostas de algoritmos baseados em contexto. No Capítulo 4, vamos detalhar o modelo usado no simulador. No Capítulo 5, analisamos nossos métodos em comparação aos outros, descrevendo a metodologia aplicada nas simulações e avaliando os resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo 6, fazemos uma análise crítica dos esquemas propostos e apresentamos os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados e Conceitos Básicos

2.1 Conceitos Básicos

Nessa seção, será explicado, com maior quantidade de detalhes, as características que compõem uma rede de ondas milimétricas. Começaremos descrevendo as configurações das antenas direcionais, que demonstrou ser a solução para a alta atenuação nessa faixa de frequência. Em seguida, falaremos dos processos de rastreamento de feixes (*beamforming*), que estão ligados diretamente ao uso de antenas direcionais. Após o entendimento desses dois princípios, será mostrado o conceito de acesso inicial e como ele pode afetar o desempenho da rede. Após a definição de acesso inicial, iremos especificar sua metodologia para estabelecer o enlace em rede de ondas milimétricas, que pode ocorrer através sobreposição de outros canais em frequência mais baixas para sinalização de controle ou de forma independente de qualquer tecnologia legada.

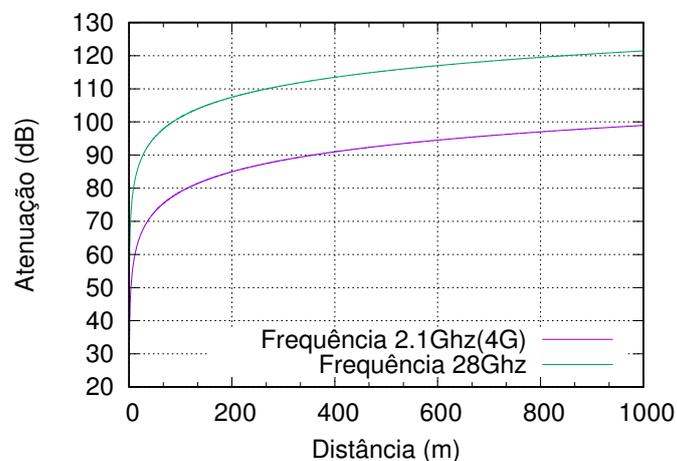


Figura 2.1: Gráfico de atenuação no espaço livre

Mas antes de iniciar a descrição dos conceitos envolvidos no uso das ondas milimétricas, vamos entender primeiro o impacto de se operar em frequências tão altas. A Figura 2.1 representa graficamente a atenuação do espaço livre (L), que faz o uso do modelo simplificado mostrado pela Equação 2.1, no qual d_{km} é a distância em quilômetros entre o USR e a estação base e f_{Mhz} é a frequência de operação do enlace. Esse modelo foi empregado para critérios comparativos entre as frequências milimétricas e a que é adotada no 4G. Assim conseguimos averiguar a maior atenuação quando usamos as frequências milimétricas em 28Ghz. Usando um valor aproximado de 20dB como a diferença média entre as frequências, quer dizer que a atenuação em 28Ghz é 100 vezes maior em comparação com a do 4G. Mostrando a necessidade de um sistema diferenciado para que ocorra o acesso inicial, com antenas direcionais e algoritmos de *beamforming*.

$$L = 32.4 + 20\log d_{km} + 20\log \quad (2.1)$$

2.1.1 Antenas Direcionais

Uma característica em comum a todos os trabalhos que estudam redes de ondas milimétricas é o fato de considerarem o uso da técnica de matrizes de antenas (*antenna arrays*) para o direcionamento e aumento do ganho do sinal transmitido. A matriz de antenas (MA) são criadas através da junção de vários elementos irradiantes em uma disposição espacial uniforme entre eles. Estes elementos trabalham em conjunto como uma única antena que possui um padrão de irradiação próprio [5].

Sendo mais específico, uma MA é um conjunto de N elementos que estão espacialmente separados, que podem estar dispostos de forma linear, retangular, quadrangular ou circular. Para ser considerado uma MA o número mínimo de elementos que ela deve possuir é 2, e a quantidade máxima é definida pelo papel que a matriz irá desempenhar. Em geral, a energia irradiada por uma MA aumenta com o número de elementos, o que eleva o alcance do sinal. As desvantagens de se ter matrizes muito grandes são: alto custo e complexidade de projeto, além de causar um maior estreitamento dos feixes o que deixa o enlace mais suscetível ao bloqueio do sinal, aumentando a sua intermitência.

Para conseguir um padrão de irradiação, cada elemento irradiante transmite o mesmo sinal com fases diferentes. Os efeitos construtivo e destrutivo desse conjunto de sinais irradiados pelos múltiplos elementos cria um padrão de irradiação diretivo e com alto ganho. Através do ajuste eletrônico da defasagem entre os sinais injetados em cada elemento irradiante, é possível modificar o padrão de irradiação do conjunto, fazendo com que seja possível modificar a direção do feixe de maior ganho (lóbulo principal). Neste contexto, considera-se a utilização de um livro de códigos

(*codebook*), que apresenta o conjunto de ângulos pré-determinados que serão usados nas defasagens do sinal. Com esses ângulos, conseguimos determinar as direções de irradiação dos feixes, cobrindo todo o espaço angular do transmissor [13].

Vamos agora esquematizar o todo processo do sinal passa desde a concepção até a sua radiação. Afim de facilitar o entendimento, a Figura 2.2 exemplifica esse processo de tratamento do sinal. Primeiramente, temos uma caixa TX que representa a origem de saída do sinal de informação, mas antes chegar nas antenas o módulo de controle de fase vai pegar essa informação e defasá-la a partir de uma certo ângulo θ , que está contido no *codebook*. Sendo os ângulos de defasamento progressivo entre todos os elementos irradiadores, as direções dos sinais propagados que estão representados em vermelho serão as mesmas. Quando pegamos todos esses sinais e os somamos, obtemos o digrama de irradiação da matriz na direção θ definida pelo defasador, como mostra o esquema do lado esquerdo da figura.

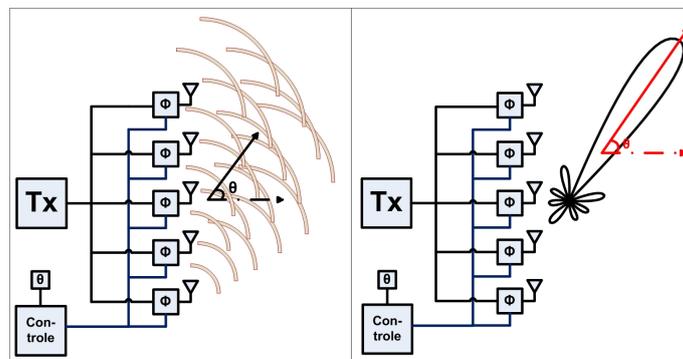


Figura 2.2: Esquematização do somatório de sinais para formar um diagrama de irradiação direcional.

A quantidade de elementos irradiantes determina o ganho máximo que se obtém no lóbulo principal, o qual é dado pelo número de linhas multiplicado pelo número de colunas da MA [5]. Os gráficos da Figura 2.3a apresentam o ganho de diferentes tamanhos de matrizes de antenas em função do ângulo de incidência para o caso em que o lóbulo principal da matriz está direcionado para o ângulo de zero grau. Pode-se perceber que a quantidade de elementos na matriz influencia tanto o ganho máximo quanto a largura do feixe.

O espaçamento entre os elementos da matriz também afeta a forma do diagrama de irradiação e quando aumentamos a sua distância, os lóbulos secundários passam a concentrar a maior parte de energia transmitida. Então para se evitar que qualquer dos lóbulos secundários sejam os máximos, o espaçamento entre os elementos tem que ser inferior a $\lambda/2$ [5]. Para representar essa mudança no diagrama de irradiação temos a Figura 2.3b, na qual fixamos uma MA de tamanho 8x8 e variamos a distância entre os elementos. Com a diminuição do espaço entre os elementos, fica claro a transferência de energia dos lóbulos secundários para o primário.

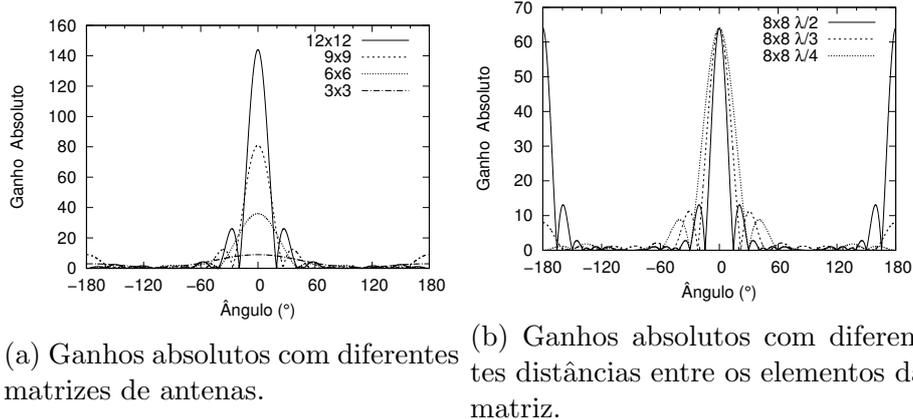


Figura 2.3: Matrizes de antenas.

O método utilizado para obter os ganhos de transmissão e recepção nessa configuração de matriz de elementos, foi através do cálculo do *array factor*(AF). O AF é uma função que está ligada ao número, espaçamento e fase dos elementos, assim como o arranjo geométrico da matriz. No trabalho[13] o AF foi obtido de forma simplificada, em que os elementos tiveram amplitudes, fases e espaçamentos idênticos. Uma característica importante é que o AF não depende das características direcionais dos elementos radiantes, ou seja, ele pode ser formulado substituindo os fontes reais por pontuais. Uma vez que o fator de matriz tenha sido derivado usando uma fonte pontual, o campo total da matriz real é obtido pelo somatório do fator de cada sinal [5].

Considerando a forma mais simplificada de elaborar uma MA, o AF pode ser calculado segundo a equação 2.2. A Figura 2.4 exemplifica geometricamente o projeto simplificado da MA, onde os elementos são distribuídos uniformemente, possuindo M os elementos posicionados ao longo do eixo x e N elementos na direção y . Ambos os eixos possuem espaçamentos iguais e constantes ($dx = dy$). O direcionamento do ganho máximo é dado pelo r , que é composto pelos ângulos de elevação θ e Φ .

No AF, o β_x e β_y são as mudanças de fases progressivas entre os elementos no eixo x e y respectivamente. Enquanto Ψ estabelece uma relação entre os ângulos visada direta da posição pretendida (ϕ e θ), com os apontamentos gerados no *codebook* (ϕ_0 e θ_0). Isso quer dizer que, aquele com menor diferença angular terá o maior ganho. Então o ganho máximo é quando a diferença angular é zero($\phi=\phi_0$ e $\theta=\theta_0$).

$$AF(\theta, \phi, \theta_0, \phi_0) = \left\{ \frac{\sin(\frac{M_x}{2} \Psi_x)}{\sin(\frac{\Psi_x}{2})} \right\} \left\{ \frac{\sin(\frac{N_y}{2} \Psi_y)}{\sin(\frac{\Psi_y}{2})} \right\} \quad (2.2)$$

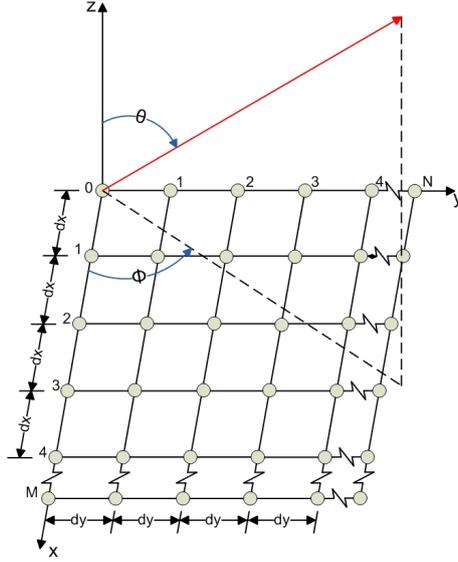


Figura 2.4: Matriz de Antenas

$$\Psi_x \triangleq kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x \quad (2.3)$$

$$\Psi_y \triangleq kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y. \quad (2.4)$$

$$\beta_x = -kd_x \sin \theta_0 \cos \phi_0 \quad (2.5)$$

$$\beta_y = -kd_y \sin \theta_0 \sin \phi_0 \quad (2.6)$$

Definimos matematicamente o cálculo do ganho de uma MA seguindo a formulação 2.7, evitando que ocorra valores negativo durante o cálculo. Se o ganho máximo do AF é proporcional ao número de linhas vezes o número de colunas, logo $G_{AF} = \frac{|NM|^2}{MN}$. Portanto G_{AF} também é igual NxM .

$$G_{AF} = \frac{|AF|^2}{MN} \quad (2.7)$$

Tendo em vista que temos um transmissor(Tx) e um receptor(Rx) para estabelecer um enlace, o ganho total desse *link* é obtido através da multiplicação dos ganhos de Tx e Rx, como mostra a equação 2.8.

$$G_{total} = \left\{ \frac{|AF_{tx}|^2}{M_{tx}N_{tx}} \right\} \left\{ \frac{|AF_{rx}|^2}{M_{rx}N_{rx}} \right\} \quad (2.8)$$

Após o equacionamento é notório que a MA é projetada de forma a controlar suas características de radiação através do controle de fase ou dimensionamento de seus elementos. Viu-se que através do controle de fase podemos alterar a direção de

irradiação, e com o espaçamento entre os elementos conseguimos mudar os níveis do lóbulos primários e secundários. O tamanho da matriz determina o ganho total do somatório dos sinais, como também altera a largura dos feixes. Assim, o emprego da MA permite modificar eletronicamente, sem elementos mecânicos [5], a direção do feixe de transmissão, viabilizando o uso de técnicas de BF.

2.1.2 *Beamforming*

Beamforming é uma técnica necessária quando se faz uso de uma MA. Pois como os diagramas de irradiação de transmissão e recepção provenientes da MA têm lóbulos muito estreitos apontando para uma direção específica. Logo, existe a necessidade de escolher a melhor forma de relacionar os feixes TX e RX para obter maior ganho no enlace e esses métodos que buscam melhor combinação dos feixes é chamado *Beamforming*. Então, pode-se dizer que o BF modela o apontamento dos feixes do TX e RX.

A base do BF provém da elaboração do seu *codebook*. O número de linhas e colunas da MA aponta o tamanho desse *codebook*, indicando a quantidade de direções que o feixes irão apontar. Para se obter esse tamanho pegamos o número de linhas e somamos ao de colunas, então se a matriz for 2x2 teremos quatro direções diferentes de feixes, logo pegamos 360° e dividimos pela quantidade de direções, o resultado será a diferença angular entre os feixes. Esse modelo garante a cobertura de todo espaço angular entorno da MA. Portanto com a mesma matriz 2x2, a diferença angular será de 90° formando um *codebook* igual a $\{\theta, \theta+90^\circ, \theta+180^\circ, \theta+240^\circ\}$, no qual θ é direção do primeiro feixe, seguido pelo acréscimo da diferença angulares sucessivas.

Para elucidar a técnica de BF, vamos explicar de forma genérica os procedimentos combinatórios de feixes. Tanto o transmissor quanto o receptor tem um *codebook* para estabelecer as direções de propagação da MA 2x2 cobrindo uma área de 360° entorno de ambos, então esse *codebook* pode ser descrito da seguinte maneira: $TX\{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 240^\circ\}$ e $RX\{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 240^\circ\}$, onde os valores em graus representam a defasamento do sinal, determinando o apontamento do transmissor e receptor respectivamente. Agora pegamos essa direções angulares TX e RX , e efetuamos uma varredura angular combinando os feixes de forma que o enlace milimétrico fique com a maior SNR possível, proporcionando taxas mais elevadas. As combinações podem ser feitas de diversas maneiras o que chamamos de algoritmos de *beamforming*, que serão mais detalhadas na seção 2.2.

2.1.3 Acesso Inicial

O problema do acesso inicial em ondas milimétricas é o foco do trabalho. Mas para compreender as dificuldades desse processo em um cenário com transmissões em altíssimas frequências, precisamos entender o que é o acesso inicial, como ele acontece e o por que sua operação é complexa em faixas milimétricas? Esses questionamentos serão respondidos em três tópicos a seguir.

- O que é o acesso inicial: É o procedimento que permite que um equipamento de USR móvel que queira se conectar a uma rede, estabeleça um enlace com uma estação base [9].
- Como o acesso inicial acontece: Quando um USR quer se conectar a rede milimétrica, ele tem que fazer o *beamforming* devido ao uso de antenas direcionais. A troca de sondas para escolha do feixe pode ser realizada do USR para EBmm (*uplink*) ou da EBmm para o USR (*downlink*). Depois que tanto a EBmm quanto o USR conhecem quais feixes irão usar para transmitir a informação, se estabelece o enlace iniciando-se uma conexão [14].
- Por que ele é complexo: Como visto anteriormente, frequências muito elevadas geram um alta atenuação no sinal por causa de seu baixo comprimento de onda (<30mm). O que resulta no uso de antenas direcionais e a prática do *beamforming*. No entanto, quando utilizamos antenas com feixes muito estreitos, a mobilidade do ambiente pode causar um alto grau de intermitência do enlace, isso decorre que objetos que não eram relevantes quando se está em modo omnidirecional passam a ser em antenas com alta diretividade, como tráfego de pessoas e automóveis. Como observação vale dizer que fatores climáticos também são mais danosos para conexão na faixa milimétrica [4]. Por esses motivos, o número de falhas no enlace aumenta consideravelmente, tendo maior quantidade de acessos iniciais. Assim, o tempo gasto no acesso inicial causa sobrecarga na rede e nesse período quem consome a grande parte do tempo é o *beamforming*. Logo, a busca por algoritmos mais velozes que reduzam o tempo gasto com o acesso inicial são de suma importância para melhorar o desempenho da rede.

2.1.4 Infraestrutura de Redes de Ondas Milimétricas

Na atualidade, as redes de ondas milimétricas divergem para dois caminhos em relação a sua infraestrutura, redes *standalone* (SA) e *non-standalone* (NSA). A SA pode operar de forma independente, sem que exista necessidade de uma estrutura de gerenciamento para que possa efetuar a conexão do USR com a EBmm. No entanto

a NSA faz uso da rede legada LTE como suporte para seu gerenciamento, onde a troca de mensagem de controle é feito com auxílio de células 4G LTE, servindo de suporte enquanto se estabelece o enlace no canal milimétrico. Além disso, o canal LTE também pode ser usado para relatar imediatamente uma falha no enlace milimétrico, permitindo uma recuperação rápida do enlace.

No ambiente infraestruturado NSA, a EBmm estabelece uma relação com a estação LTE por meio de uma conexão dupla (*dual-connectivity*). Essa aplicação permite que um aparelho móvel se conecte simultaneamente em ambas as tecnologias, fazendo uso do LTE como plano de controle e para dados o enlace milimétrico que possui maior capacidade [15]. Porém até começar uma conexão milimétrica, algumas etapas que devem ser cumpridas, que são: varredura, medição, determinação e relatório.

Na varredura é onde se tem o processo de BF, que varre uma área angular usando combinações de feixes entre USR e EBmm (*beamforming*), essa troca de feixes se dá com intervalos e direções pré-definidas. A medição acontece junto com a varredura, e avalia a qualidade do sinal recebido no BF, usando como métrica o SNR e associando a cada combinação de feixe uma medida. A determinação acontece ao final do BF, no qual escolhe a combinação de feixes que obteve a maior SNR para iniciar a conexão. O relatório é a etapa final, em que o USR envia para EBmm via canal de controle, as informações dos feixes que serão usados no enlace de rádio e começar uma conexão.

Duas análises importantes devem ser efetuadas, uma está na etapa de medição e outra na de relatório. Na medição, as transmissões dos sinais de sincronização podem ser baseadas no contexto de *downlink* ou *uplink*. Usando o *downlink* como modelo de referência, onde a EBmm transmite os sinais de sincronização durante o BF, que serão coletados pelo USR e se na etapa de determinação o USR não tiver adquirido nenhuma amostra de SNR satisfatória, as fases de varredura e medição serão refeitas. Na etapa do relatório, a integração com o plano de controle permite a troca de mensagens instantaneamente entre o USR e a EBmm, consumindo um tempo desprezível [14].

O esquema da troca de mensagens em uma configuração NSA em *downlink* está representado na Figura 2.5, no qual existe um canal de controle LTE onde sua área de cobertura que engloba o canal milimétrico. A figura começa mostrando o BF representando as etapas de varredura e medição, logo após o término do BF o estágio de determinação não conseguiu uma SNR suficiente para criar um enlace. Então, via canal de controle o USR gera uma mensagem de falha que é repassada para EBmm de forma imediata, iniciando um novo BF.

Quando acontece o segundo BF, a SNR atinge um nível que possibilita a criação do enlace. Seguindo para parte de relatório, o USR notifica a EBmm ,via canal de

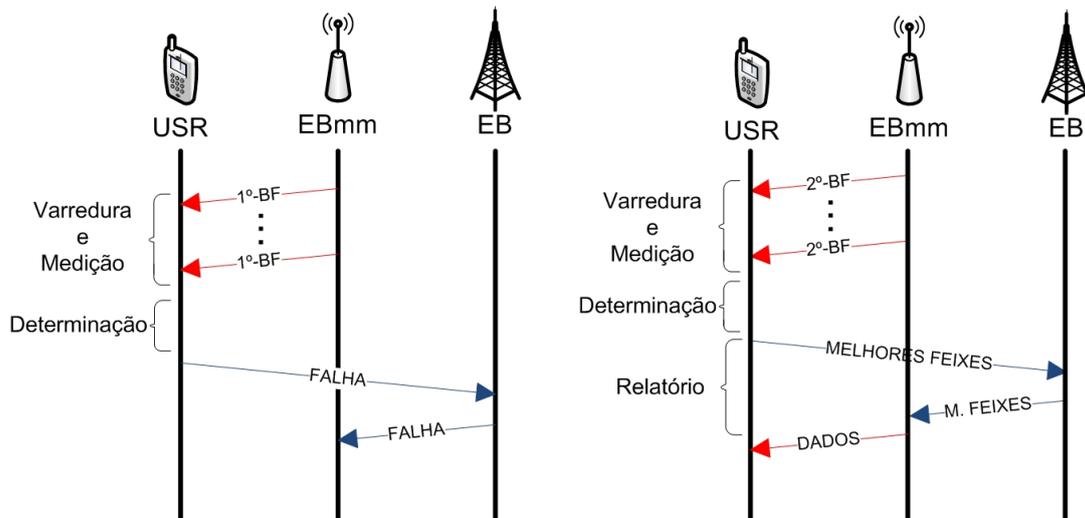


Figura 2.5: Processo para criação de um enlace de ondas milimétricas.

controle, o par de feixes que vai ser alocado para a transmissão de dados. A EBmm sabendo qual feixe vai usar, o acesso inicial termina e inicia-se a parte de dados.

2.2 Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos propuseram algoritmos para a realização do BF considerando-se a utilização de uma MA. Nesta seção vamos classificar os trabalhos que usaram métodos de BF. Os algoritmos de BF foram divididos em dois grupos, os que usam a informação de contexto (IC) do USR (geolocalização) e aqueles que apenas fazem o BF sem qualquer informação prévia. Os algoritmos que não usam IC fazem um varredura completa em todo seu espaço angular para determinar melhor o par de feixes. Os que usam IC o BF é feito de maneira direcionada, levando em consideração a geolocalização, que é uma das possíveis IC que pode ser obtida, ocasionado maior rapidez no BF já que esse método não investiga todo espaço angular.

2.2.1 Sem Informação de Contexto

O algoritmo que serviu de referência em diversos trabalhos é o da busca exaustiva [13] que consiste em uma varredura dos diferentes feixes presentes em seus *codebooks* para a transmissão de sondas de forma que todas as possíveis combinações de feixe da EBmm e do USR sejam testadas. Essa técnica é a que demanda mais tempo, pois ela testa a maior quantidade de feixes. Contudo como a busca exaustiva faz varredura de todo espaço angular, ela tem a vantagem de ser a técnica capaz de encontrar a combinação de feixes da EBmm e USR que garante a maior relação sinal-ruído (SNR) nas comunicações posteriores.

A Figura 2.6 apresenta um exemplo de como é feita a busca exaustiva. A EBmm

possui um total de oito feixes de transmissão, enquanto o USR tem apenas quatro feixes. Então a EBmm envia sondas em cada um de seus feixes e o USR mantém o seu feixe até que a EBmm complete um ciclo. Ao término de um ciclo a EBmm inicia outro mas agora com um novo feixe do USR. O procedimento só termina quando todas as combinações possíveis de feixes são satisfeitas, gerando um total trinta de duas amostras. Quando o BF termina, o USR detém uma matriz que contém uma amostra de SNR para cada combinação de feixe, e envia a melhor para EBmm. A troca de mensagens subsequentes ao BF dá-se igual ao descrito na seção 2.1.4.

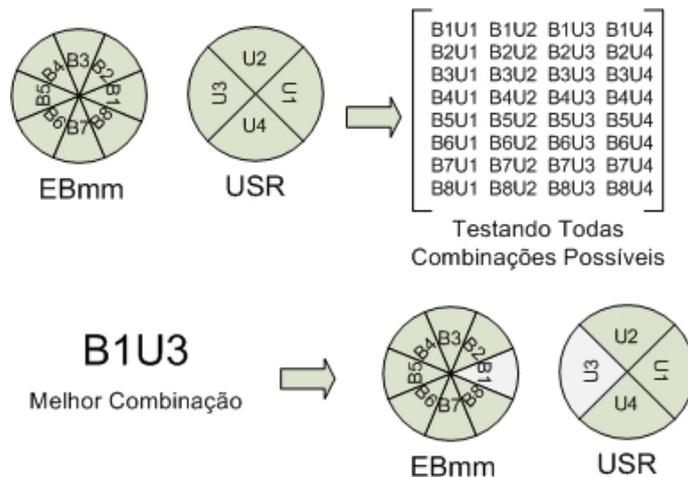


Figura 2.6: Exemplo de execução do algoritmo de busca exaustiva.

Para reduzir o tempo despendido na busca, os autores em [7] propõem um algoritmo iterativo dividido em dois estágios. No primeiro, a EBmm utiliza seguimentos menores da MA para obter feixes que façam a transmissão com maior abertura angular, que permitem fazer a varredura de todo o espaço angular com menos feixes, agilizando o processo. Numa segunda etapa, dentro do espaço angular do feixe da EBmm em que se obteve maior SNR na primeira etapa, faz-se uma nova varredura com a MA superior utilizando-se de feixes com menor abertura e maior ganho. Os resultados mostram que o processo iterativo é mais rápido que o exaustivo. Apesar disso, deve-se ressaltar que o processo iterativo apresenta maior possibilidade de falha na detecção entre EBmm e USR, já que o feixe mais aberto utilizado na primeira etapa possui menor ganho em relação ao feixe mais estreito, o que pode tornar impossível a obtenção de uma SNR mínima para a detecção do sinal transmitido em grandes distâncias. Existe um detalhe importante, que caso o ocorra falha no primeiro ou no segundo estágio, o algoritmo sempre irá voltar para o primeiro.

A Figura 2.7 apresenta um exemplo de execução do algoritmo iterativo em cada etapa. Na primeira, a EBmm e o USR estão utilizando um total de quatro feixes cada, porém vale lembrar que a EBmm está operando apenas com uma parte de sua MA. Nessa fase, o comportamento do algoritmo é igual ao do exaustivo, em que o

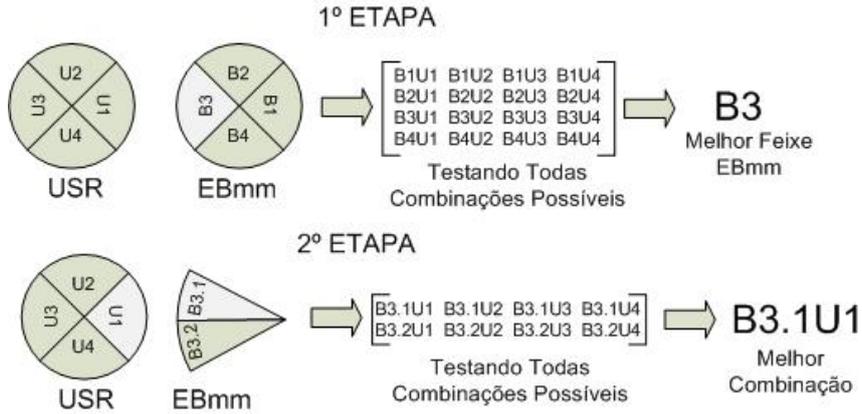


Figura 2.7: Exemplo de execução do algoritmo de busca iterativa.

USR vai escolher entre todas as amostras a que teve maior SNR e vai enviar para EBmm qual feixe está presente nessa amostra, no caso da figura foi $B3$. Chegando na segunda parte, a EBmm dobra o número de elementos que serão utilizados em sua MA, e de acordo com a teoria de antenas [5] quando dobramos a MA dentro do espaço angular de um feixe agora cabem dois com maior ganho. Usando os feixes de maior ganho a EBmm envia sondas em cada um deles, à medida que o USR chaveia os seus, obtendo no final a relação de maior ganho ($B3.1$ com $U1$). O algoritmo iterativo fez um total de 24 combinações de feixes enquanto o exaustivo faria 64, o que mostra sua superioridade em relação ao tempo gasto em acesso inicial, em contrapartida sua chance de falha é maior.

2.2.2 Com Informação de Contexto

Outra classe de algoritmos é aquela que utiliza informações de contexto para auxiliar o processo de BF. A Figura 2.8 apresenta um cenário típico considerado pelos trabalhos que seguem esta linha. Neste cenário, considera-se a existência de um satélite que envia informações de geolocalização do USR e uma rede subjacente funcionando como um canal de controle fora da banda, por onde EBmm e USR podem trocar informações e receber sinais de sincronização [16].

A informação de geolocalização, trocada pelo canal de controle, permite que o processo de BF seja realizado mais rapidamente. Em [8], os autores consideram que o USR envia sua geolocalização, obtida através de GPS, para a EBmm. Desta forma, o procedimento de BF para a EBmm se resume a calcular a direção em que o USR se encontra e escolher o feixe de transmissão naquela direção, no entanto o USR ainda faz uma varredura completa. Isso reduz enormemente o tempo necessário para o BF na EBmm, a qual não necessita fazer varredura em diferentes combinações de feixes para escolher a melhor, esse procedimento é referenciado como **GPS Simple**. Porém por causa do desvanecimento em pequena escala, testar uma única posição

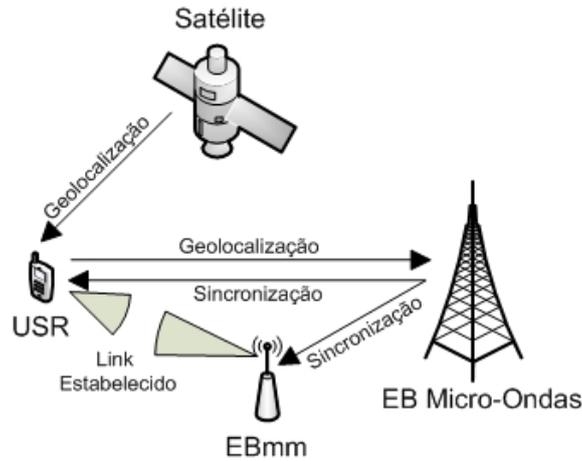


Figura 2.8: Funcionamento de um alg. de BF baseado em informações de contexto.

de feixe da EBmm pode levar a escolha de feixe não ótimo. Para mitigar o problema do desvanecimento, este mesmo artigo propôs uma variação desse método, ao qual demos o nome de *GPSRefinado*, onde o EBmm faz uma varredura não somente no feixe calculado pelo geoposicionamento, mas também nos seus dois feixes adjacentes.

Um problema dos métodos propostos em [8] é que não se considera que a informação de geolocalização obtida através do GPS pode possuir um erro associado, o qual pode levar a conclusões erradas a respeito de qual é o melhor feixe a ser utilizado. Também pode acontecer a situação onde não existe visada direta dos feixes, devido a algum obstáculo presente entre o receptor e o transmissor, tornando a informação de geolocalização falha. Tais impactos serão melhor explicados na Seção 3.1.

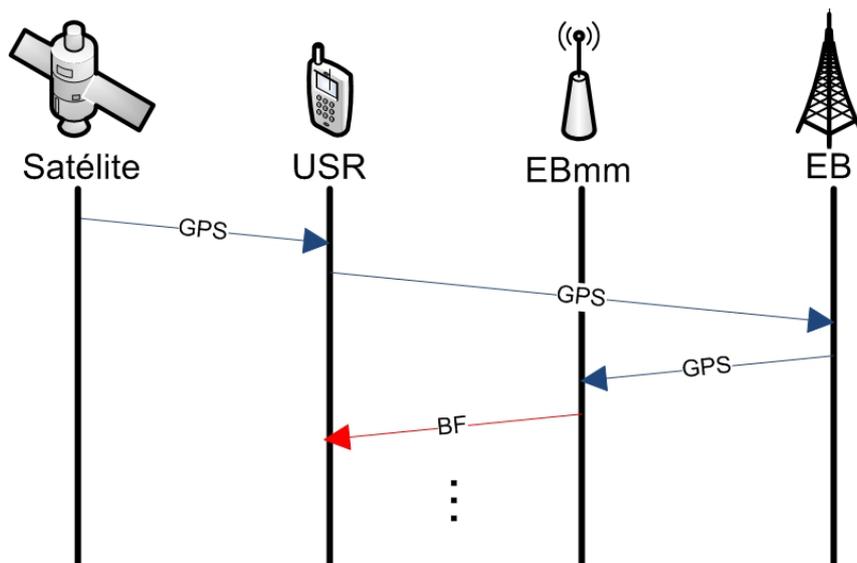


Figura 2.9: Diagrama do processo do algoritmos de IC.

Os algoritmos baseados em IC que usam o geoposicionamento como sua re-

ferência, necessitam de uma troca de mensagens para que essa informação seja passada do USR para EBmm. A Figura 2.9 exemplifica como foi realizado a troca de mensagens, em que o USR pega sua informação mais atual de localização e transmite via canal de controle para a EBmm, que inicia o BF levando em consideração a posição do USR que lhe foi passada. O tempo gasto é irrelevante, pois consideramos o USR com o GPS ligado tendo a ciência de sua posição antes de começar a tentativa de conexão.

Além do trabalho supracitado, outros usam informação de contexto em conjunto com técnicas de aprendizado de máquina, como em [12]. Este trabalho considera que diversas informações de contexto além do geoposicionamento no que diz respeito aos USRs, como por exemplo, com qual EBmm o USR estabeleceu o enlace e quais foram os feixes utilizados, que são armazenados em uma base de dados única. Em conexões futuras, essas informações são utilizadas pelo método de aprendizado para definir os melhores parâmetros a serem usados, buscando agilizar o acesso inicial com a maior SNR possível. Já o artigo [17] usa a informação de contexto do usuário para que a estação base milimétrica possa aprender a sequência de feixes que atende a este usuário. Para em conexões futuras prever situações de bloqueio e agilizar o estabelecimento do enlace.

Entretanto, se considerarmos efeitos do erro de geoposicionamento, mobilidade dos USRs e dos obstáculos do cenário, as informações de geolocalização junto a SNR do enlace tornam-se imprecisas rapidamente. Como os trabalhos citados de aprendizado de máquina usam essas duas informações de contexto do USR para alimentar suas bases de dados de seus algoritmos, causa então a ineficácia das estratégias propostas. Pois, sua base de dados será composta com informações desatualizadas rapidamente, em decorrência da mobilidade do ambiente, e com um alto grau de imprecisão associado as suas medidas.

Capítulo 3

Propostas

Esta seção, visa descrever as propostas realizadas nesse trabalho para aumentar o desempenho nas redes de ondas milimétricas, mostrando o contexto no qual elas foram implementadas assim como os procedimentos adotados em cada um delas.

Como descrito na seção anterior, as estratégias que utilizam a informação de geoposicionamento para reduzir o tempo do acesso inicial (*Initial Access* - IA) não avaliaram o impacto da acurácia do sistema de geoposicionamento nas suas propostas. Por isso nesta seção, será mostrado, através de uma abordagem geométrica e simulada, a influência da imprecisão na informação de geoposicionamento. Com isso será demonstrado a mudança do grau do erro angular em relação a disposição espacial entre o receptor e o transmissor.

A partir da avaliação feita em relação à acurácia do geoposicionamento, dois novos algoritmos conscientes desses erros foram propostos sendo ambos compostos de duas etapas. A etapa inicial, cobre uma maior área angular possível e, com as informações obtidas nessa etapa, a seguinte executa um refinamento a partir dos dados já adquiridos. Ambos algoritmos serão melhores descritos na subseção 3.2.

Além dos dois mecanismos propostos, um outro recurso foi proposto para melhorar o desempenho do acesso inicial nas redes de ondas milimétricas, foi estabelecida uma fase de teste de feixes. Assumiu-se que a mobilidade do USR gera o desalinhamento dos feixes gerando um novo IA e que existe uma maior probabilidade de que o USR locomoveu-se para um feixe adjacente. Ao invés de realizar um processo de IA completo, executamos um teste nos feixes adjacentes aos que estavam sendo usados, e com isso tentar recuperar a qualidade do canal diminuindo o tempo de IA. Chamamos esse recurso de **FAST-IA**, que será apresentado na subseção 3.3.

Na próxima subseção, será feita uma avaliação do erro de geolocalização em função da distância entre USR e EBmm. Com o intuito de mostrar o seu impacto nos algoritmos que utilizam informação de contexto no IA, para em seguida, apresentarem-se as duas propostas desse trabalho.

3.1 Impacto do Erro de Geoposicionamento

A informação correta do posicionamento do usuário permite à EBmm e ao USR realizar o BF de forma rápida e precisa [8]. No entanto, em áreas urbanas ou florestais [18–20], onde ocorre o bloqueio, reflexão ou difração do sinal emitido pelo satélite [21], o erro de geolocalização pode ser bastante elevado. Desta forma, o uso dessa informação pode determinar uma decisão não ótima do par de feixes a serem utilizados, podendo levar a uma taxa de transmissão reduzida ou até mesmo a falha na comunicação. Levantamentos feitos em [19, 20], colhem medidas de veículos automotivos em movimento para obter o grau de imprecisão de sua localização geográfica, mas como a essência de nosso trabalho é referente a movimentação de pedestres e veículos de propulsão humana (bicicletas, patins, etc ...) que operam em menores velocidades. Por isso, os levantamentos realizados com veículos automotores ficaram fora do foco do nosso trabalho, mas foram de suma importância para mostrar uma imprecisão significativa no sistema de geolocalização.

A pesquisa realizado por [18] também faz a coleta de medições de posicionamento geográfico, mas desta vez os percursos realizados para obtenção das informações foram feitos por pedestres. Diversas localidades e com diferentes tipos de ambientes formaram as regiões onde os trajetos foram traçados. As regiões de estudo eram compostas por cenários com alto e baixo índice de reflexão e difração, com os espaços urbanos e florestais representando os locais com índice elevado e enquanto os cenários em campo aberto representavam os de baixo índice. As medidas de imprecisão foram calculadas a partir da diferença longitudinal e latitudinal de marcações exatas durante a rota do pedestre, com as informações obtidas pelo GPS no qual o aparelho celular foi posicionado em diversas partes do corpo. Com a análise dos resultados obtidos, os erros de geoposicionamento se assemelharam à uma distribuição normal, com média e variância dependentes das regiões em que os dados foram coletados.

Em [18] os sistemas de geoposicionamento contaram com o *assisted* GPS, que é um procedimento mais robusto que usa mais de uma fonte de informação proveniente das redes celulares, ajudando o calcular a posição do dispositivo e melhorando a sua precisão de acordo com [22]. Logo, esse trabalho tornou-se a base para fundamentar as distribuições estatísticas que geram o erro de geoposicionamento usado em nosso simulador, e em alguns cenários são possíveis erros de até 9 metros na média com 60 metros de variância.

Uma questão importante referente ao erro de geolocalização que foi levantada neste trabalho, é que existe uma correlação entre a distância do USR até EBmm com a imprecisão do GPS. Quando analisamos geometricamente a distância entre EBmm e USR conjuntamente para um mesmo grau de erro de geolocalização (Figura 3.1), podemos notar que quanto mais próximo está o USR da EBmm, maior é o impacto

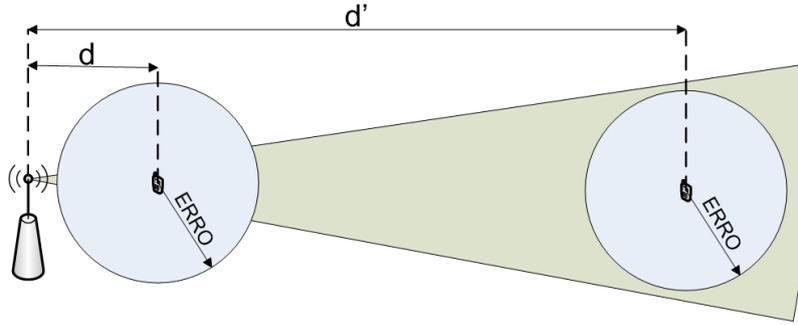


Figura 3.1: Análise geométrica do erro de geoposicionamento.

do erro. Ou seja, Quando o USR está a uma distância menor (d) da EBmm, o erro é muito mais significativo em relação à abertura do feixe, resultando em um erro angular (EA) mais elevado, que é justamente diferença entre os ângulos da posição real (PA_{real}) e com erro (PA_{erro}) do USR mostrada pela Equação 3.1, do que quando o USR está a uma distância maior (d'), onde o erro é menos relevante em proporção ao tamanho da abertura do feixe (EA'). Ou seja, se $d < d'$ então $EA > EA'$.

$$EA = |PA_{real} - PA_{erro}| \quad (3.1)$$

Para comprovar a hipótese geométrica, realizamos uma simulação onde uma EBmm está localizada num ponto fixo e a USR varia aleatoriamente sua posição angular em torno da EBmm para diferentes distâncias. Para isso, parametrizamos o erros de geoposicionamento (EG) com base na distribuições normais retiradas do artigo [18]. Esse processo é executado diversas vezes para uma mesma distância e cada rodada sorteamos uma nova posição angular e EG, e no final calculamos a média da diferença angular provocado por esses erros. Esse método nos disponibilizou ter a correspondência entre o aumento da distância e o EG.

A Figura 3.2 revela o resultado das simulações, no qual usamos erro baixo com média 5 e variância 15 e um alto com média 9 e variância 60, ambos valores tirados do artigo que tomamos como referência. Esses erros foram escolhidos para refletir situações favoráveis onde o USR encontra-se em locais abertos e desfavoráveis como em locais com muitos prédios.

As características das curvas mostram o efeito de dependência da distância com a dimensão do erro angular, revelando de quanto menor for o distanciamento entre USR e EBmm maior será o erro médio angular e o erro vai decaindo conforme o USR distancia-se da EBmm. A curva roxa com menor média apresenta um erro médio inferior 10° próximo a distância de 40 metros, à medida que a curva com maior média (verde) só fica abaixo de 10° a partir de 180 metros, exibindo que quanto maior o valor da média e da variância mais alto é o grau do erro médio.

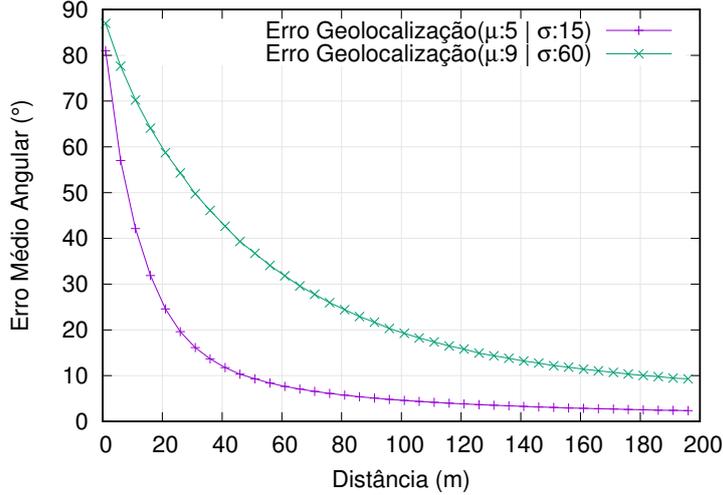


Figura 3.2: Simulação da diferença angular média provocada pelo erro de geoposicionamento até uma distância de 200 metros.

Os resultados simulados comprovaram a relação trigonométrica do EG. Intuitivamente, isso significa que em distâncias menores, a varredura deve ser feita em um maior espaço angular do que em distâncias maiores. Por outro lado, varrer um maior espaço angular significa ter que utilizar um maior número de feixes e por conseguinte aumentar tempo de busca. Tais constatações nos levaram a desenhar as propostas descritas em seguida, que buscam varrer uma grande faixa do espaço angular, mas despendo um menor tempo em comparação com as propostas dos outros autores.

3.2 Propostas de Algoritmos de *Beamforming*

As novas propostas de *beamforming* são realizadas no contexto onde os feixes da EBmm que serão testados com base na informação de geoposicionamento, enquanto o usuário apenas faz uma varredura cega em todos os seus feixes. Como já foi dito anteriormente, ambas propostas usam a informação de posicionamento do usuário para a escolha de qual feixe a EBmm irá usar no BF, realizando a varredura em uma maior área angular para diminuir o impacto do erro nesse posicionamento, buscando o menor número de iterações possível para não onerar o tempo de busca.

A primeira proposta que nomeamos de **Proposta Iterativo**, nela utiliza-se um subconjunto dos elementos da matriz de antenas para formar uma antena com feixe mais aberto. Com isso, testa-se o feixe principal e seus adjacentes para ter uma maior cobertura com menos tempo de BF. Em seguida, refina o melhor feixe da primeira fase com feixes mais estreitos a fim de obter um melhor alinhamento e com maior ganho. Na segunda proposta foi nomeada de **Proposta Refinado**, a EBmm utiliza feixes estreitos de forma intercalada e seleciona o feixe com a melhor relação sinal-ruído para então testar seus feixes adjacentes, pois são os que possuem a maior

probabilidade de apresentarem uma melhor relação sinal ruído junto ao usuário.

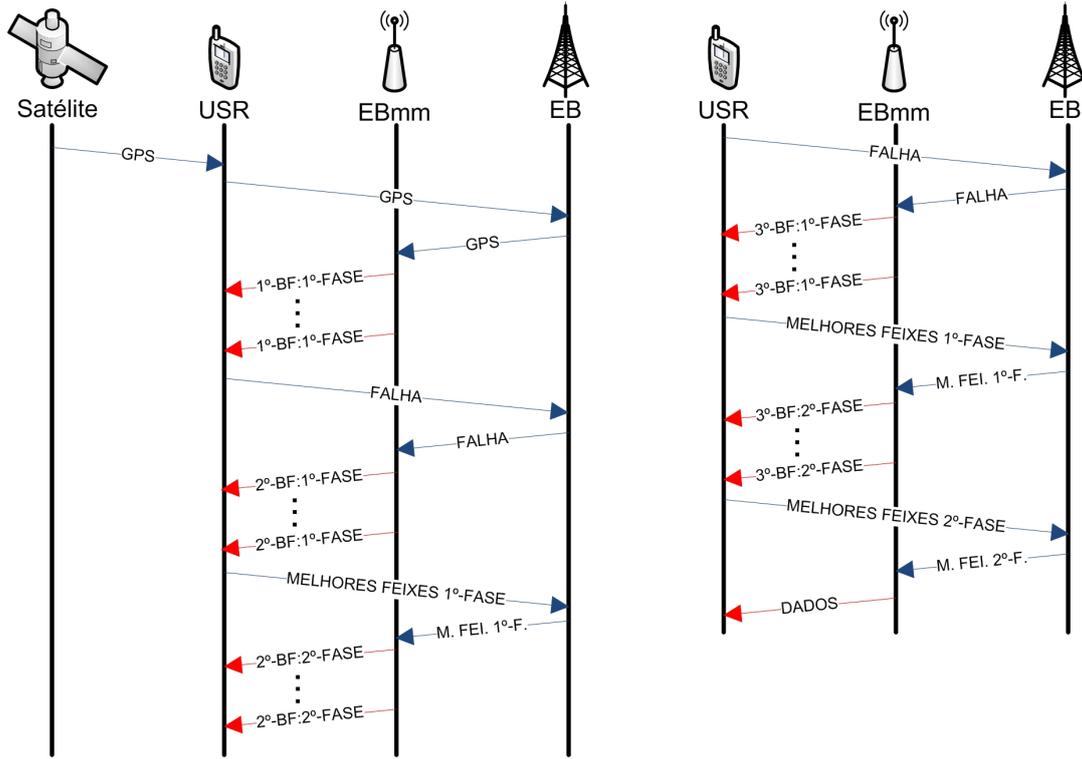


Figura 3.3: Diagrama para estabelecer um enlace baseado em nossas propostas.

Em uma comunicação de *downlink*, os algoritmos propostos terão dois estágios para estabelecer um enlace em ondas milimétricas, os diferenciando do exaustivo e dos outros métodos que usam geoposicionamento. Logo, o processo de troca de informações durante o período de IA se dá de forma diferenciada em relação as propostas dos outros autores, que faziam o uso de apenas um estágio.

A Figura 3.3 mostra o comportamento da **Proposta Iterativo** com sucessos e falhas em suas tentativas de conexão. No qual obtêm-se primeiramente a informação da localização do USR através do sistema de geoposicionamento, que em seguida é repassada até chegar a EBmm. Depois que a EBmm já está em posse da geolocalização do USR é realizado a primeira fase de *beamforming* ($1^0 - BF$, $1^0 - FASE$), e como SNR obtido na varredura de feixes não atingiu o limiar mínimo necessário para que haja comunicação entre USR e EBmm, gerou uma mensagem de falha enviada pelo canal de controle. Então, o procedimento foi refeito conseguindo um nível de SNR acima do limiar ($2^0 - BF$, $1^0 - FASE$), logo o USR envia uma resposta do feixe para EBmm que inicia o segunda fase de BF.

Chegando na segunda fase ($2^0 - BF$, $2^0 - FASE$), o USR não conseguiu uma amostra de SNR que atingisse o limiar mínimo. O que resultou em falha, obrigando o algoritmo a voltar para primeira fase. Então todo processo da primeira fase é repetido ($3^0 - BF$, $1^0 - FASE$), chegando novamente na segunda fase ($3^0 - BF$, $2^0 - FASE$), porém agora o USR conseguiu uma amostra de SNR aceitável. Isso

possibilitou que o USR enviase a mensagem de relatório com a melhor combinação de feixes para EBmm via canal de controle, e posteriormente o enlace se formou podendo ocorrer a transmissão de dados.

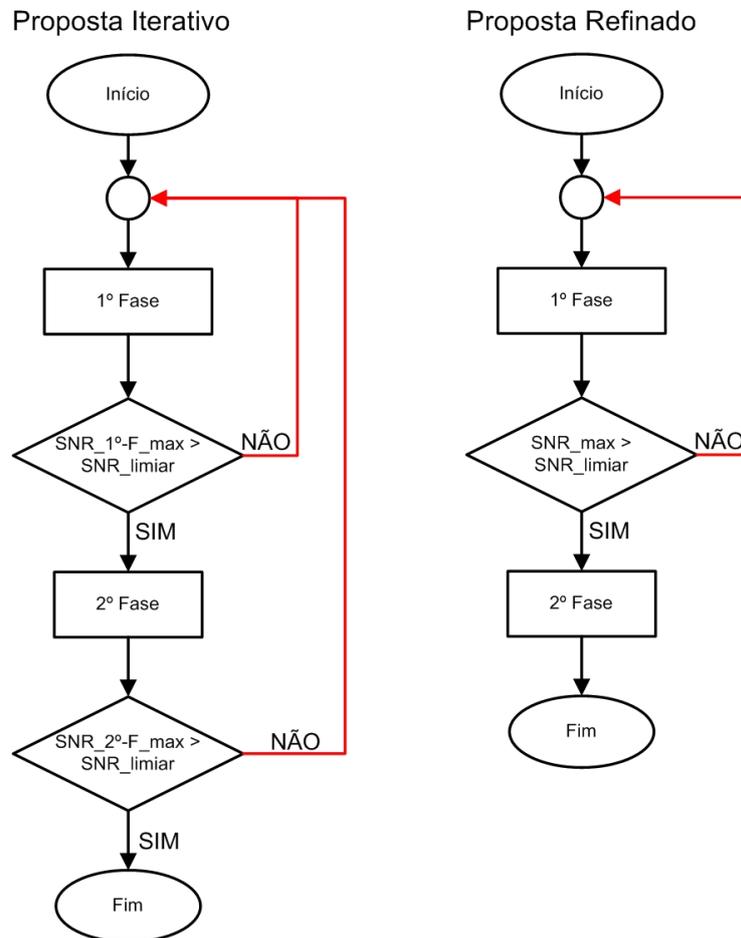


Figura 3.4: Fluxogramas gerais baseado dos algoritmos propostos.

No caso da **Proposta Refinado**, a única alteração em relação a Figura 3.3 seria que: em caso de sucesso na primeira fase, a segunda não teria possibilidade de falha. Pois, como a matriz de antenas permanece inalterada em todo o processo, esse algoritmo chegando na segunda fase ele já tem uma combinação de feixes acima do limiar mínimo de SNR. Então, mesmo que os feixes adjacentes da EBmm na segunda fase não alcancem uma amostra superior ao limiar mínimo de SNR, se estabelece o enlace com a melhor combinação da primeira fase.

A estrutura lógica em relação a passagem de fase de ambos algoritmos estão representados pela Figura 3.4, onde existem dois fluxogramas que mostram detalhadamente todo o processo que foi exemplificado. Nesse fluxogramas situam-se os pontos de decisórios, que verifica se foi atingido o limiar mínimo de SNR e em caso de falha, determina-se o reinício do processo.

3.2.1 Proposta Iterativo

O primeiro algoritmo foi baseado na ideia que quando utilizamos um subconjunto dessa matriz de elementos, estamos aumentando a abertura do feixe, possibilitando cobrir um maior espaço angular com um menor número de combinações de feixes. Logo, em vez de usar toda matriz no início do algoritmo, apenas uma parcela dos elementos vai ser utilizada. Em uma fase seguinte, já sabendo melhor o setor que obteve a SNR mais elevada, a cobertura dessa região será feita por feixes mais estreitos e com maiores ganhos, onde utilizaremos toda a matriz de elementos.

Dado que a proposta é dividida em duas etapas, então vamos descrever cada uma com mais detalhes. Na fase inicial, a EBmm utiliza a posição do USR obtida do sistema de geoposicionamento para fazer a escolha do feixe principal e seus adjacentes, os quais serão usados durante o *beamforming*. Por outro lado, o usuário usa todos seus feixes, tentando obter a melhor SNR possível. Caso não consiga obter uma SNR mínima para estabelecer um enlace, essa etapa deve ser refeita. Ao invés da EBmm usar uma matriz de antenas com todos os elementos para obter um maior ganho, ela utiliza uma matriz com um número menor de elementos, fazendo com que o feixe tenha uma maior abertura angular e assim realizar uma varredura mais ampla. Isso permite realizar um *beamforming* mais rápido, mesmo que isso cause uma redução significativa em seu ganho.

Na fase subsequente, o feixe da EBmm com o maior SNR da primeira etapa é dividido em sub-feixes de menor abertura e maior ganho, empregando-se toda a matriz de elementos. Então, realiza-se o *beamforming* entre os sub-feixes da EBmm e os feixes do USR, buscando a combinação com o maior SNR. Caso essa etapa também não consiga alcançar SNR mínima, ele recomeçará da fase inicial.

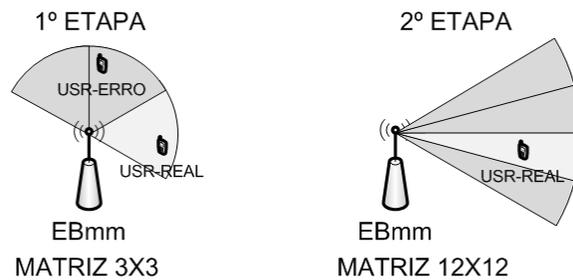


Figura 3.5: Representação do algoritmo Proposta Iterativo

A Figura 3.5 ilustra o funcionamento desse algoritmo. Onde a primeira etapa mostra a EBmm com uma matriz 3x3 e usando a informação do geoposicionamento com erro do USR para estabelecer qual feixe proporcionaria o maior ganho, e seguindo testando sua adjacência assegurando a cobertura angular de 180°, reduzindo a influência da informação com erro do USR. Nota-se que o melhor feixe não foi o central e sim seu vizinho a direita, o qual será usado na etapa final.

Na segunda etapa, a Figura 3.5 exibe um aumento da matriz, sendo agora utilizada uma 12x12. Devido ao novo tamanho da matriz, necessitou-se dividir a área em quatro feixes para se obter o mesmo grau de cobertura do feixe escolhido na primeira etapa. Fazendo-se o *beamforming* com esses quatro feixes da EBmm, o melhor foi o feixe em branco na figura, resultando na diminuição da influência do erro de geoposicionamento (EG) na primeira etapa e consequentemente elevando o ganho na sua segunda.

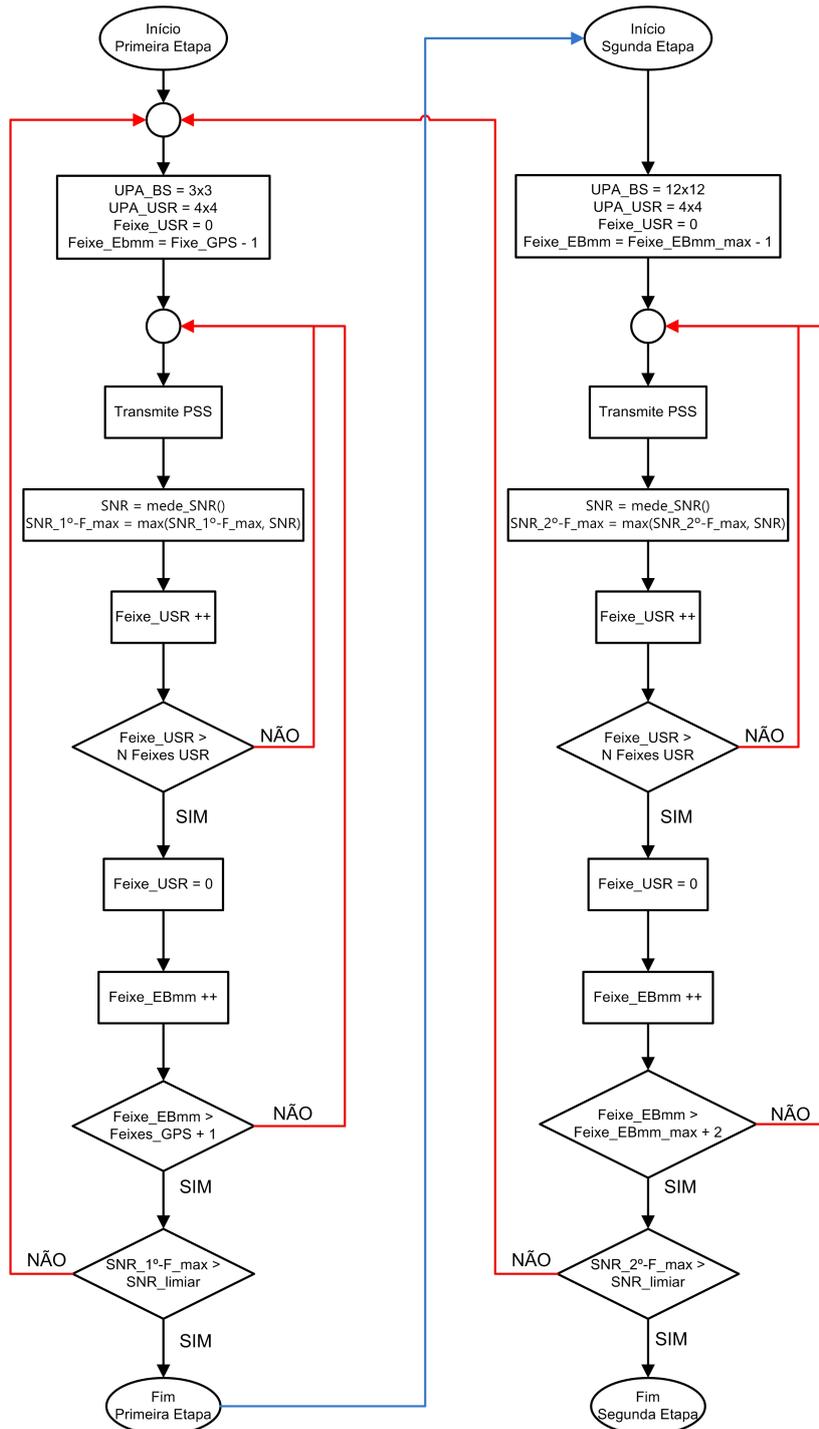


Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo Proposta Iterativo.

Ao fazermos uma análise matemática envolvendo o número de combinações de feixes e a área angular coberta de cada etapa, teremos então, uma comparação temporal pelo tempo gasto no BF e espacial derivada da área de cobertura de cada etapa. Estabelecendo que a EBmm usa uma matriz 3x3 com 60° de abertura de feixe na primeira etapa e uma 12x12 com 15° de abertura de feixes na segunda, enquanto o USR sempre utiliza uma 4x4. Mantendo as premissas da matriz de elementos, o total de correlações de feixes dessa proposta seria 56 combinações (24 combinações na primeira etapa somado a 32 combinações na segunda etapa). Pois a EBmm aplica 3 e 4 feixes na primeira e segunda etapa respectivamente totalizando 7, à medida que o USR sempre opera com os seus 8 feixes. Essa proposta cobre um espaço angular de 180°, em consequência da maior abertura dos feixes em sua primeira etapa, e se formos varrer esse mesmo espaço, mantendo o ganho da matriz da EBmm em 12x12. Se empregarmos uma estratégia simplificada, na qual testaria todos os feixes dentro da mesma aérea de cobertura de 180°, resultaria no uso de 12 feixes pela EBmm, que combinados com os 8 do USR forneceria 96 combinações.

Comparando as dois resultados, vemos que a proposta é 71% mais rápida do que um método simplificado de varredura, onde ambos têm a mesma abrangência angular. Mostrando a maior eficácia da nossa proposta. Para finalizar as explicações dessa proposta, é apresentado a construção lógica de seu algoritmo na Figura 3.6. Essa figura apresenta um fluxograma que mostra a sequência de ações que foi executada pelo algoritmo.

3.2.2 Proposta Refinado

A construção do segundo algoritmo foi pensada a partir da observação que a informação de posicionamento do USR têm um grau de erro angular tão alto que apenas investigar os feixes adjacentes não trariam resultados satisfatórios. Mesmo que diminuamos o tamanho da matriz de elementos em uma primeira fase, acarretaria uma maior probabilidade de falha de detecção no processo de BF, devido a redução dos ganhos proporcionados pela matriz. Então para manter o ganho de irradiação sempre no máximo que a matriz pode disponibilizar e reduzir o impacto do erro do sistema de geoposicionamento, decidimos que, ao invés de se averiguar inicialmente os feixes adjacentes em relação ao principal, vamos pular essa vizinhança e testar os feixes seguintes a ela, podendo chamar de um teste intercalado dos feixes. Após a primeira etapa de BF será informado qual do três feixes da EBmm proporcionou a maior SNR. Com isso, a chance da melhor combinação de feixes com o USR será daquele feixe da EBmm que teve a SNR mais elevada dentre os três testados na primeira parte ou em um de seus feixes adjacentes. Tal medida, procura gerar um canal com a mais alta capacidade possível com o menor número de iterações no BF.

Para melhor esclarecer essa proposta vamos dizer que inicialmente uma USR queira se conectar a rede de ondas milimétricas, assim que a EBmm detém a informação da posição do USR, ela realiza a escolha do feixe principal e determina sua adjacência intercalada. Em seguida, é realizado o *beamforming* entre esses três feixes e os feixes do usuário, obtendo a melhor SNR para cada feixe da EBmm utilizado. Na fase seguinte, uma comparação das medidas de SNR obtidas nos feixes intercalados adjacentes é realizada. O feixe que obtiver a melhor SNR terá seus feixes adjacentes testados. Mas no caso de não se obter nenhuma informação de SNR nesses feixes, pelo fato de não alcançarem um nível mínimo de sinal durante o BF, todo o processo terá que ser refeito.

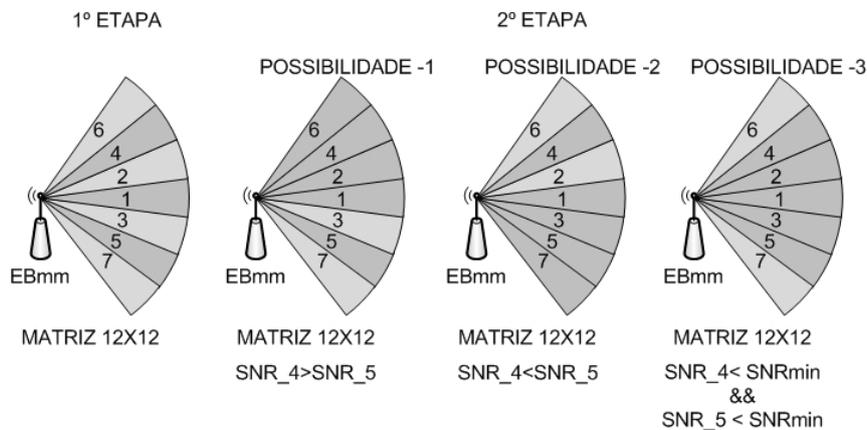


Figura 3.7: Diagrama para estabelecer um enlace baseado na Proposta Refinado

Pela Figura 3.7, podemos entender melhor o funcionamento da proposta. Nessa figura, o feixe principal é sempre numerado com 1, logo os feixes 4 e 5 são os intercalados adjacentes. Na primeira possibilidade, o SNR do feixe 4 foi maior que o do 5 ou do 1, então os feixes 2 e 6 são testados. A segunda possibilidade é o inverso da primeira, então serão avaliados os feixes 3 e 7. A última possibilidade corresponde ao caso de ambos os feixes 4 e 5 terem obtido respostas de SNR inferior ao 1, nesse caso os feixes 2 e 3 serão escolhidos para o BF. Ao final de todo o processo, a EBmm terá obtido informações de SNR de cinco feixes, assim como as combinações de feixes que as geraram. Para estabelecer a comunicação, será escolhida a combinação com maior SNR.

Fazendo uma análise geométrica na Figura 3.7, cada feixe cobre uma área angular de 15° em uma matriz 12×12 e testando-se apenas 5 feixes da EBmm cobrimos uma espaço de 105° . Um método mais simples, que testa todos os feixes dentro da uma mesma área de cobertura de 105° , necessitaria de utilizar 7 feixes da EBmm. Considerando-se que o USR tem 8 feixes, essa proposta seria então 40% mais ágil que o o método simplificado. visto que a proposta faz uso de 40 combinações e o simplificado 56, ou seja, a proposta tem um comportamento mais eficiente satisfazendo o mesmo grau de cobertura. Com o intuito de formalizar o comportamento

lógico do algoritmo Proposta Refinado, é apresentado um fluxograma na Figura 3.8 mostrando as suas etapas de funcionamento.

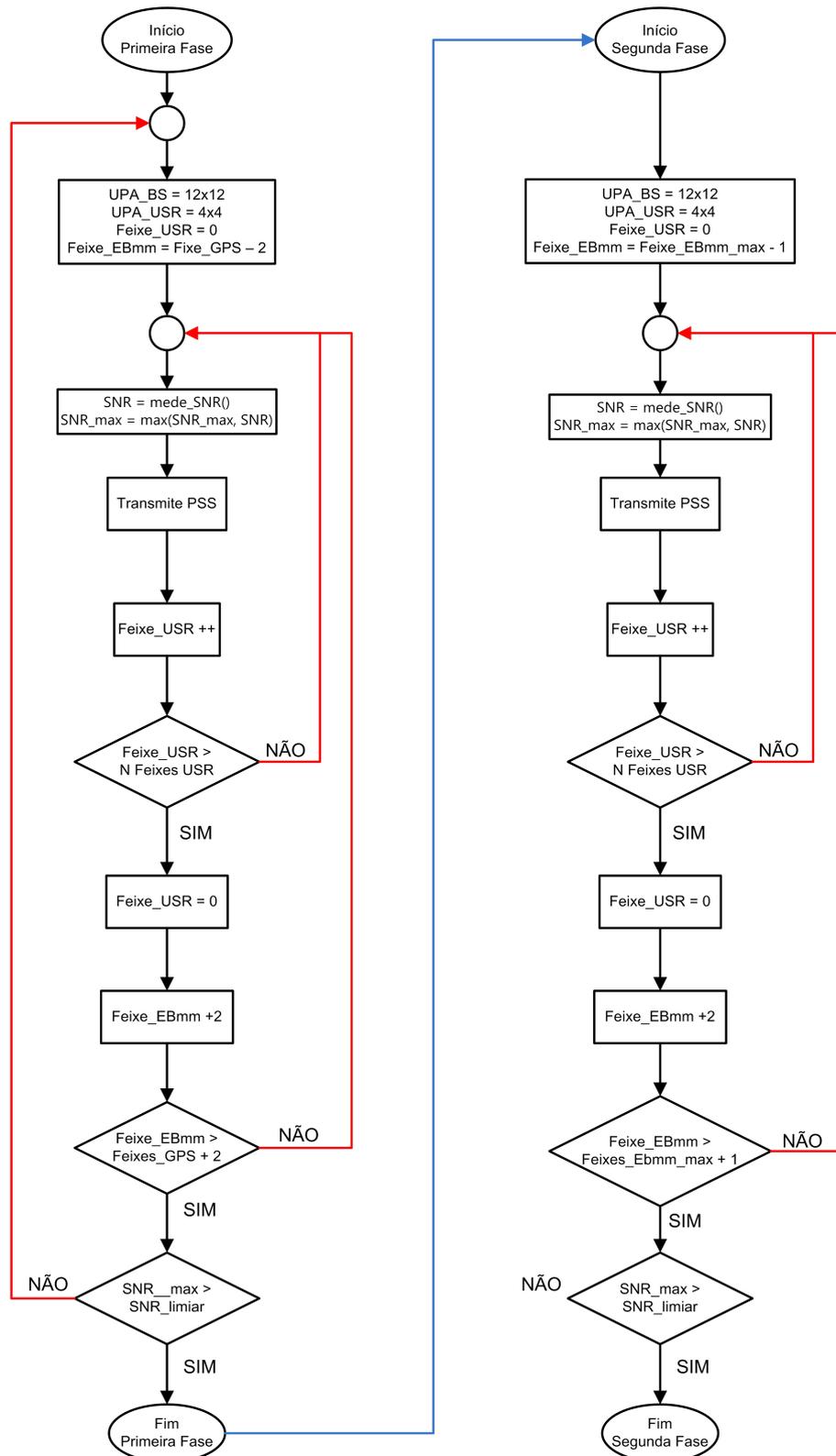


Figura 3.8: Fluxograma do algoritmo Proposta Refinado.

3.3 Proposta FAST-IA

Após feita a elaboração de algoritmos que diminuíssem o tempo gasto em *beamforming* com o compromisso de mitigarem erro de geoposicionamento (EG), o FAST-IA foca na redução do período de IA sem nenhum tipo de relação com a informação geográfica de posicionamento do USR.

Essa nova proposta foi feita presumindo-se que ocorre o desalinhamento entre os feixes, pois em um cenário onde o USR se desloca dentro da célula da EBmm é intuitivo que a combinação inicial de feixes não seja mais a melhor, dado que o USR não estará mais na mesma posição depois de um certo período de tempo de quando foi executado o IA.

Logo, pode-se presumir que o desalinhamento entre os feixes causa a queda da capacidade do canal ou até mesmo a falha da conexão e uma nova tentativa de realinhamento deve ser tomada. Mas ao invés de despende um tempo considerável refazendo todo procedimento de IA, esse método propõe fazer primeiramente uma averiguação. Se a taxa do canal for recuperada apenas com essa técnica consideramos que os feixes foram realinhados, e um novo o IA não necessita ser realizado.

Porém, pelo fato do FAST-IA ser um método que agiliza o *beamforming*, não se descarta a possibilidade de realizar um novo IA. Isso decorre do fato que mesmo com a investigação feita pelo FAST-IA, a taxa do canal pode não retomar um valor aceitável, o que obrigaria a realização do IA a fim de manter a melhor qualidade do canal possível.

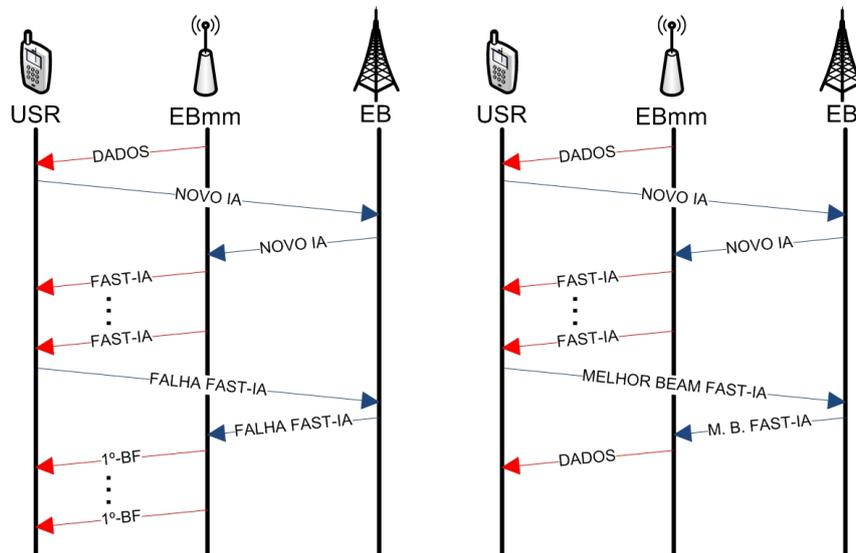


Figura 3.9: Representação do algoritmo FAST-IA

Para melhor elucidar o funcionamento do FAST-IA junto com o processo padrão de IA, reproduziu-se uma situação onde o USR necessita refazer o realinhamento entre seus feixes. Para esse fim dois casos foram representados pela Figura 3.9, no

qual o diagrama do lado direito demonstra o contexto de falha do FAST-IA. Já o diagrama do lado esquerdo é o oposto ao outro acontecimento, pois agora o FAST-IA tem sucesso em seu objetivo. Em seguida, iremos explicar mais detalhadamente os procedimentos mostrados na Figura 3.9.

O diagrama do lado direito começa mostrando que o enlace já está estabelecido, estando então no período de dados. Por causa da queda de capacidade do enlace o USR vê a necessidade de efetuar um novo IA, então via canal de controle o mesmo passa essa informação até chegar à EBmm. No entanto, antes de começar um IA a EBmm e o USR vão iniciar a estratégia do FAST-IA, e logo após sua realização o USR detectou que não foi possível recuperar a qualidade do enlace a um nível conveniente para continuidade do envio de dados. Devido a tal acontecimento, o USR envia um aviso pelo canal de controle para EBmm que o FAST-IA falhou. A EBmm sabendo da falha ocorrida, começa então um novo IA para o reestabelecimento do enlace.

Passando para o diagrama esquerdo em que ilustra um caso de sucesso do FAST-IA, sua inicialização começa da mesma forma do diagrama já explicado, onde o USR vê a necessidade de realinhamento dos feixes, passando essa informação para EBmm. Mas agora ao final do FAST-IA, o USR consegue encontrar uma relação entre seu feixe e da EBmm que atingiu ou ultrapassou o nível de taxa desejada. Após o USR saber quais feixes ambos irão utilizar, ele envia pelo canal de controle essa combinação para a EBmm. Finalmente, com a EBmm conhecendo qual feixe ela irá usar, ela estabelece o enlace com o USR e inicia a fase de dados, sem precisar realizar o IA que despenderia maior quantidade de tempo.

Em vista do que foi explicado anteriormente sobre a parte do processo de restabelecimento da conexão que o FAST-IA se encaixa, logo poderemos discutir como é feita a varredura de feixes neste método. E para esclarecer a técnica utilizada neste mecanismo foi montado a Figura 3.10, demonstrando um caso em que o USR e EBmm estão com seus feixes desalinhados, representando um fator que pode gerar queda considerável na taxa. Logo nesta situação o realinhamento será preciso, acionando então o FAST-IA. A Figura 3.10 foi dividida em dois quadrantes para demonstrar as etapas do processo do FAST-IA.

Iniciando pelo quadrante superior, os feixes hachurados em vermelho representam aqueles que estão sendo usados para transmissão de dados. Nota-se que o USR e a EBmm perderam a orientação entre seus feixes. Graças a essa situação que provocou a queda da taxa e atingiu o limiar disparando esse procedimento, que procura efetuar a recuperação do canal. Esse limiar que dispara o algoritmo se dá quando a taxa de transmissão cai de um percentual da taxa máxima de transmissão que foi registrada desde o último IA.

Com o limiar de disparo alcançado, o FAST-IA começa fazendo a varredura dos feixes que já estavam sendo utilizados em dados com os feixes adjacentes da outra

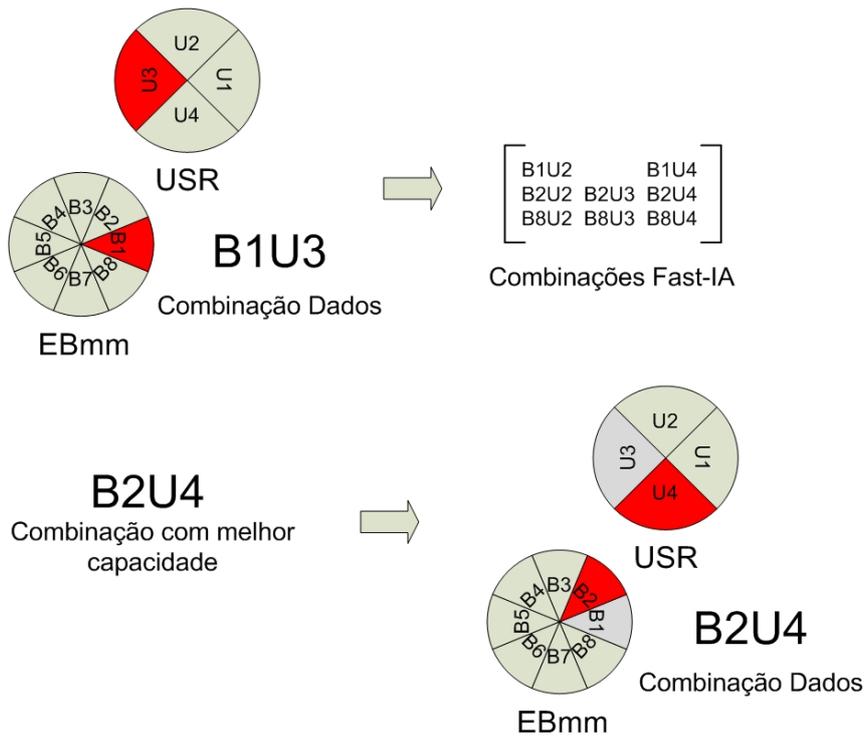


Figura 3.10: Representação do algoritmo FAST-IA

ponta do enlace, como também entre a adjacência de ambos os lados. A única combinação de feixes que não será testada é aquela que já estava sendo empregada em dados. Todas essas relações são reveladas quando nos adentramos na matriz de combinações FAST-IA preenchida pelo USR, que mostra todas as interações que foram feitas entre os fixes e cada posição da matriz guarda uma amostra de SNR referente a combinação em questão.

No quadrante inferior o USR define os feixes B2 e U4 que geraram a amostra de SNR com a maior capacidade, e tal amostra retoma a taxa a um patamar aceitável não tendo necessidade da execução do IA. Com a EBmm recebendo a informação de sucesso e tendo o conhecimento de qual feixe irá usar, é promovido então o realinhamento com o USR como revela o setor hachurado de vermelho. A partir do realinhamento feito, a comunicação é retomada. Tendo em vista do que foi dito sobre o FAST-IA, foi elaborado um fluxograma desse algoritmo demonstrando sua lógica de execução, que foi mostrado pela Figura 3.11

Mas duas dúvidas ainda podem permanecer ao final de tudo que foi dito. Uma delas é qual o motivo de apenas averiguar os feixes principais e suas áreas de adjacência? A outra é, se o FAST-IA tiver falhas demasiadas não prejudicaria ainda mais o tempo que não fora destinado para dados, reduzindo assim o período para transmissão de informações?

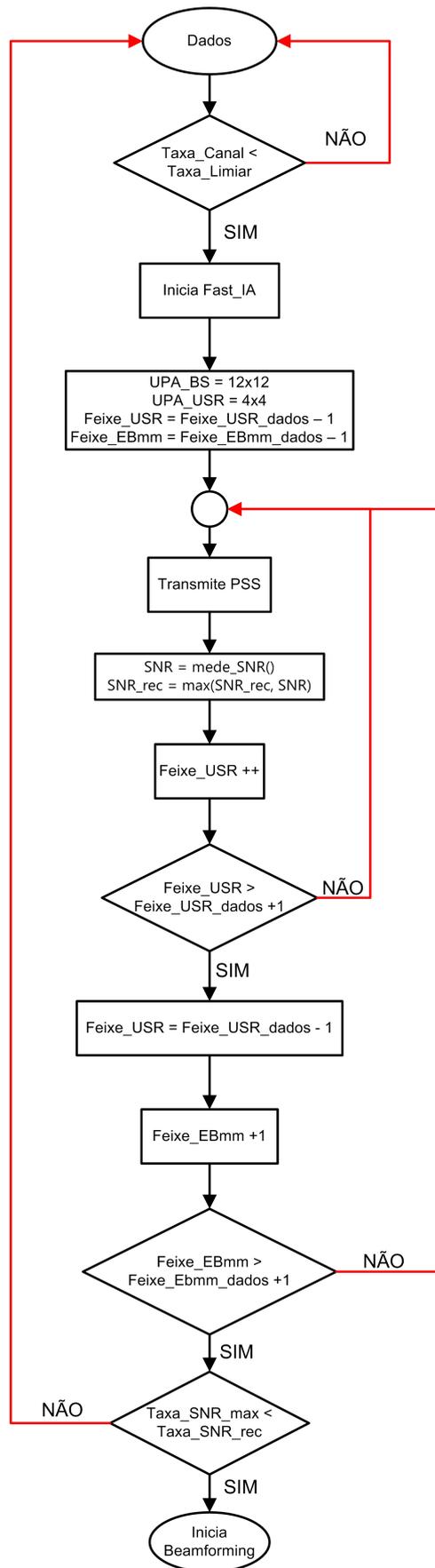


Figura 3.11: Fluxograma do algoritmo FAST-IA.

Para responder o primeiro questionamento temos que ter claro o conceito de que para uma comunicação rádio base operar com a maior qualidade possível, ter os feixes alinhados é primordial. Porém quando USR se move, os feixes desalinham e a capacidade reduz drasticamente o que levaria a necessidade de refazer o IA. Então, se pensarmos que a possibilidade do USR ter se desalinhado pela sua locomoção para uma zona de adjacência do feixe que estava sendo usado é alta. Logo, fazer uma varredura limitada nas adjacências dos feixes do enlace que proviam o enlace se torna uma tática válida.

Quanto ao segundo questionamento, a consideração inicial que pode ser feita está relacionada ao tempo muito reduzido gasto no FAST-IA. Pois mesmo que sua aplicação falhe, o seu tempo disposto é tão baixo que teria um impacto reduzido no período total gasto em IA. A outra consideração pode ser revelada intuitivamente, pois esperamos que esse método na média acerte mais que falhe devido ao que foi respondido na primeira pergunta, reduzindo o tempo médio que seria despendido para o IA e aumentando a capacidade média do canal. Na Seção 5 as vantagens descritas nos questionamentos serão comprovadas posteriormente pelos resultados dos experimentos realizados.

Capítulo 4

Modelos para Avaliação de Desempenho

Este capítulo foi subdividido de forma a apresentar os modelos que foram adotados em nosso trabalho. Começando com a explicação de como é composta a estrutura do simulador para em seguida falar das métricas de desempenho que foram propostas para avaliar os algoritmos de acesso inicial baseados em informação de contexto propostos na Seção 3.2 em comparação com os algoritmos presentes na literatura. No final, trataremos do padrão de mobilidade projetado e o porque de sua aplicação, para então discutir como se originou o modelo de canal adotado.

4.1 Modelo do Simulador

O modelo de simulador proposto assume que a execução do procedimento de acesso inicial é uma tarefa frequente e recorrente em uma rede de ondas milimétricas. Tal característica pode ser causada na prática por diferentes fatores, dentre os quais se destaca a intermitência dos enlaces devido à grande variabilidade do canal em altas frequências [10].

Para representar essas perdas de conexão causadas pela variabilidade do canal, definimos que a comunicação entre EBmm e USR vai ocorrer em superquadros. O superquadro representa o intervalo no tempo do estabelecimento do enlace até o seu término. Ou seja, quando um USR solicita a sua associação para uma EBmm e depois de um certo intervalo de tempo a conexão é finalizada ou perdida, esse período é a composição estrutural do superquadro. Cada superquadro será dividido em duas fases. Na fase inicial, acontece a execução do procedimento de acesso inicial para o estabelecimento do enlace. Na segunda fase, ocorre a transmissão de dados, onde EBmm e USR poderão se comunicar pelo enlace estabelecido.

O modelo então pode ser representado pelo diagrama da Figura 4.1. Neste dia-



Figura 4.1: Modelo do simulador em redes de ondas milimétricas.

grama pode-se perceber que do ponto de vista de um usuário, onde a comunicação com a EBmm ocorrerá em superquadros (*superframes*), os quais têm duração representada por um Tempo de *Frame* (t_{Frame}). Onde, o superquadro é composto pelo Tempo de Acesso Inicial (t_{IA}) e pelo Tempo de Dados (t_{Dados}). Também podemos notar a periodicidade desse processo, no qual ao longo da figura outros superquadros se sucedem.

4.2 Métricas de desempenho

Neste trabalho, desenvolvemos um novo meio de análise que fornece uma métrica única para avaliar o desempenho dos algoritmos de BF descritos nas seções anteriores. Essa análise leva em consideração e integra duas métricas conflitantes: o tempo gasto no procedimento de acesso inicial (t_{AI}) e a SNR do enlace estabelecido através desse procedimento. O tempo gasto no acesso inicial está diretamente relacionado ao tempo de execução do algoritmo de BF e representa uma sobrecarga (*overhead*) na comunicação entre EBmm e USR, enquanto a SNR obtida indica a eficiência do algoritmo de BF na busca por uma combinação de feixes EBmm-USR que forneça uma elevada qualidade de comunicação.

Usualmente, quanto maior o tempo gasto no procedimento de acesso inicial pelo algoritmo de BF, maior serão as chances do enlace formado possuir uma alta SNR, pois o algoritmo terá testado mais combinações de feixes entre EBmm e USR, o que aumenta a probabilidade de se encontrar a melhor situação possível naquele instante. Em contrapartida, algoritmos que demandam menos tempo no procedimento de acesso inicial têm a tendência a formar enlaces com menor SNR e conseqüentemente menor capacidade.

Antes de definir as essas novas métricas, precisamos apresentar como se compõe a relação sinal ruído em nossa avaliação, pois ela é determinante para o cálculo e desempenhos de nossas novas análises. A SNR define a razão entre a potência de um sinal e a potência do ruído sobreposto, comparando o nível de um sinal desejado com o nível do ruído de fundo [23]. A equação 4.1 configura a SNR, na qual expressa o cálculo para se obter o seu valor adimensional.

Na equação 4.1 o P_{tx} é a potência de transmissão, PL a atenuação de propagação

do sinal durante o percurso, W_{tot} a largura de banda total disponível no espectro de frequência, G_{rx} e G_{tx} são os ganhos das antenas receptora e transmissora respectivamente, sendo diretamente proporcionais ao *array factor* descrito na seção 2.1.1, ou seja, os ganhos do enlace dependem das direções dos feixes das matrizes de antenas. O N_0 engloba o ruído térmico que está associado ao movimento aleatório dos elétrons e é dependente da temperatura, e a figura de ruído que está associado a degradação do sinal pelo sua passagem em um circuito elétrico [23].

$$SNR = \frac{P_{tx} \cdot PL \cdot G_{rx} \cdot G_{tx}}{W_{tot} \cdot N_0} \quad (4.1)$$

Tendo então o conhecimento do valor SNR e a partir do que foi proposto, pode-se derivar uma nova métrica de desempenho. Que é dada por uma combinação do tempo de acesso inicial e a SNR obtida na formação do enlace. Inicialmente, considera-se que o enlace recém formado no acesso inicial terá uma capacidade de transmissão de dados ($Capacidade_{nominal}$) relacionada à sua SNR e à sua largura de banda B de acordo com a equação da capacidade do canal de Shannon (Equação 4.2) [23].

$$Capacidade_{nominal} = B \times \log_2(1 + SNR) \quad (4.2)$$

A partir da definição da $Capacidade_{nominal}$, e considerando o modelo proposto na Figura 4.1, pode-se definir a métrica de $Capacidade_{efetiva}$ conforme apresentado na Equação 4.3. Esta métrica de desempenho é dada pela $Capacidade_{nominal}$ ponderada pelo tempo disponível para a transmissão de dados no superquadro do modelo proposto. Assim, pode-se avaliar com uma única métrica de desempenho gerada pelo impacto do tempo gasto com acesso inicial e a qualidade do enlace formado pelo método.

$$Capacidade_{efetiva} = Capacidade_{nominal} \times \left(\frac{t_{Frame} - t_{IA}}{t_{Frame}} \right) \quad (4.3)$$

Para ficar mais sólido o comportamento das métricas de desempenho, vamos retratar um exemplo numérico com valores hipotéticos, para que possamos melhor analisar a influência de cada fator nas formulações. Portanto, apresentando um cenário onde o enlace milimétrico possui uma SNR média de 25dB, banda de 1GHz, com um tempo de *frame* (t_{Frame}) igual 5 segundos e de IA (t_{IA}) igual 1 segundo. Calculando assim a capacidade nominal e efetiva para os valores aparentados.

Para obter o valor de capacidade nominal será usado o SNR médio de 25dB e aplicado na equação 4.2, obtém-se como resultado uma taxa de 8,3Gb/s. Calculado a capacidade nominal, o próximo passo é determinar a capacidade efetiva. Assim, aplicando a equação 4.3, para um $t_{Frame} = 5s$ e $t_{IA} = 1s$, temos uma taxa

de 6.64 Gb/s, apresentando uma queda de 20% em relação a capacidade nominal. Quando elevamos o tempo de IA para 2 segundos afeta diretamente o resultado da capacidade efetiva, que decai para 4,98 Gb/s e uma queda de 40% da taxa em comparação com a capacidade nominal.

Portanto as resoluções que foram apresentadas mostram uma influência significativa do tempo de IA na taxa média efetiva do canal. Então, estas métricas de desempenho que foram propostas se revelam importantíssimas se queremos avaliar o compromisso do tempo gasto em IA junto com a escolha do feixe que proporciona a maior taxa de transmissão. Podemos então determinar a eficácia de nossas propostas baseados em informação de contexto, com as demais já existentes em outras literaturas.

4.3 Modelo de Mobilidade

Foi desenvolvido um modelo de mobilidade para um USR no interior da célula de ondas milimétricas. No qual visamos que no ambiente simulado o USR desloca-se seguindo a configuração de ruas retas e com esquinas. Esse tipo de mobilidade foi definida para conseguir maior proximidade com a realidade, em que um USR pertencente a rede celular caminha pelas ruas de uma cidade.

O entendimento de como foi elaborado o modelo de mobilidade e em que contexto ele se apresenta é um fator crucial para a análise do comportamento dos algoritmos de IA, pois, o modo que o USR se movimenta afeta diretamente na eficácia dos algoritmos.

No modelo de mobilidade desenvolvido, consideramos uma célula de ondas milimétricas que tem um raio de alcance máximo pré-determinado, que forma um círculo no entorno da EBmm. Do ponto de vista do USR, duas questões devem ser definidas: a primeira está relacionada a melhor forma de inserir o USR na célula da EBmm, para garantir um tempo mínimo de deslocamento no interior da célula e a segunda é como será realizada a movimentação do USR no interior dessa célula para que ela atenda os padrões que desejamos.

Iniciando com a inclusão do USR no cenário, precisamos decidir qual será o seu ponto de entrada inicial. Para isso sortearmos de maneira aleatória uma posição angular de 0 até 360 graus que define local de inserção do USR na borda da célula. Tendo feito a decisão inicial, agora o USR deve escolher uma direção a ser tomada, que é limitada por um ângulo θ . Para ilustrar como serão feitas essas escolhas de inserção do USR na célula, montamos duas cenas. A Cena A da Figura 4.2 mostra com detalhes os critérios que foram adotados e como eles afetam a rota inicial a ser traçada. Cena B demonstra um caso em que uma rota ruim foi escolhida, em virtude de parâmetros inadequados pré-estabelecidos.

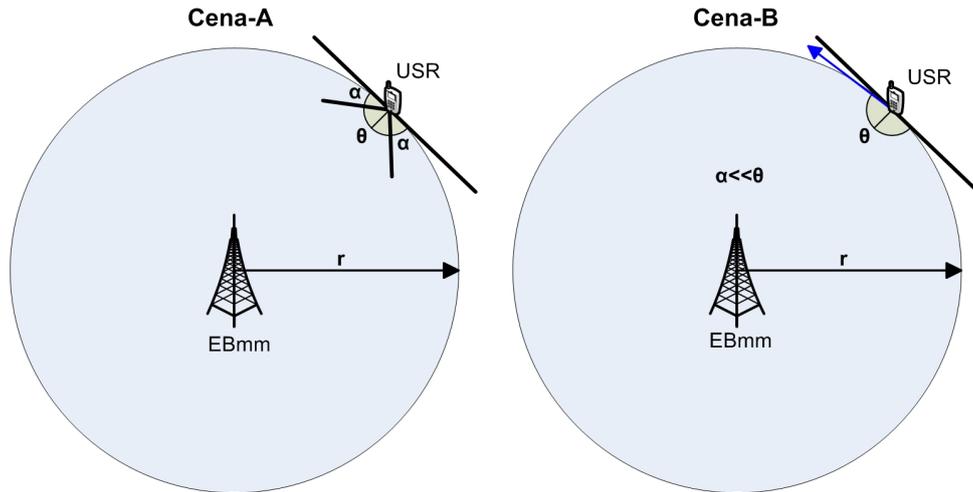


Figura 4.2: Introdução do usuário no cenário de mobilidade

Então quando analisamos a Cena A da Figura 4.2, pode-se notar que se estabelece uma reta tangente na borda da célula no ponto de entrada do USR, e a partir dessa reta traçada definiremos um ângulo θ . Esse ângulo limita os possíveis valores de direções angulares que podem ser tomadas pelo USR de forma aleatória, para que ele não escolha um sentido contrário ao perímetro da célula. Além disso um ângulo α está presente para centralizar o caminho do móvel, não deixando θ apontar próximo a reta tangente. Se somarmos os ângulos α e θ que foram descritos, obtemos a seguinte relação em que $2\alpha + \theta = 180^\circ$.

Considerando a Cena B da Figura 4.2, em que exibe um ângulo α muito menor que θ . Graça a essa proporcionalidade entre os ângulos de entrada existe a probabilidade do USR escolher um caminho cada vez mais próximo à reta tangente. Quanto maior for essa proximidade, mais reduzido é o percurso do USR dentro da célula, podendo causar situações indesejadas, onde a sua movimentação fica inexpressiva. A seta azul na Cena B representa essa situação indesejada, em que o móvel sai quase imediatamente do alcance da EBmm. Portanto, a proporcionalidade entre os ângulos α e θ são importantes, pois afetam diretamente o grau de mobilidade do cenário como foi demonstrado na Figura 4.2.

Feita a escolha de qual direção o USR deve seguir para iniciar sua movimentação, iremos então analisar seu comportamento no interior da célula, e para tal avaliação também foram montadas duas cenas como apresenta a Figura 4.3. Na qual a Cena A o primeiro trecho de movimentação e escolha de percurso do USR, a Cena que se segue exibe próximos os passos que USR pode tomar, dependendo da escolha feita da Cena anterior. Essas imagens buscam demonstrar como foi feito a mobilidade do USR buscando a configuração de ruas.

Para entender o que se passa na Cena A da Figura 4.3, vamos detalhar cada movimento do USR, assim como suas tomadas de decisões de qual rota deve seguir.

Logo, seguindo a direção escolhida inicialmente no processo de entrada na célula, o USR percorre uma distância y até p , e nesse ponto será tomada a decisão de qual caminho prosseguir a partir dali. Sendo que existem apenas três alternativas: seguir em frente, virar 90° para direita ou 90° para esquerda. Essas alternativas buscam simular a configuração dos cruzamentos das ruas, onde a escolha da direção é feita por sorteio probabilístico em que todas as alternativas de trajeto têm chances iguais.

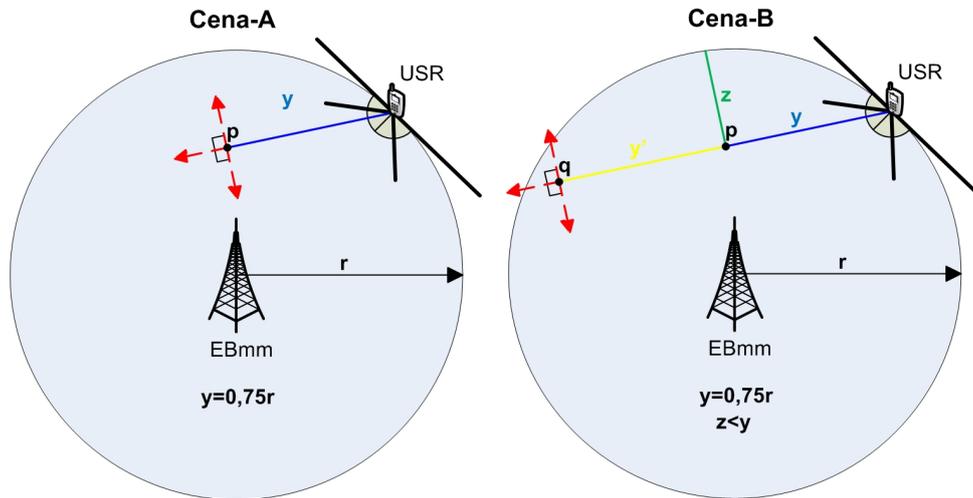


Figura 4.3: Movimentação do usuário no interior da célula

Na Cena B da Figura 4.3 é mostrado duas possibilidades de rotas a partir do ponto p . Uma dessas possibilidades é o USR percorrer novamente uma distância y' com o comprimento igual a de y . Então chegando ao ponto q , será refeito o processo escolha do percurso e seguirá com a próxima movimentação. A outra alternativa é o USR alcançar a borda da circunferência que antes dele atinja uma distância proporcional a y , caracterizando sua saída da célula sendo demonstrado pela rota z . Uma observação importante é que nos pontos em que o USR decide qual será sua rota, a distância que irá percorrer sempre vai ser igual a y , a menos que ele saia da alcance do raio da célula.

Em nosso modelo de mobilidade, a distância de referência y é proporcional ao raio da célula, no qual $y = 0.75r$. Essa proporção é crucial para que o USR circule no interior da circunferência sem ficar em ziguezague, fato que ocorre com o uso de uma proporção baixa. Se essa proporção for alta, o USR terá maior probabilidade de alcançar o limite da célula antes do ponto para escolha dos caminhos, acarretando uma quantidade superior de caminhos retos, não cumprindo com proposta do modelo elaborado.

O último parâmetro que temos de discutir seria sobre a entrada de novos USRs, mas a fim de facilitar e agilizar o desempenho do modelo, definimos que depois que primeiro USR sair da célula o próximo a entrar vai utilizar a mesma posição de saída do anterior, não precisando sortear novas posições de entrada. Porém a

diversidade de rotas nos cenários será parecida, não afetando na média os resultados das simulações.

4.4 Estratégias Para Refazer o Acesso Inicial

No contexto de mobilidade em que o USR se movimenta no interior da célula milimétrica, o desalinhamento entre os feixes é inevitável diminuindo a qualidade de conexão ou até mesmo provocando a sua falha. Então houve a necessidade de elaborar estratégias para que o IA fosse refeito, buscando o realinhamento entre os feixes recuperando a taxa de transmissão do enlace.

Duas estratégias foram concebidas para iniciar ou disparar um IA que visam manter a continuidade do enlace milimétrico junto ao cenário de mobilidade. Uma delas refaz o IA de maneira não inteligente, mas foi criada para termos um critério de comparabilidade com a outra técnica. Essa estratégia não inteligente inicia o IA de maneira periódica com intervalos fixos no tempo sem considerar se a qualidade do canal está boa ou ruim, sendo nomeada de Intervalo Fixo. O outro método já leva em consideração o comportamento que o canal está apresentando, na qual estabelece um limite percentual de queda da taxa para realizar novamente o procedimento do IA, sendo nomeada de Reativa. A seguir serão explicados e exemplificados o funcionamento dessas técnicas, assim como seu comportamento em relação a mudanças de velocidade nos ambientes propostos.

O Intervalo Fixo está representado pela Figura 4.4, na qual estabelece períodos do tempo gasto em IA e na transferência de dados, que estão sequenciados ao longo de uma linha temporal. A primeira parte a se interpretar dessa figura é que o intervalo entre o início do IA até o próximo são constantes, mostrando a sua periodicidade fixa no tempo no decorrer de todo o processo. Também fica visível em cada intervalo está sendo composto pelo tempo de IA e Dados, porém não está nítido que exista a possibilidade do aumento do tempo despendido para o IA dentro de um intervalo. Esse aumento pode decorrer de sucessivas falhas no procedimento de estabelecimento do enlace, reduzindo a proporção do que seria destinado para dados, mas a periodicidade permanece constante.

Fazendo agora a análise da capacidade do canal para Figura 4.4, vemos que a estratégia se comporta independente da qualidade do canal. Em um primeiro instante depois que é feito o IA, o alinhamento dos feixes proporcionaram uma alta capacidade e no decorrer do tempo houve uma leve queda na mesma, exibido pela curva em vermelho. No entanto a queda foi suave, sendo causada pelo distanciamento entre o USR e a EBmm e não o desalinhamento dos feixes. Logo, como não aconteceu nenhuma mudança na visada dos feixes um novo IA não seria necessário, mas mesmo assim ele ocorreu erroneamente.

Com esse IA prematuro efetuado, a nova capacidade mostra uma reação diferente da anterior com o passar de tempo, onde apresenta um decaimento acentuado, chegando ao ponto de se perder totalmente a sua taxa de transmissão. Neste caso acontece o oposto ao anterior, no qual o IA é realizado de maneira tardia. Pois tal declínio brusco da curva de capacidade, chegando a falha de conexão é causado pela queda de qualidade da combinação de feixes que estava sendo utilizada. O que indica que um IA teria que ser feito antecipadamente, ou seja, quando o canal ainda estava mostrando características da necessidade do realinhamento entre os feixes. Por isso, em ambos os casos uma falta de imperícia na execução da estratégia de Intervalo Fixo é revelada.

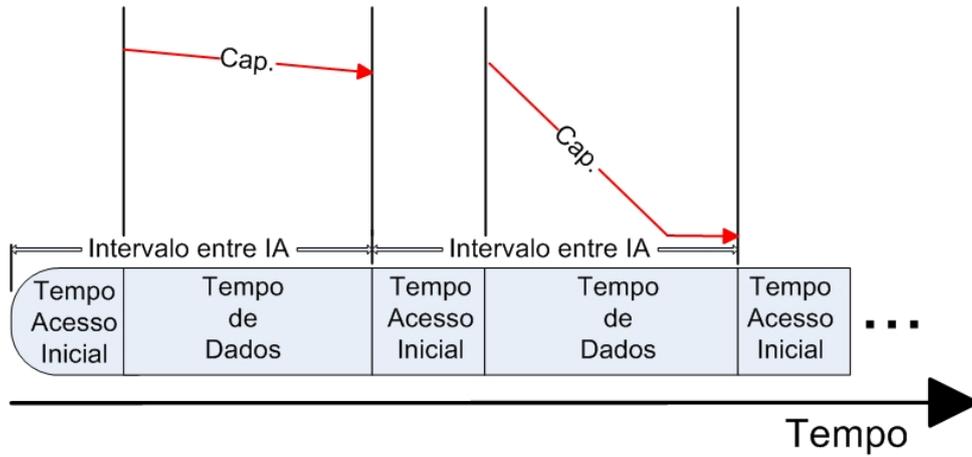


Figura 4.4: Estratégia Intervalo Fixo

A estratégia Reativa caracterizada pela Figura 4.5, determina um valor percentual de queda da capacidade em relação ao máximo obtido naquele enlace. Esse valor decaimento percentual se dá a partir de uma média móvel como mostra a equação 4.4. Onde CAP_{movel} representa o valor dessa média móvel, visto que os resultados de capacidades passadas representam α da grandeza no presente, enquanto as atuais (CAP_{inst}) tem peso β . A medida que aumentamos o α e reduzimos o β , faz com que a estratégia fique menos sensível as rápidas flutuações do canal, causada pelos desvanecimentos em pequena e larga escala.

$$CAP_{movel} = (CAP_{movel} \times \alpha) + (CAP_{inst} \times \beta) \quad (4.4)$$

A inequação 4.5 especifica quanto um novo IA será executado, através comparabilidade da CAP_{movel} com a capacidade máxima (CAP_{max}) ponderada pelo fator de decaimento $DEC\%$. Ou seja, se CAP_{movel} for maior ou igual que a CAP_{max} decrescida pela multiplicação de $1 - DEC\%$, o IA não irá ser executado e caso contrário será.

$$CAP_{movel} \geq (CAP_{max} \times (1 - DEC\%)) \quad (4.5)$$

Com base nas formulações da estratégia Reativa, vamos analisar a Figura 4.5. Portanto, a primeira observação é referente a periodicidade dessa estratégia, na qual o intervalo de entre os IAs não é constante devido ao seu desvencilhamento temporal, tendo agora como sua referência a qualidade do canal em dados. Os pontilhados em azul representam a capacidade máxima adquirida pelo USR e o limiar de decaimento do canal para começar um IA. Enquanto a curva vermelho reproduz a média móvel da capacidade. Então, quando comparamos os dois intervalos de Dados, observamos que a média móvel decrescendo mais suavemente fazendo com que o Reativo responda mais lentamente. Mas, quando o ambiente ficou mais hostil sua reação foi mais veloz, recuperando com maior eficácia o nível do canal. Por essas razões, essa estratégia tende a melhorar qualidade do enlace mesmo em locais onde a variação do sinal é muito acentuada.

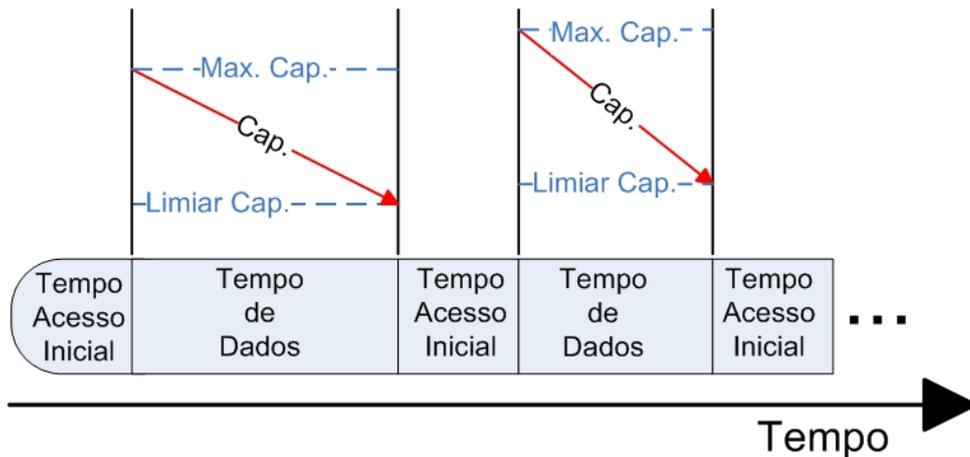


Figura 4.5: Estratégia Reativa

Para melhor configurar o comportamento das duas estratégias que foram adotadas, amostras de ambientes simulados com diferentes dinamicidades foram impressas. Onde USR pode se apresentar em uma região que a fluatibilidade do canal é mais estática ou em um espaço de alta intermitência. Tanto o Intervalo Fixo quanto o Reativo estão presentes em ambas as situações, como mostra as Figuras 4.6 e 4.7 respectivamente.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 são apresentadas três componentes, cada uma com sua própria atribuição. Mas, se juntamos as suas representatividades podemos explicar a desenvoltura das estratégia no intervalo de tempo disposto. No entanto, vamos descrevê-las separadamente para depois então relacioná-las entre si.

Assim vamos começar apresentando o significados dos barramentos na cor roxa, que apontam os instantes de tempo que são feitos os IAs e entre um barramento

e outro está disposto o tempo que o USR esteve em Dados. A curva vermelha é a capacidade máxima do enlace no decorrer de um período de dados, na qual pode aumentar depois de feita a conexão devido a variabilidade desse canal. A curva azul é a capacidade suavidade pela média móvel, que o USR apresenta depois de realização de um IA no instante de tempo referido. Por isso, se atrelar o barramentos roxos com a curva azul, conseguimos contemplar como irá responder Intervalo Fixo e adicionando a curva vermelha em questão podemos evidenciar o Reativo.

Então de acordo com a Figura 4.6a, onde o USR se move a uma baixa velocidade proporcionando uma menor flutuabilidade do canal. Isso é perceptível pela baixa variação da taxa no decorrer do tempo referido a dados. Com esse exemplo, expõe-se a primeira fragilidade do Intervalo Fixo, no qual já havíamos comentado em uma alusão hipotética. Porém feita essa simulação vemos os procedimentos de IA ocorrendo de forma precipitada, em que o enlace está apresentado uma taxa parecida de quando foi estabelecido e mesmo ainda um novo IA é realizado. Mostrando que o tempo que está sendo gasto fazendo IA poderia estar sendo empregado na transmissão da informação referida.

A Figura 4.6b revela o oposto do que aconteceu anteriormente. Pois nesse momento o USR se movimenta a uma velocidade superior, causando uma variação do canal mais acentuada. Este comportamento é constatado devido a alta oscilação da taxa durante o tempo de dados, evidenciando o segundo problema causado no uso dessa estratégia. Onde a simulação mostrou a piora do canal em diversos momentos do período de tempo assinalado, mas o protocolo mostrou indiferença à qualidade do enlace o que já era esperado. Na média, esse desempenho causaria uma queda na taxa que de transmissão, ou seja, uma menor qualidade de serviço.

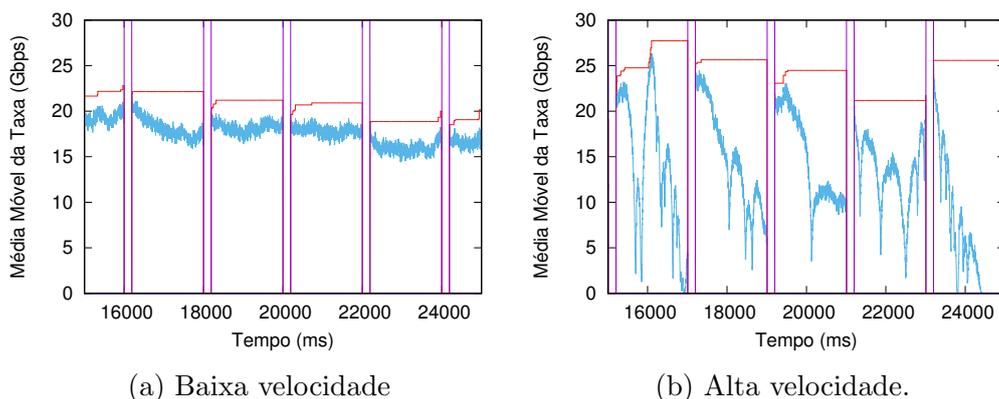


Figura 4.6: Amostra temporal de um cenário aplicando o Intervalo Fixo.

Quando mudamos a estratégia para o Reativo, é notório o comportamento completamente diferente em relação ao Intervalo Fixo. A Figura 4.7a demonstra um grande período de tempo sem a realização do IA, em decorrência da baixa variação da taxa que não atingiu seu limiar de decaimento junta a capacidade máxima do

enlace. Se contrapondo ao Intervalo Fixo que realizava IA desnecessariamente em baixa velocidade. Revelando a maior eficiência do Reativo em ambientes com pouca mobilidade, pois o tempo que era gasto fazendo IA sem necessidade pode agora ser despendido para dados e mantendo a qualidade do enlace.

Na Figura 4.7b, que estabelece o Reativo em um cenário em que o USR se movimenta com maior velocidade, provocando a maior dinamicidade do canal. Em consequência dessa alta variação do canal o Reativo se mostrou sensível a esse tipo de ambiente. Uma vez que o decaimento da taxa é mais rápido em vista a taxa máxima naquele período, o número de IAs que o Reativo irá acionar será mais frequente. Logo é perceptível a busca do Reativo em melhorar o enlace, mesmo que tenha que fazer IAs com intervalos de tempo muitos curtos consumindo um maior tempo que seria para dados. Mesmo assim é preferível executar maior número de IAs e manter uma taxa mais elevada, contrariando o que é praticado pelo Intervalo Fixo, no qual a taxa chega em níveis muito baixos.

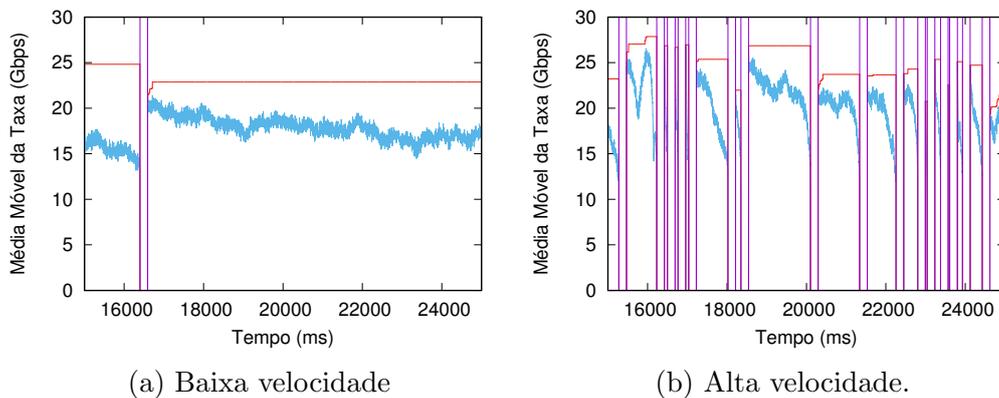


Figura 4.7: Amostra temporal de um cenário aplicando o Reativo.

Portanto se compararmos as duas estratégias para refazer IA, o Reativo se revela com uma alta probabilidade de ter um desempenho superior ao de Intervalo Fixo. Mas como foi falado o Intervalo Fixo foi adotado para critério de comparabilidade, para se ter uma relação de quanto melhor o Reativo seria. Logo, tais reações temporais e espaciais, apresentaram um padrão com o uso das estratégias em diferentes velocidades do USR. Esses padrões serão verificados através de exemplos em cenários de baixa e alta velocidade para ambas estratégias.

Tendo em vista que o USR pode assumir diversas velocidades impactando o comportamento espacial e temporal das estratégias adotadas. Foi elaborado cenários para exemplificar o funcionamento dessas estratégias. Iremos usar as Figuras 4.8 e 4.9 como base para podermos explicar as reações esperadas. Nessas figuras apresentam-se situações onde USR se movimenta com velocidades diferentes ao longo de um mesmo percurso. O intervalo entre IAs com já sabemos é sempre composto por um tempo de IA e Dados e esse comportamento é ortogonal a qualquer algoritmo

de IA.

As Figuras 4.8 e 4.9 foram divididas em quatro situações, duas delas vão representar a estratégia que refaz o IA em intervalos fixos, sendo que uma operando com velocidade baixa e outra alta. Os outros dois cenários seguirão o mesmo esquema dos anteriores, porém a estratégia que vai ser empregada será o que refaz o IA de maneira reativa. Em todos os ambientes a área da célula foi subdividida, e cada setor delimita a cobertura de cada feixe da EBmm. Durante o percurso feito pelo USR existem marcações, que mostram os locais onde o IA é iniciado. O espaçamento entre as marcações representa a distância percorrida pelo móvel de um IA até o outro.

Quando analisamos a Figura 4.8, no qual o Intervalo Fixo é executado, a primeira observada é a independência do processo de IA com a condição do canal. O IA só será feito ao término do último *superframe* com tamanho pré-estabelecido, não levando em consideração se a taxa de transmissão está boa ou não. Se esse *superframe* for composto de 1000 *slots* e cada *slot* tem duração de 1ms, o IA só acontecerá novamente depois de 1000ms. Logo fica claro que o atrelo temporal do Intervalo Fixo afetará seu comportamento.

Se considerarmos o USR se movendo a uma velocidade constante durante todo percurso, o espaçamento entre IA's será o mesmo. A Figura 4.8 mostra claramente esse fenômeno, onde o espaçamento entre as marcações que apontam os locais de realização dos IA's. Porém quando comparamos as duas velocidades, a distância entre IA's cresce quanto maior for essa velocidade. Isso se deve a um maior deslocamento em um mesmo intervalo de tempo.

Para confirmar o que foi dito sobre o Intervalo Fixo, iremos usar o raciocínio físico com base na Figura 4.8. Em que a formulação $d = v.t$ demonstra o deslocamento do USR no tempo, onde d representa a distância entre IA's, v a sua velocidade e t o tempo de duração do *superframe*. Se v aumentar para uma velocidade v' e o tempo de *superframe* é constante com $t = t'$, o intervalo de IA's irá crescer junto, tendo o valor de d' . Como os trajetos são iguais, quem tem maior velocidade realizará uma menor quantidade de IA's durante o percurso.

Agora iremos detalhar a Figura 4.9, na qual a estratégia vigente é o Reativo. Nesse caso a execução do IA fica atrelado a condição do canal, ou seja, quando a taxa reduzir até um certo valor, um novo IA será feito. Então, podemos dizer que as distâncias entre os pontos em que o USR executa o IA são relativas ou os *superframes* serão variáveis. Como o ato de fazer o IA é atrelado ao decaimento da taxa, este ocorre a qualquer instante do trajeto devido a fatores espaciais que causam uma alta variação do SNR.

Um dos fatores que dá origem a um novo IA usando o protocolo reativo, é o desalinhamento entre os feixes que provoca a redução do ganho das antenas, diminuindo

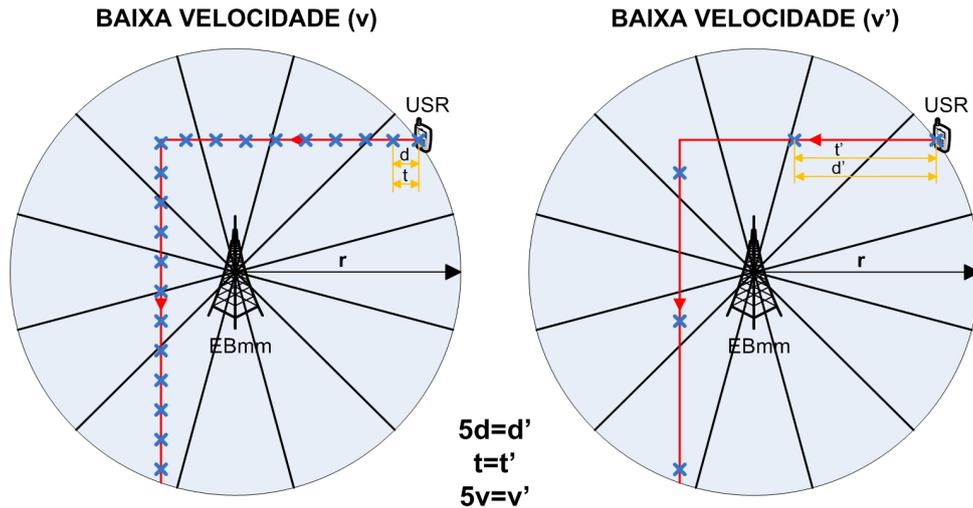


Figura 4.8: Características do protocolo de intervalo fixo no cenário de mobilidade

sua SNR. Outro fator que pode iniciar um IA é afastamento do USR em relação a EBmm, aumentando a perda no espaço livre, reduzindo a SNR. A Figura 4.9 mostra com clareza as condições para o funcionamento do Reativo, através de marcações que representam os locais que é feito o IA. Essas marcações aparecem no desalinhamento entre os feixes ou no distanciamento entre o USR e a EBmm, refletindo os locais de redução da SNR durante a rota feita pelo USR.

Relacionando as situações representadas da Figura 4.9, em que o USR faz o mesmo trajeto, mas com velocidades diferentes e constantes. As posições onde ocorre o IA são parecidas, pois o fato de começar um IA não tem mais um vínculo temporal e sim espacial (condição do canal). Fica ainda mais evidente se nos atentarmos que o tempo entre IAs são discordantes, mesmo com os pontos onde são executados sendo próximos. Isso decorre das distâncias entre os pontos IAs serem parecidas ainda que com velocidades diferentes, logo o USR com maior velocidade percorre o trajeto de um ponto até o outro em menor intervalo de tempo.

As pequenas variações espaciais dos locais onde o IA ocorre, é causada pelos desvanecimentos em pequena e larga escala. Os desvanecimentos geram uma flutuação do sinal, excursionando o ponto a uma posição próxima a do outro cenário. Para ilustrar o funcionamento do Reativo, vamos comparar os cenários de alta e baixa velocidade da Figura 4.9, em que d e d' correspondem a distância entre os IAs e seus valores serão semelhantes. Dividindo essas distâncias pelas velocidades do USR v e v' , o tempo de hiato entre IAs serão diferentes com $t > t'$. Então podemos concluir que, os números de IAs e seus locais onde são efetuados no trajeto serão iguais ou bem próximos, mas com periodicidades diferentes.

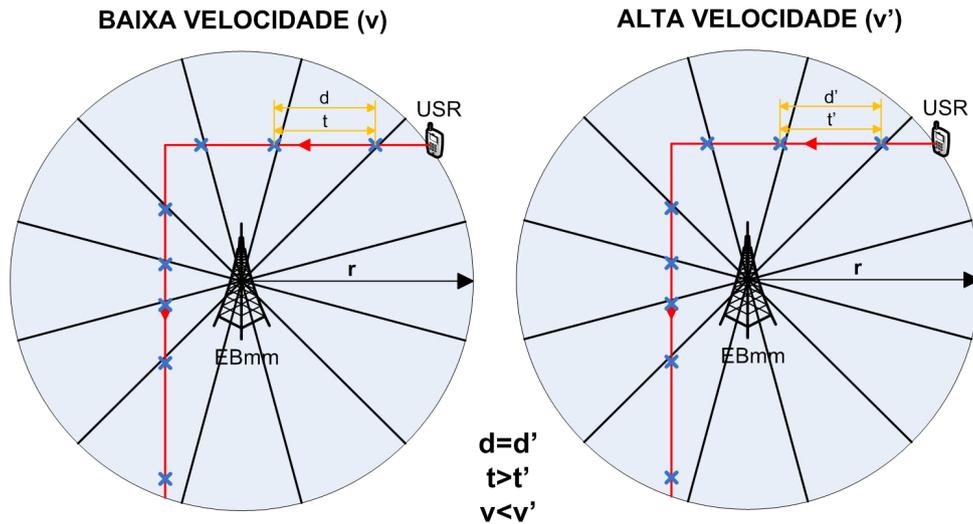


Figura 4.9: Características do protocolo reativo no cenário de mobilidade

4.5 Modelo de Propagação e Desvanecimento

O modelo de perda de percurso adotado foi retirado do artigo [24], que avaliou o comportamento das ondas milimétricas em ambientes urbanos, realizando medições na faixa de frequência de 28 e 73 GHz na cidade de Nova York. No entanto o modelo que opera em 28 GHz foi tomado como referência para implementação do canal. Pois devido a sua frequência relativamente baixa em comparação a de 73 GHz, seu alcance e estabilidade do canal seriam maiores, proporcionando um cenário mais favorável às redes celulares.

Para medir as características do canal nessas frequências, o artigo emulou posicionando dos transmissores nas alturas de 7 e 17 metros e em seguida foram realizadas medições na qual o receptor se localizava no nível da rua em até 500 metros do transmissor. Como as transmissões foram feitas de locais mais elevados em relação à rua, logo o transmissor representou a estação base milimétrica e o receptor os usuários.

Através da análise estatística dos resultados nesses experimentos, o artigo propôs um modelo estatístico de perda de percurso em larga escala (*path loss*), o qual é capaz de determinar de acordo com a distância entre transmissor e receptor as probabilidades da comunicação acontecer em visada direta (LOS - *Line of Sight*), sem visada direta (NLOS - *Non Line of Sight*) ou da comunicação ser inviável (*outage*). Para cada tipo de comunicação, LOS ou NLOS, existe uma parametrização da expressão do cálculo da perda de percurso. Quando ocorre um *outage*, determinado pelo modelo, a perda no percurso é considerada infinita. Além disso, também existem outros parâmetros na fórmula do cálculo da perda de percurso que são determinados pela frequência de transmissão utilizadas.

A equação 4.6 representa a modelagem estatística da perda de percurso. Em que d determina a distância relativa entre o transmissor e receptor, α e β são constantes

obtidas através da análise amostral dos resultados para uma dada frequência, afim de parametrizar o valores medidos em até 200 metros. ξ determina o desvanecimento em larga escala, que será explicado com mais detalhes posteriormente, que é exibido por uma distribuição na normal com média zero e variância σ^2 . O valor da variância depende de qual faixa de espectro estamos trabalhando.

$$PL(d)[\text{dB}] = \alpha + \beta 10 \log_{10}(d) + \xi, \quad \xi \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (4.6)$$

Nas atuais metodologias de avaliação do 3GPP geralmente usam um modelo estatístico em que cada enlace está no estado de LOS ou NLOS, sendo a probabilidade de estar nesses estados um função da distância. Nesses modelos a interrupção ocorre implicitamente quando atenuação provocada pela a perda na propagação do sinal não atinge um patamar mínimo de detecção. Como já foi dito, no modelo que adotamos é proposto um novo estado de falha direta na tentativa de estabelecer um enlace de comunicação. Esse novo estado de P_{out} fornece uma melhor análise das possibilidades de interrupção inerentes aos canais de ondas milimétricas [24].

Para descrever o modelo, três funções representam a probabilidade do estado do canal milimétrico e são descritas na seguinte forma:

$$p_{out}(d) = \max(0, 1 - e^{-a_{out}d + b_{out}}) \quad (4.7a)$$

$$p_{los}(d) = (1 - p_{out}(d)) e^{-a_{los}d} \quad (4.7b)$$

$$p_{nlos}(d) = 1 - p_{out}(d) - p_{LOS}(d) \quad (4.7c)$$

Onde as probabilidades das funções 4.7a, 4.7b e 4.7c são determinadas pela distância d , referente ao espaçamento em o USR e a EBmm. Sendo P_{out} o valor máximo característico de sua função e P_{los} se apresenta em função de P_{out} , assim como P_{nlos} está em função de P_{out} e P_{los} . Logo podemos perceber a interligação estatística entre essas funções variando de acordo com a distância em que se tenta iniciar uma conexão.

Para a melhor compreensão dessas função e seus comportamentos mútuos e interligados, plotamos o gráfico 4.10 revelando a evolução da probabilidade do estado do canal até uma distância de 300 metros entre TX e RX. No qual em curtas distâncias, a possibilidade de se ter uma linha de visada direta é alta, mas conforme o USR se distancia essa possibilidade vai decaindo. O oposto ocorre com a probabilidade de não ter uma linha de visada direta que vai aumentando junto com a distância. Mas a partir de 150 metros ambas alternativas de visada decrescem bruscamente, isso porque começa a se apresentar a probabilidade de falha ao tentar se criar um enlace. Quando analisamos o final do gráfico é notória a impossibilidade de se estabelecer uma conexão depois de 300 metros e até mesmo próximo de 200 metros essa

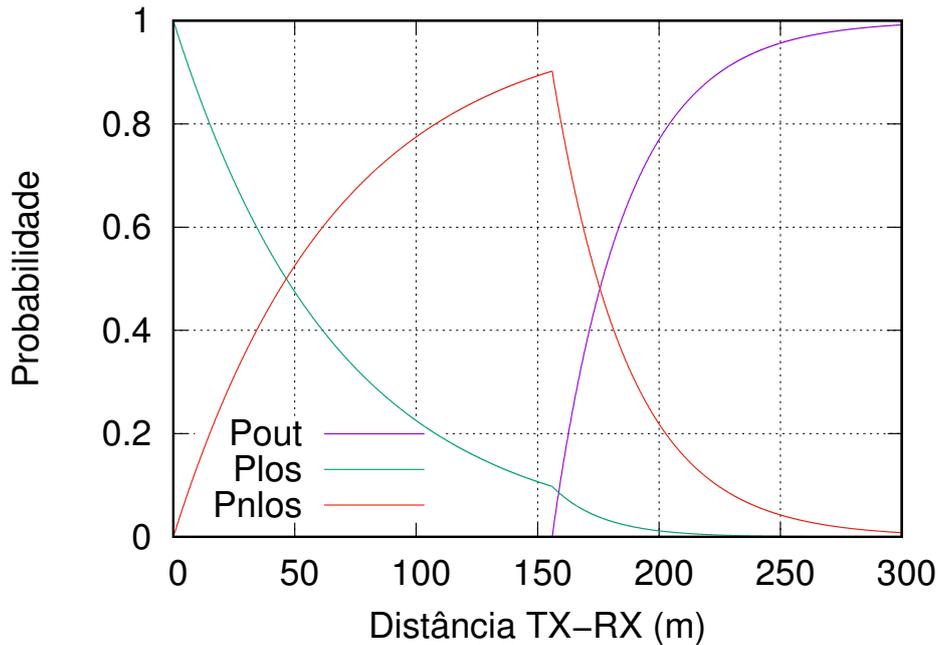


Figura 4.10: Representação das funções de probabilidade do estado do canal

probabilidade de falha chega a quase 80%.

Com o modelo de perda de percurso entendido, vamos partir então para os desvanecimentos que junto compõem nosso modelo, mas primeiramente se faz necessário entender seus conceitos. Nos ambientes de comunicação sem fio, é comum o sinal propagado por um transmissor seguir diferentes caminhos, devido a fenômenos como a reflexão e difração. No receptor esse sinal chega em instantes de tempo diferentes e com diversas intensidades (amplitude do sinal). Como resultado, o sinal que entra no receptor é composto de vários componentes que o distorcem. A combinação desses sinais no receptor podem resultar de forma construtiva aumentando a potência recebida, ou destrutiva atenuando o mesmo. A combinação construtiva ou destrutiva dos sinais é determinada pela seu atraso em fase no receptor[23].

Pode-se dizer que o resultado final da combinação de todos os sinais recebidos se torna drasticamente diferente do sinal original enviado pelo transmissor. Na maioria dos casos, a qualidade do sinal combinado no receptor fica deteriorado em relação ao sinal da fonte original. Esse efeito de deterioração do sinal é causada pela propagação dos múltiplos caminhos, sendo chamado de desvanecimento que pode ser em pequena ou larga escala.

O desvanecimento em pequena escala (*fast fading*) é um fenômeno importante para a propagação de sinais em ondas milimétricas, pois ela proporciona a variabilidade rápida do canal. Esse desvanecimento é causado não só pela mobilidade do receptor, mas também pela mobilidade do cenário e os efeitos da propagação por múltiplos percursos que varia em pequenos intervalos de tempo, resultando em

interferências construtivas e destrutivas do sinal. Já o desvanecimento em larga escala (*shadowing*) é provocado pela mudança da topografia do ambiente em relação ao USR, provocando uma variação do sinal, porém, de forma mais lenta. Podemos expressar esse tipo de desvanecimento junto a mobilidade do USR, pois caso o ele não tenha mobilidade, a topologia se manterá fixa em relação ao USR, tendo sua variação no tempo nula [23].

A fim de ilustrar o comportamento de nosso modelo de canal preparamos a Figura 4.11, na qual seus eixos configuram o desenvolvimento da potência do sinal, referente ao aumento da distância entre o receptor e transmissor. Onde no gráfico a perda no espaço livre diminui gradualmente, mas sem ocorrer flutuações no sinal. No gráfico de desvanecimento em larga escala, você percebe uma flutuação na potência do sinal, mas em uma menor escala em comparação ao desvanecimento pequena escala que acontece de forma quase instantânea.

Quando você observa o sinal real que chega no receptor, como no gráfico à esquerda, você não consegue mais distinguir cada um desses fatores separadamente. O que se vê no receptor é o somatório dos três fatores, provocando um sinal com distorções em comparação ao original.

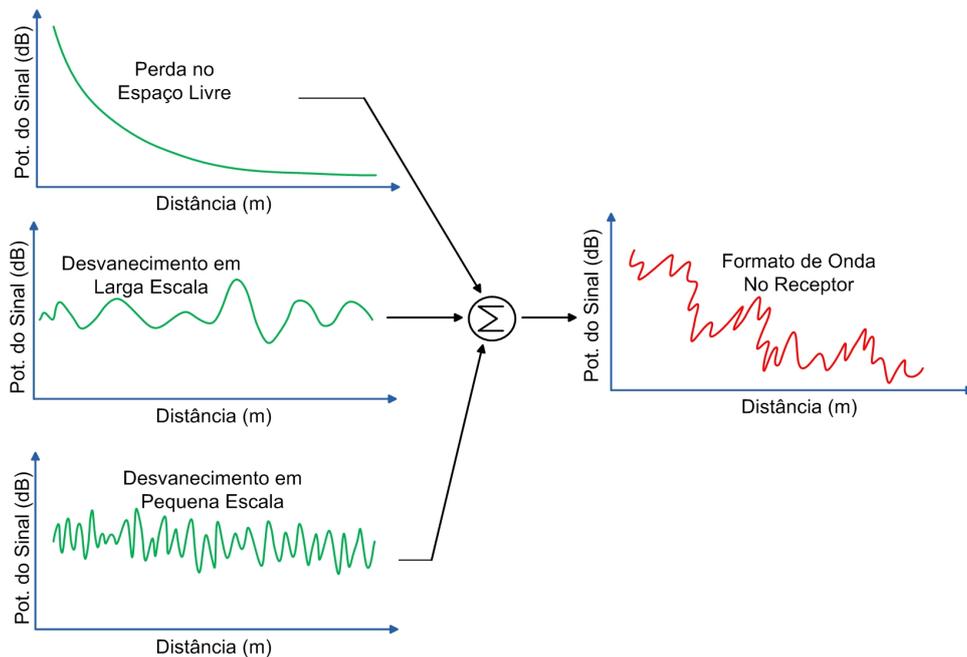


Figura 4.11: Representação das funções de probabilidade do estado do canal

Então para representar o desvanecimento em pequena escala ao longo do tempo nos embasamos no livro [25], que implementou-se o modelo de *Clarke*. Inspirado na distribuição de *Rayleigh*, esse método propõe um somatório de senoides defasados em um mesmo intervalo de tempo, representando os múltiplos caminhos que o sinal pode tomar até sua chegada no receptor. Tendo em sua saída um determinado ganho ou atenuação dependendo do espaço amostral pré-determinado. A parte do mo-

delo referente ao desvanecimento em larga escala foi fundamentado em [26], onde temos uma média móvel variando de acordo com distância percorrida pelo USR em um intervalo de tempo, e caso a distância não mude durante esse tempo seu valor permanece constante.

Capítulo 5

Avaliação de Desempenho

Para avaliar o desempenho dos mecanismos de acesso inicial propostos, foi implementado um simulador próprio em linguagem C que seguem os modelos apresentados na Seção 4. O simulador emula um cenário em duas dimensões, podendo conter uma EBmm e um USR em uma topologia estática sem mobilidade dos equipamentos de transmissão e recepção ou dinâmica em que USR pode assumir diversas velocidades.

No cenário estático, cada rodada de simulação representa um superquadro contendo as duas fases descritas no modelo: acesso inicial e transmissão de dados. A duração do superquadro (t_{Frame}) é um dos parâmetros de entrada do simulador, o que permite avaliar qual o impacto da demanda por operações frequentes de acesso inicial para o reestabelecimento do enlace. Quando passamos para o dinâmico, cada rodada de simulação pode conter diversos superquadros, pois agora simulamos um intervalo de tempo onde o USR percorre um trajeto de acordo com o modelo de mobilidade, e nesse percurso pode acontecer mais de um t_{Frame} .

A implementação faz algumas considerações a respeito do funcionamento da redes de ondas milimétricas semelhantes àquelas feitas em [10], o qual propõe um arcabouço de funcionamento na forma de uma extensão do utilizado em redes LTE. Desse trabalho, consideramos o fato de que o BF acontece através do envio de sondas (PSSs - *Primary Synchronization Signals*) por parte da EBmm, que são pacotes pequenos enviados em intervalos de tempo periódicos, t_{per} . A SNR dos pacotes recebidos é calculada pelo simulador, permitindo que os diferentes algoritmos possam comparar o desempenho das diversas combinações de feixes para a escolha daquele que fornece a melhor SNR.

Vale destacar que, para o completo funcionamento dos algoritmos de BF, deve-se considerar que existe uma resposta do USR para EBmm informando em qual combinação de feixe foi a escolhida durante o BF. Como consideramos a reciprocidade total do canal uma varredura inversa do USR para EBmm não é necessária. Nesta implementação assumiu-se, conforme em [16], que existe uma macrocélula subjacente às redes de ondas milimétricas que serve como canal de comunicação fora da

banda por onde o USR notifica a EBmm da escolha realizada. Como escolha de implementação, assumiu-se que a quantidade de informação a ser enviada é pequena e o tempo de envio dessa resposta no canal fora da banda é desprezível.

Além destas funcionalidades básicas para a avaliação de desempenho do processo de acesso inicial em redes milimétricas, também foram implementados no simulador diferentes algoritmos de BF. Foi implementada a busca exaustiva (identificado como **Exaustivo** nos gráficos), conforme descrito na Seção 2. Implementou-se também o uso simples da informação da geolocalização (**GPS**) e a sua variante que verifica, além do feixe indicado pela geolocalização, os feixes adjacentes (**GPS Refinado**). Em ambos os casos, conforme descrito em [8] e na Seção 2. Também foram implementados os dois novos algoritmos propostos na Seção 3, identificados como **Proposta Iterativo** e **Proposta Refinado** nos gráficos. E por fim na Seção 3, uma técnica nomeada nos gráficos como **FAST IA**, que realiza um teste entre os feixes, buscando melhorar a capacidade sem a necessidade de um novo IA.

5.1 Ambiente de simulação

Para os resultados de simulação estática, que serão apresentados a seguir, foram realizadas simulações de 2 mil superquadros para cada distância entre EBmm e USR, variando apenas a posição angular de 0 a 360 graus. Em cada cenário, o USR é posicionado em uma direção aleatória da EBmm, mas mantendo a distância desejada. As distâncias entre EBmm e USR foram variadas de 4 até 200 metros. No dinâmico foram feitas apenas 50 rodadas para cada velocidade que USR pode assumir, que vai de 1 m/s até 9 m/s. Cada rodada tem a duração ponderada pela velocidade do USR, em que a 1 m/s a duração é de 20 minutos e a 9 m/s é de aproximadamente 2.22 minutos, fazendo que o USR sempre percorra a mesma distância. Lembrando que o USR se locomove de acordo com o modelo de mobilidade no interior das células milimétricas que têm o alcance de 25 e 100 metros.

Os resultados apresentados em qualquer ambiente de simulação são as médias das métricas avaliadas com barras de erro correspondentes aos intervalos de confiança calculados com um nível de confiança de 95%.

Um dos parâmetros variados nas simulações, onde o USR tem velocidade igual a zero, foi o tamanho do superquadro (t_{Frame}). Conforme mencionado anteriormente, o tamanho do superquadro também pode ser interpretado como o intervalo entre operações de acesso inicial. Cenários com t_{Frame} pequenos visam representar cenários onde há maior intermitência do enlace causada pela alta variação do canal. Enquanto cenários com t_{Frame} grandes visam representar cenários onde os enlaces estabelecidos pelo acesso inicial são mais estáveis. Serão apresentados resultados de simulação com valores de t_{Frame} iguais a 500 e 1000 ms.

Nos cenários de mobilidade, são executados os mecanismos propostos na Seção 4.4, que são usados para iniciar ou refazer um IA. O Intervalo Fixo dispõe de uma periodicidade de 500, 1000 e 2000 ms para refazer seu IA, na qual cada período representa um t_{Frame} . Enquanto que, o Refinado começa um novo IA cada vez de que a média móvel da taxa decai a 30, 50 e 70 % de sua taxa máxima naquele período de dados, tornando seus t_{Frame} variáveis de acordo como o cenário que se apresenta.

Em todos os cenários de simulação, a EBmm e o USR utilizam matrizes de antenas 12x12 e 4x4, respectivamente. Sendo que na fase inicial do algoritmo **Proposta Iterativo** a EBmm utiliza um subconjunto 3x3 da matriz 12x12, para aumentar a largura do feixe. Em todos os casos, a separação entre os elementos irradiantes na matriz de antenas é de 1/4 do comprimento de onda ($\lambda/4$).

Para o cálculo da perda de percurso, utiliza-se os parâmetros definidos em [24] para transmissões em 28 GHz. A largura de banda é de 1 GHz, a potência de transmissão é de 30 dBm, ruído térmico de -174 dBm/Hz, figura de ruído 5dB, o limiar de SNR para a detecção do PSS é de -5 dB, o limiar de SNR para a recepção na fase de dados para que a informação não contenha erros é de 10 dB. Além disso, considera-se que o intervalo entre a transmissão das sondas PSS (t_{per}) para o teste de cada combinação de feixe é de 1 ms, conforme considerado por [10]. Sendo que no período de dados, as medições de capacidade do canal também se deram em intervalos de 1 ms. Logo, se juntarmos o intervalo de tempo dos PSS e da amostragem de dados, configuramos toda nossa simulação através de *slots* de 1ms.

Para os algoritmos que utilizam geolocalização, considerou-se um erro de geolocalização dado por uma distribuição normal com média μ e variância σ , conforme a análise estatística de dados experimentais apresentados em [18]. Foram escolhidos dois casos extremos de parametrização para o erro de acordo com os resultados experimentais em [18]: erro baixo, onde $\mu = 5m$ e $\sigma = 15m$, e erro alto, onde $\mu = 10m$ e $\sigma = 60m$. Os efeitos da adoção desses erros foram apresentados na Seção 3.1.

Para sumarizar os parâmetros gerais de simulação que foram comentados, preparamos a Tabela 5.1 que os contém. Nela, apresentamos esses parâmetros correlacionando com os seus valores no ambiente de simulação.

Nos gráficos apresentados a seguir serão mostradas três métricas de desempenho. A primeira é a C_{ef} , conforme explicado na Seção 4.2. A segunda é a duração do acesso inicial, que é dado pelo tempo médio gasto com o procedimento de acesso inicial por cada algoritmo. E por fim, temos a capacidade nominal que é o valor absoluto de taxa de transmissão que cada algoritmo obtém. No entanto quando analisarmos o cenário estático o padrão apresentado de estado do canal será o estatístico, com probabilidades de LOS, NLOS ou falha de conexão, e no com mobilidade os cenários de LOS e NLOS foram avaliados separadamente.

Tabela 5.1: Parâmetros de simulação

Parâmetros	Unidades	Parâmetros	Unidades
Freq. de Milimétrica	28 GHz	Duração PSS	1 ms
Pot. de Transmissão	30 dBm	Amostragem Dados	1 ms
Largura de Banda	1 GHz	Limiar SNR PSS	-5 dB
Figura de Ruído	5 dB	Limiar SNR Dados	10 dB
Ruído Térmico	-174 dBm/Hz	Dist. dos Elementos	$\lambda/4$
Matriz Antenas TX	12x12, 3x3	Erro de Geo. Baixo	$\mu = 5, \sigma = 15$ m
Matriz Antenas RX	4x4	Erro de Geo. Alto	$\mu = 10, \sigma = 60$ m

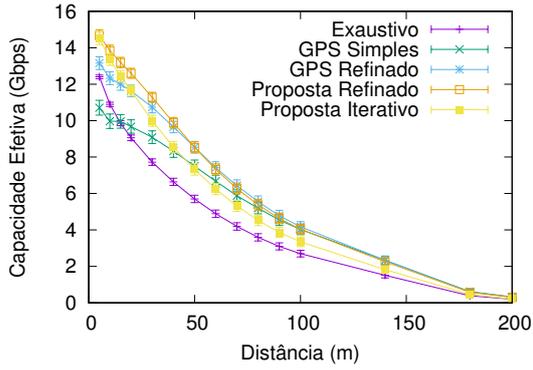
5.2 Resultados Sem Mobilidade

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos cenários onde a iteração entre a EBmm e o USR é estática em cada t_{Frame} simulado. No primeiro conjunto de gráficos das Figuras 5.1 e 5.2, tem-se os resultados para a métrica C_{ef} dos diferentes algoritmos em função da distância entre USR e EBmm em diferentes configurações de t_{Frame} e erro de geolocalização. Com isso, tentou-se demonstrar a evolução de todos os algoritmos de IA conforme a distância aumenta entre a EBmm e o USR, podendo conter um erro de geolocalização baixo ou alto.

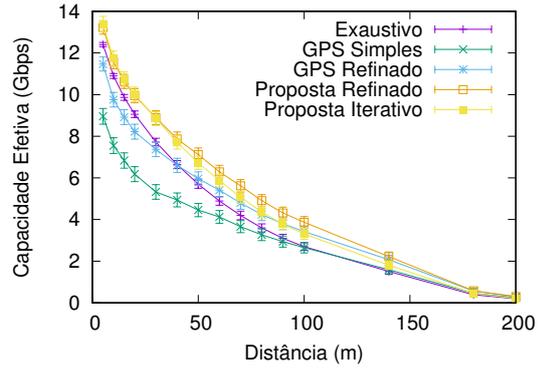
Inicialmente, nos gráficos das Figuras 5.1 e 5.2, podemos observar o impacto causado pelo erro de geolocalização no desempenho dos algoritmos. Porém a busca exaustiva não utiliza informação de geolocalização em sua execução, sendo assim invariante com o erro. Apesar disso, percebe-se que todos os demais algoritmos que usam informação de contexto têm o desempenho reduzido com o aumento do erro. Isso se justifica pois com estes algoritmos a EBmm tenta encontrar a melhor combinação de feixes utilizando apenas a geolocalização com erro informada ou fazendo algum tipo de varredura limitada à direção indicada pela geolocalização. Quando o erro é alto, esses algoritmos têm a tendência a tomar decisões menos eficientes, escolhendo um par de feixes que proporciona uma menor capacidade.

Ainda a respeito do impacto do erro de geolocalização, podemos ver que os dois algoritmos propostos neste trabalho têm o desempenho menos prejudicado pelo aumento do erro do que as propostas já existentes na literatura. Isso ocorre porque as propostas são capazes de fazer uma varredura num espaço angular maior do que o GPS e o GPS Refinado. Logo, mesmo que uma localização errada do USR seja repassada para a EBmm, aumenta-se a probabilidade de que um feixe na direção da localização correta seja testado. Isso é uma característica importante dos mecanismos de acesso inicial propostos, que mostra que as propostas têm desempenho mais robusto mesmo em cenários desafiadores com erro de geolocalização elevados.

Uma característica importante dos algoritmos que usam a informação de contexto no IA é a aproximação das curvas de capacidade nominal e efetiva conforme

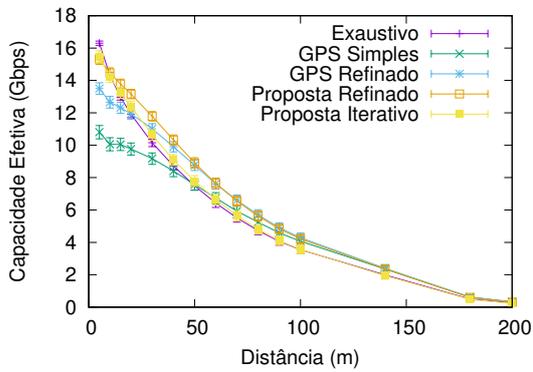


(a) Erro baixo de geolocalização.

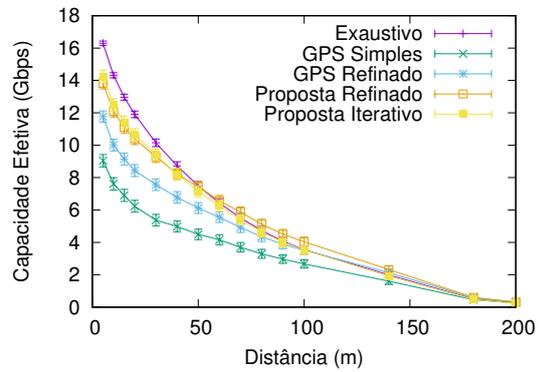


(b) Erro alto de geolocalização.

Figura 5.1: Capacidade efetiva em função da distância com $t_{frame} = 500ms$.



(a) Erro baixo de geolocalização.



(b) Erro alto de geolocalização.

Figura 5.2: Capacidade efetiva em função da distância com $t_{frame} = 1000ms$.

a distância do USR para EBmm aumenta. Esse fenômeno é causado pela menor influência do erro de geoposicionamento sobre os algoritmos. Pois quanto maior a distância entre os pontos TX e RX, menor será o erro angular provocado pela inacurácia do sistema de geoposicionamento, como demonstrado na Seção 3.1. O maior exemplo desse processo é quando observamos o `GPS Simples` que não busca nenhuma medida para reduzir o impacto da posição com erro adquirida, aproximando-se das propostas que introduzimos que buscam minimizar esse erro em distâncias elevadas.

Outra observação interessante sobre este conjunto de resultados é a respeito do impacto do t_{Frame} . Pode-se perceber nos gráficos das figuras 5.1 e 5.2 que o algoritmo mais influenciado pela variação do t_{Frame} é o `Exaustivo`. Isso ocorre pela sua necessidade em testar todas as combinações de feixe, consumindo um maior tempo de acesso inicial. Como a métrica de C_{ef} pondera de acordo com tempo de IA gasto, mostrando que quanto maior o tempo de IA menor será sua C_{ef} . No entanto, quanto maior é t_{Frame} menor é o peso do IA sobre a métrica C_{ef} , prevalecendo aqueles que obtiveram a melhor capacidade nominal (Figura 5.3). Devido a essa proporcionalidade em cenários onde o t_{Frame} é grande, o `Exaustivo` apresenta melhoras em seus

resultados.

Um detalhe que é comum a todos os algoritmos é o decaimento da C_{ef} e nominal do canal conforme a distância aumenta. Decorrente do modelo de propagação adotado, em que distâncias maiores a atenuação do sinal causada pela perda no espaço livre é crescente. Outro fator que está correlacionado com o aumento da distância é a maior possibilidade nas rodadas de simulação aparecer os estados onde não haja linha de visada direta (P_{nlos}) ou de falha (P_{out}), reduzindo assim na média a capacidade do canal.

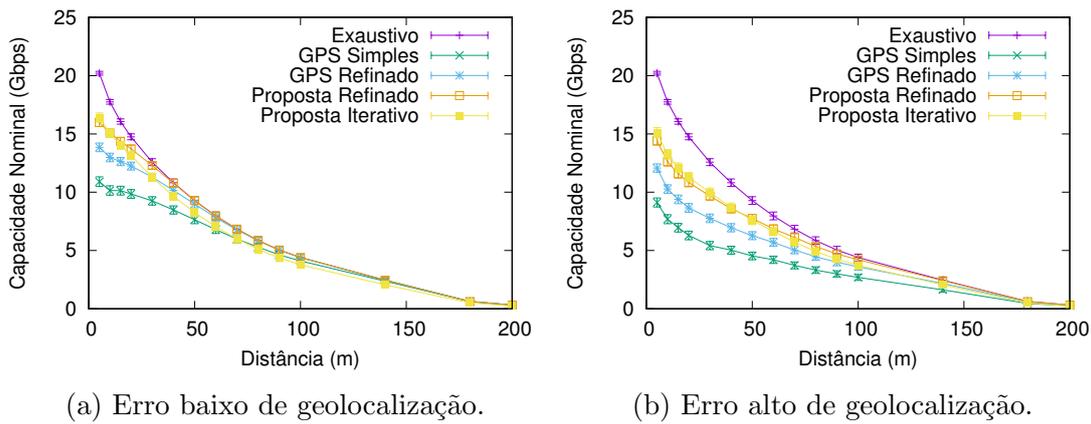


Figura 5.3: Capacidade nominal em função da distância com $t_{frame} = 500ms$.

Os gráficos de capacidade nominal apresentados na Figura 5.3, mostram um comportamento superior do **Exaustivo** em comparação aos demais algoritmos. Isso se deve ao fato do **Exaustivo** sempre fazer a varredura completa de seu espaço angular, a sua probabilidade dele obter uma combinação de feixes que gere uma melhor taxa de transmissão para serem usados em dados é mais alta do que as dos outros. Porém, se consideramos apenas os algoritmos de informação de contexto, nossas propostas têm um melhor desempenho, o que comprova que elas estão escolhendo as combinações de feixes que geram maior capacidade em dados. Ficando ainda mais visível em cenários no qual o erro de geoposicionamento é mais elevado.

Uma das principais considerações que podemos fazer está relacionado ao tempo médio do acesso inicial, que varia de acordo com a distância e com o método utilizado, como é demonstrada pela Figura 5.4 no cenário com $t_{Frame} = 500ms$. Observando os algoritmos baseados em informação de contexto, vemos que seus tempos são inferiores ao **Exaustivo**, pelo menos em até 100 metros, pois o alcance de sua área angular é reduzido exigindo um menor número de interações. Porém, o GPS mesmo sendo mais rápido é o mais afetado com aumento do erro, pois como ele testa apenas o feixe principal sua cobertura angular é muito inferior as das outras propostas. Logo ele é mais suscetível ao aumento do erro angular provocando um crescimento nas falhas ao tentar uma conexão, o que eleva o tempo gasto em IA.

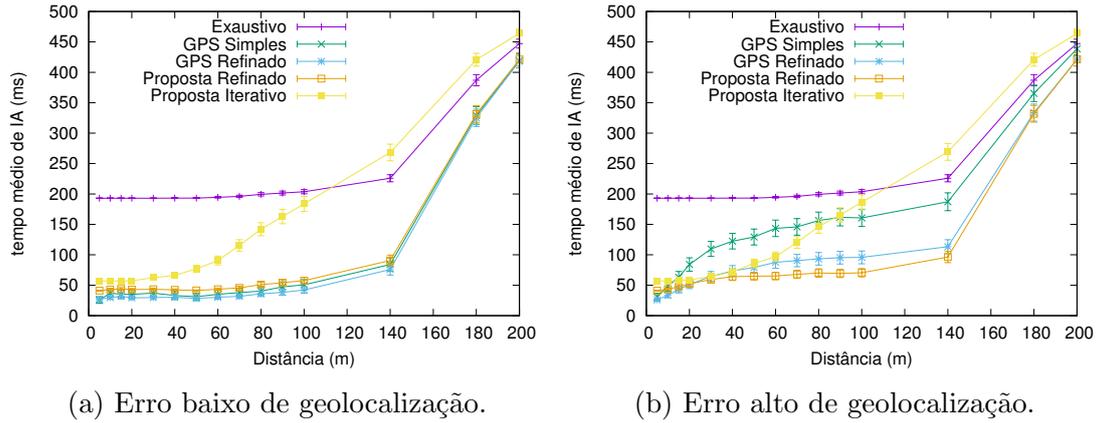


Figura 5.4: Tempo de acesso inicial em função da distância com $t_{frame} = 500ms$.

Nossa primeira proposta tem um desempenho baixo para grandes distâncias quando analisamos o tempo médio de acesso inicial, que é resultante da maior quantidade de falhas de conexão na primeira etapa, onde possui um menor ganho de irradiação pois usa matriz 3x3. Visto que com o aumento da distância, aumenta também a probabilidade das sondas PSS não serem detectadas pelo USR. Também fica claro que em distâncias acima de 150 metros ocorre um desvio abrupto nas curvas e isso se deve ao aparecimento da probabilidade do P_{out} , aumentado consideravelmente o tempo gasto para se estabelecer um enlace.

Por fim, comparando o desempenho das duas propostas pode-se perceber que a Proposta Refinado teve um desempenho médio superior ao da Proposta Iterativo. Pois a Proposta Iterativo é muito prejudicado para grandes distâncias decorrente da utilização de feixes mais abertos em sua primeira fase, com um ganho reduzido de propagação na sua matriz de antenas. Isso fica comprovado pela elevação do tempo de acesso inicial em função da distância na Figura 5.4.

5.3 Resultados Com Mobilidade

Antes de apresentar os resultados em cenários com mobilidade se faz necessário explicar com mais detalhes os efeitos da mobilidade nas estratégias Fixo e Reativo, para assim melhorar o entendimento das curvas de comparação dos algoritmos, com e sem o FAST IA.

As próximas figuras complementam a explicação dessas estratégias Fixo e Reativo, mostrando o comportamento simulado em um intervalo de tempo e nelas a curva azul representa flutuação da taxa (Gbps) no decorrer do caminho feito pelo USR. O cálculo da curva azul foi realizado usando uma média móvel, com peso de 20% para a taxa atual e 80% nos valores passados. As barras roxas representam os intervalos de IAs, nos instantes de tempo em que foram executados.

Dividimos em 4 subseções para descrever os comportamentos das curvas nos ambientes de simulação. Cada parte explica um fenômeno, podendo estar relacionado a condição do canal, raio da célula, velocidade e erro de GPS.

5.3.1 Estado do Canal

O estado do canal é determinante para o desempenho do enlace, pois o modelo de propagação usado estabelece um crescimento abrupto da atenuação, quando mudamos os cenários de LOS para NLOS, causando uma queda considerável na capacidade de transmissão. Essa diminuição na taxa fica perceptível nas Figuras 5.5a e 5.5b, no qual a média móvel aparece com valores muito inferiores, quando se está operando em NLOS.

A outra situação que causa a queda da taxa está relacionada ao Reativo quando está operando em LOS, efetua IA com menor frequência do que quando está em NLOS. Isso acontece em virtude das capacidades alcançarem valores nulos (quando a capacidade é igual a zero) com maior periodicidade em NLOS, aumentando a velocidade do decaimento e iniciando mais IAs. As Figuras 5.5a e 5.5b revelam essa reação do Reativo à mudança de canal, em que no estado NLOS o IA acontece um maior número de vezes no decorrer do tempo em comparação ao estado de LOS. Se o aumento no número de IA's for considerável, pode ocorrer a diminuição da capacidade.

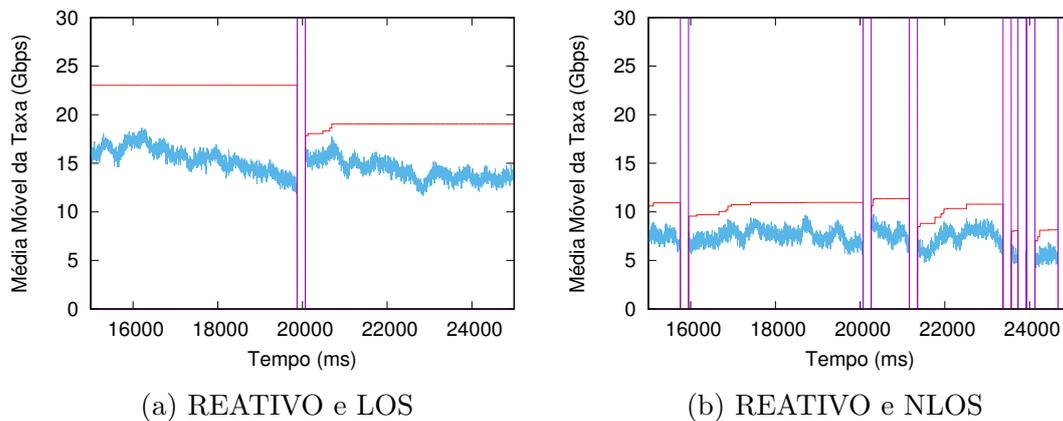


Figura 5.5: Comportamento no tempo da estratégia Reativo com diferentes estados de canal.

5.3.2 Raio da célula

O alcance da célula milimétrica geram dois fatores que podem causar perdas na capacidade de transmissão nas estratégias Fixo e Reativo. O primeiro deles é comum a ambos, que aparece em decorrência do aumento do alcance do raio da EBmm, e

com isso, a distância média entre o USR e a EBmm fica maior, elevando a perda de propagação no espaço livre. Esse argumento fica visível se compararmos a Figura 5.6a com a Figura 5.6b, e a Figura 5.6c com a Figura 5.6d, onde as curvas em vermelho de capacidade máxima de ambos são superiores onde está presente o menor raio (25 metros).

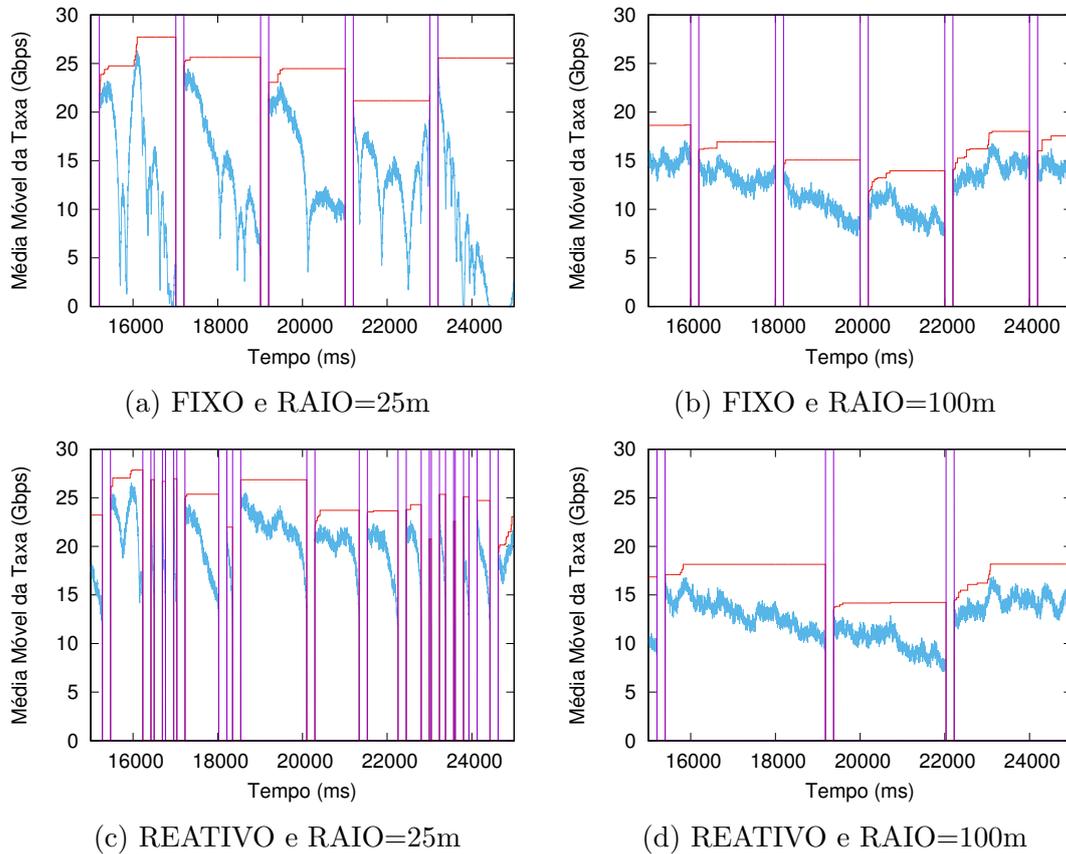


Figura 5.6: Comportamento no tempo das estratégias para iniciar o IA com diferentes raios de células.

Outro fator, é que em células menores o caminho percorrido pelo USR para sair do alinhamento dos feixes é mais curto, causando uma variabilidade elevada do canal. Porém nesse caso as causas de perdas nas duas estratégias são diferentes. No Reativo, que independe do raio da célula ser grande ou pequeno, o IA será executado assim que atingir o limiar de queda da taxa. Mas em ambientes de raios menores que possuem uma alta flutuação do sinal, o limiar é alcançado com mais frequência, e como consequência ocorre uma maior quantidade de IA's, reduzindo a taxa média.

Quando olhamos as Figuras 5.6c e 5.6d, esse processo fica explícito, pois os gráficos que possuem raios menores apresentam maior quantidade de IA'S com a variação da média móvel mais alta. O Fixo não é sensível a essa variação. Pois seu IA é feito em intervalos fixos no tempo, definidos pelo tamanho do *superframe*. Logo, com a mobilidade do USR, existe probabilidade de não fazer IA mesmo após

ter saído do alinhamento entre feixes, o que causa um decaimento médio considerável da taxa. A Figura 5.6a representa esse fenômeno, em que a curva da taxa assume valores baixíssimos, e a execução do IA é indiferente a isso.

5.3.3 Velocidade

A mudança de velocidade afeta o desempenho das estratégias para disparar o IA, pois o aumento da velocidade do USR gera um desalinhamento rápido dos feixes. Quando analisamos a estratégia Fixo acompanhado do aumento da velocidade, a chance do USR já ter saído da área de cobertura do feixe sem ter feito IA cresce, provocando a diminuição da taxa. Para melhor esclarecimento, vamos descrever um exemplo prático, com o Fixo fazendo IA a cada 2000 milissegundos. Se consideramos o USR a uma velocidade de 1ms, em 2000 milissegundos ou 2 segundos ele percorrerá uma distância de 2 metros, enquanto se estivesse à 5ms percorreria 10 metros, aumentando a possibilidade já ter tido perdas em sua capacidade pelos motivos já descritos. As Figuras 5.7a e 5.7b exibem com clareza esse processo, quando comparamos as curvas de média móvel decidindo mais bruscamente em altas velocidade, e os instantes que o IA é efetuado permanecem constantes, diminuindo a média da capacidade ao longo do tempo.

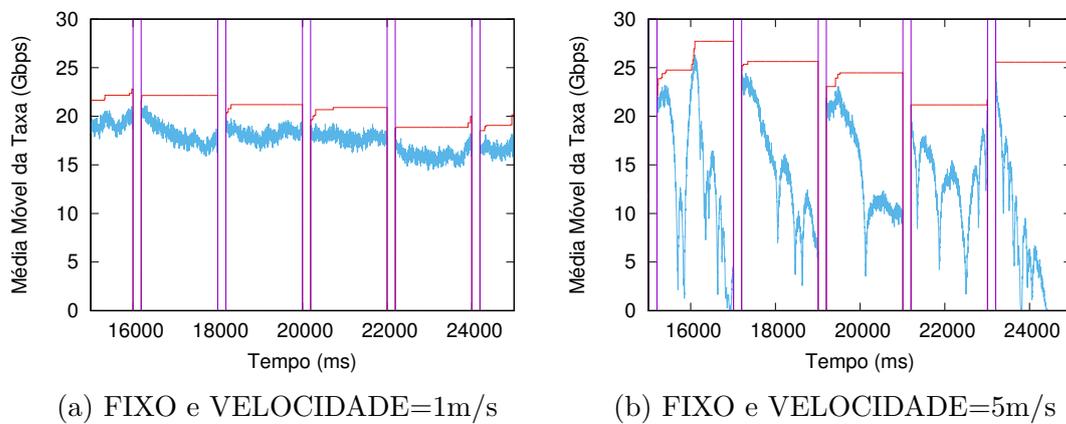
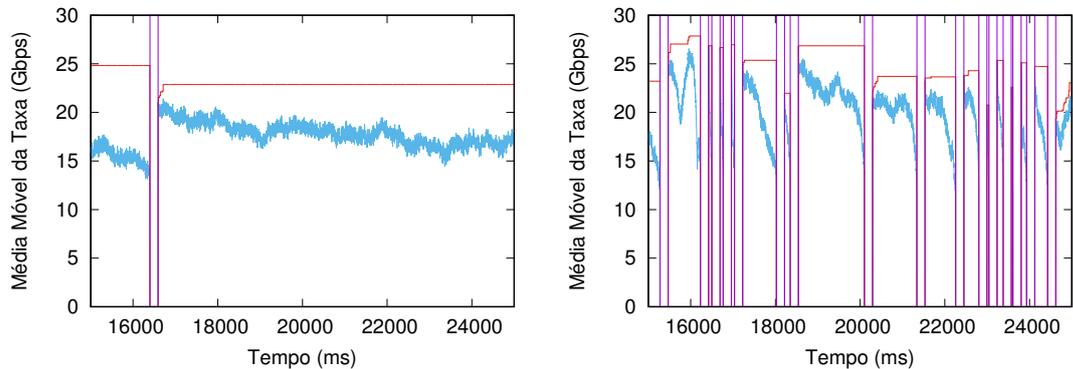


Figura 5.7: Comportamento no tempo da estratégia Fixo com diferentes velocidades do USR.

No Reativo, o USR dispara um IA em determinadas localizações no percurso de acordo com seu limiar e essas posições quase não sofrem alterações com a velocidade. Então se o tempo para o USR ir de um ponto de IA até o outro reduz com o aumento da velocidade, aumentando a variação do canal em curto espaço de tempo. Logo o tempo consumido em IA começa a ser considerável, afetando a capacidade média do canal. Usando como base as Figuras 5.8a e 5.8b, destaca-se o maior número de IA's no mesmo período de tempo quando se eleva a velocidade, levando à perda de

capacidade, o que confirma o que foi explicado sobre a variabilidade do canal em um menor espaço de tempo.

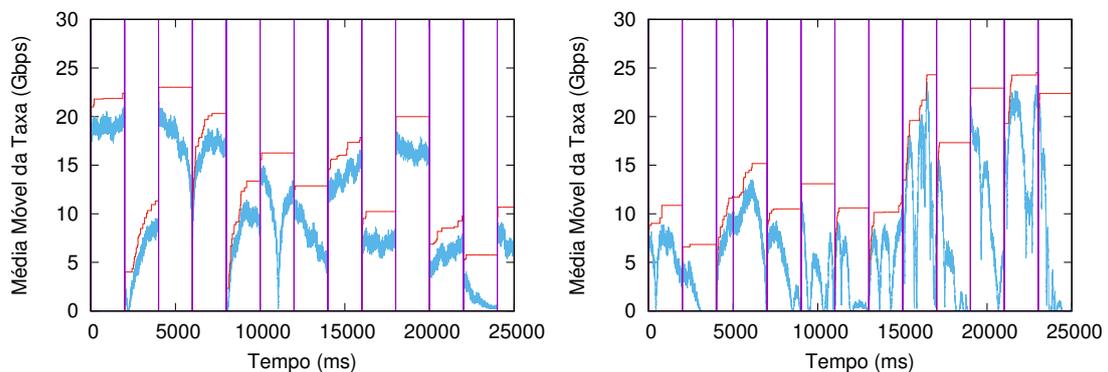


(a) REATIVO e VELOCIDADE=1m/s (b) REATIVO e VELOCIDADE=5m/s

Figura 5.8: Comportamento no tempo da estratégia Reativa com diferentes velocidades do USR.

Uma observação importante é que todos os algoritmos baseados em informação de contexto têm a chance de escolher um feixe ruim devido ao erro de geoposicionamento. Devido a essa imprecisão, o Fixo cria uma condição onde o USR está em um feixe ruim, mas com a sua mobilidade existe a possibilidade de passagem para um feixe com maior taxa. Para mostrar tal influência plotamos gráficos a partir do método `GPS Simple`.

Logo, usando como base o `GPS Simple` com a estratégia Fixo, demonstramos com a Figura 5.9a, que quando o USR está em baixa velocidade, o tempo de permanência dele em um feixe ruim ou bom aumenta. Em velocidades mais altas, a troca de feixes é maior, podendo sair com mais frequência de uma condição de canal ruim para uma boa, ou vice-versa, como apresenta a Figura 5.9b.



(a) FIXO e ERRO=5m (b) FIXO e ERRO=10m

Figura 5.9: Comportamento do `GPS Simple` no tempo da estratégia Fixo com diferentes velocidades do USR.

Porém ao se analisar a média das taxas de toda a simulação, essa média terá

valores próximos independente da velocidade devido aos efeitos descritos. Esse efeito fica cada vez menos visível se diminuirmos o impacto do erro de geoposicionamento através de algoritmos que cubram uma maior área angular durante o BF. Isso é possível graças a redução na probabilidade de escolher um feixe ruim inicialmente.

5.3.4 Erro de Geoposicionamento

Os algoritmos que usam a informação de contexto, o grau do erro de geoposicionamento influencia diretamente na qualidade de conexão. Pois quanto maior for a imprecisão do posicionamento do USR, a possibilidade da escolha de um feixe ruim aumenta, ocasionando a piora da taxa de dados. Essa informação fica visível nos gráficos das Figuras 5.10a, 5.10b, 5.11a e 5.11b quando alteramos o EG com média normal de 5 metros para 10 metros, provocando o aumento de decisões ruins do feixe a ser utilizado para transmissão de dados, levando a curva da taxa ficar inferior na média.

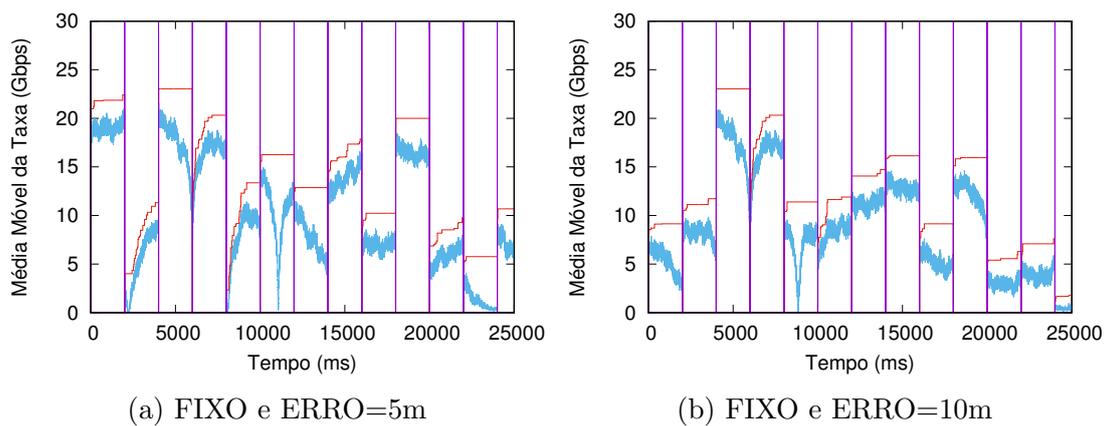


Figura 5.10: Comportamento no tempo do Intervalo Fixo com diferentes erros de geoposicionamento.

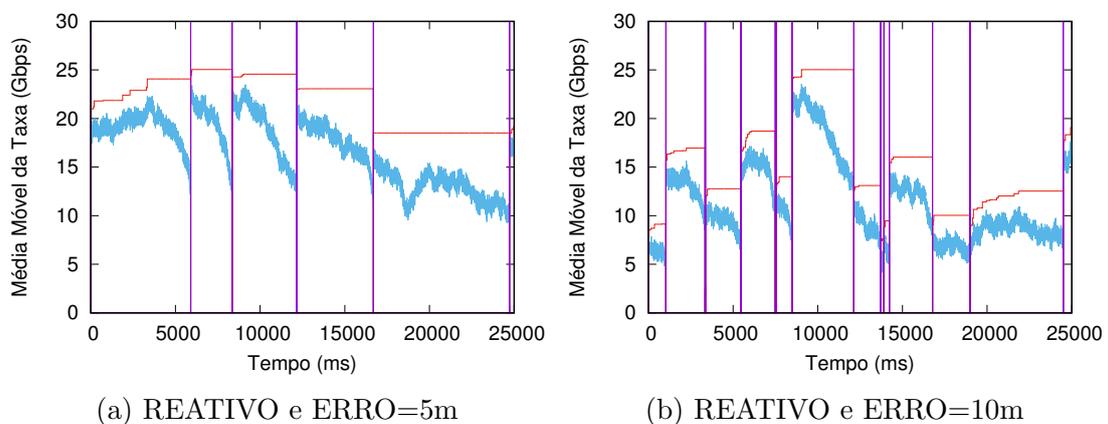


Figura 5.11: Comportamento no tempo do Reativo com diferentes erros de geoposicionamento.

Para o Reativo existe mais uma consequência com a mudança do erro de geoposicionamento, pois com a escolha de alinhamentos ruins de feixes para criação de um enlace, pode ocasionar desalinhamentos mais rápidos. Como um fator que gera queda na taxa é o desalinhamento entre os feixes, por consequência o Reativo executará maior quantidade de IAs, reduzindo sua C_{ef} . Este impacto está demonstrado nas Figuras 5.11a e 5.11b.

5.4 Resultados Sem FAST-IA

Uma vez feita a explicação dos fenômenos causados pela variação dos parâmetros dos cenários, podemos então avaliar mais facilmente o desempenho dos algoritmos de IA em ambientes de mobilidade. Para isso vamos comparar primeiramente as estratégias Fixo e Reativa, junto aos algoritmos de *Exuastivo* e *GPS Simples*. Pois um representa a condição onde o erro de GPS não irá afeta-lo, em contra partida o outro possui a maior sensibilidade ao erro. Em seguida, vamos comparar todos os algoritmos de IA com a melhor estratégia Fixa ou Reativa que foi apresentada.

As figuras desta seção irão retratar diferentes ambientes de simulação que variam o alcance da célula, erro de GPS e estado do canal. No qual os eixos dos gráficos correspondem a C_{ef} média que o USR atingiu durante toda simulação em uma determinada velocidade. Mas para escolher qual estratégia se comportou melhor perante aos algoritmos em todos esses tipos de ambientes, foram escolhidas três métricas para cada um. No Reativo foi usado valores de decaimentos de 30, 50 e 70% para termos em vista se é melhor reagir de forma mais rápida ou não. No Fixo foi determinado 500, 1000 e 2000 ms com os valores dos intervalos de IAs, revelando qual tempo de intervalo pode acarretar maior capacidade do canal.

Vamos começar assinalando o comportamento do Reativo com a mudança do raio da célula nas Figuras 5.12 e 5.13. É notório uma piora na C_{ef} quando aumentamos o raio, isso se deve aos acontecimentos descritos na subseção 5.3.2. Pois o raio de maior alcance tem seu efeito de atenuação no espaço livre mais acentuado e gera um maior impacto em comparação as perdas causadas pelo aumento da variabilidade do canal em raios menores. No entanto, o Fixo se comporta de maneira diferente com a mudança do raio, como foi evidenciado na subseção 5.3.2. Esse método não reage à flutuação do canal o que lhe causa grandes perdas, e esse fenômeno aparece com mais intensidade em raios menores. Logo nessa situação, o peso da variabilidade do canal pode até superar o da atenuação no espaço livre.

Continuando a análise dos gráficos, mas agora mudando a condição do canal de LOS para NLOS. Essa mudança de canal leva ambos algoritmos sofrerem quedas em suas C_{ef} , em consequência do modelo de propagação, como especificado na subseção 5.3.1. Mas quando se trata do decaimento do Reativo, existe uma inversão

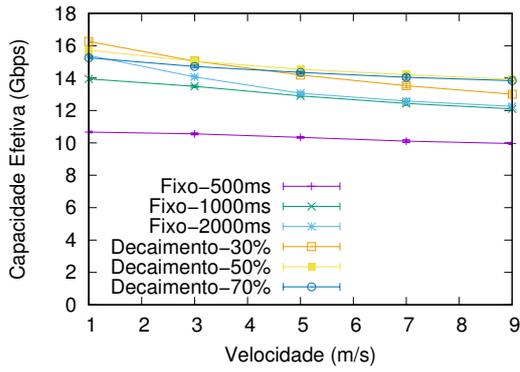
em suas curvas de C_{ef} dependendo das características do estado do canal. O motivo para esse comportamento é que em ambientes de LOS onde as taxas são mais altas, o decaimento da capacidade será menos acentuado do que em NLOS. A explicação para esse acontecimento é que a quantidade de amostras com capacidade zero é superior em cenários de NLOS, que está demonstrado pela subseção 5.3.1. Nesta troca de estados o Reativo com decaimento de 70% irá realizar o IA forma tardia em LOS, diminuindo sua C_{ef} média. No decaimento de 30% terá sua C_{ef} média reduzida no estado de NLOS, em decorrência de IAs realizados de forma exagerada e prematura.

Um fato importante a ser destacado é a reação dos algoritmos com a mudança de velocidade. A alteração da velocidade gera três situações em suas curvas, que são: o aumento, diminuição ou constância da C_{ef} . Porém essa explicação é um pouco mais complicada, logo vamos dividi-la em parágrafos, para poder esclarecer os acontecimentos de forma mais organizada.

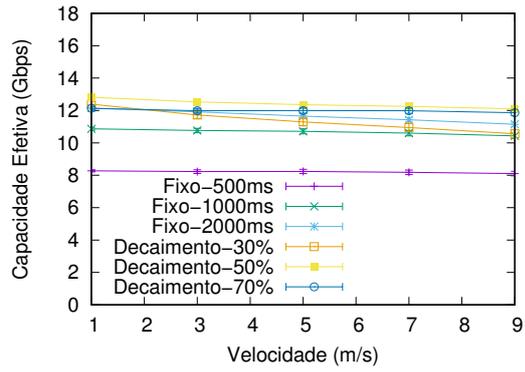
De acordo com a subseção 5.3.3 o Fixo é prejudicado em altas velocidades, no entanto os gráficos que estão sendo analisados agora revelam que com a diminuição dos intervalos de IA, o comportamento das curvas tende a ficar mais constante. Esse fato decorre da variação da taxa nos intervalos de IA, pois o IA é refeito depois de janelas no tempo e quando reduzimos essa janela, o caminho percorrido pelo o USR diminui, reduzindo assim a variação do sinal. Quando o intervalo era de 2000ms conforme a velocidade vai aumentado a C_{ef} vai caindo, mas quando reduzimos para 500ms o IA é feito em um intervalo de tempo tão curto que a C_{ef} quase não varia e começa ser a mesma independente da velocidade. No exaustivo usar o intervalo de 500ms é muito danoso para C_{ef} , pois grande parte do tempo é consumido pelo IA.

O aumento da velocidade também afeta o Reativo, como está descrito na subseção 5.3.3. Porém o efeito da velocidade é reduzido quando elevamos o valor do decaimento, devido ao aumento períodos entre de IA's. Para exemplificar esse acontecimento vamos considerar os valores de decaimento de 30% e 70% para disparar um IA, tendo uma taxa máxima de 20Gbps. Com o decaimento de 30% o USR precisa reduzir em 6Gbps sua taxa enquanto em 70% são necessários 14Gbps. Logo a distância percorrida até a execução de um IA será maior quando aumentamos o decaimento, ou seja, se os intervalos de tempo entre os IAs ficam maiores, ocorre a redução do efeito do tempo gasto com IA na capacidade. Assim, com o decaimento de 30% o intervalo entre IAs vai reduzindo conforme a velocidade cresce, provocando a queda da C_{ef} , o que é menos perceptível com o decaimento de 70%.

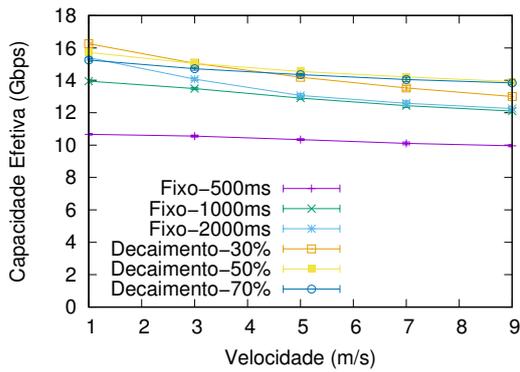
Em raios de células maiores, as curvas de C_{ef} aparecem com menor variação, e isso se deve a menor variabilidade do canal. No caso do Fixo, essa estabilidade do canal provoca a menor variação nas curvas de C_{ef} em relação as mudança de velocidade. Enquanto que, no reativo a baixa variação aumenta os períodos entre IA's,



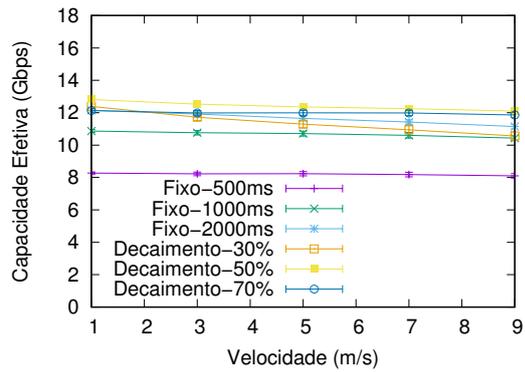
(a) LOS, Erro=5m, Raio=25m



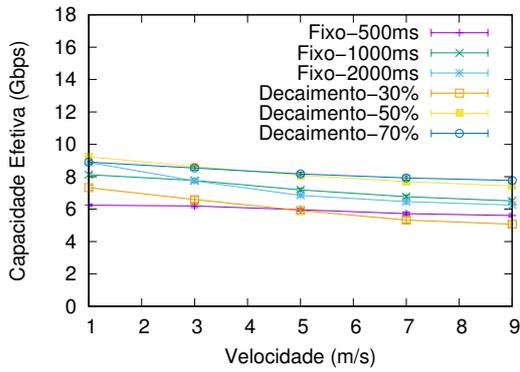
(b) LOS, Erro=5m, Raio=100m



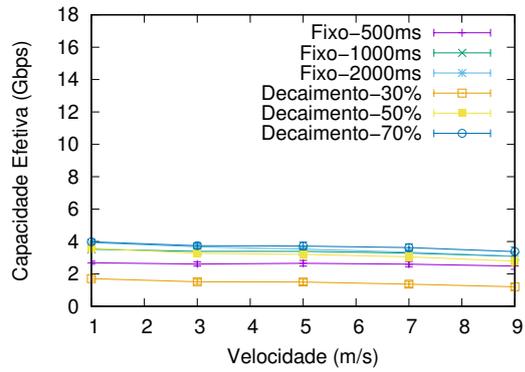
(c) LOS, Erro=10m, Raio=25m



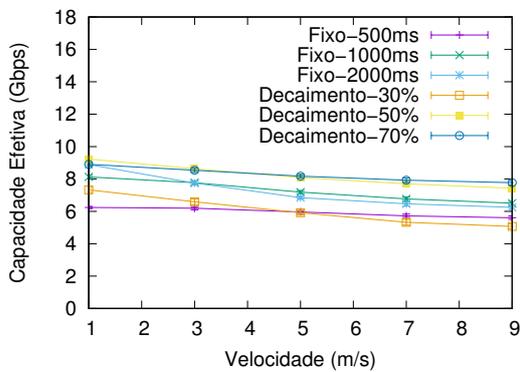
(d) LOS, Erro=10m, Raio=100m



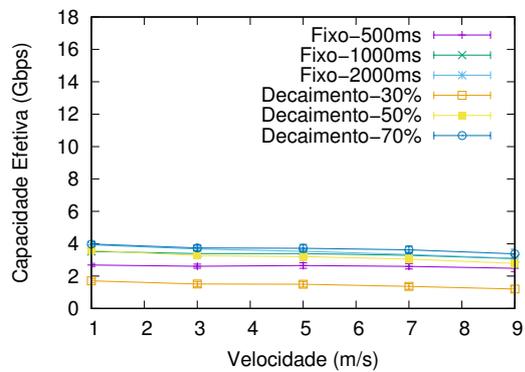
(e) NLOS, Erro=5m, Raio=25m



(f) NLOS, Erro=5m, Raio=100m

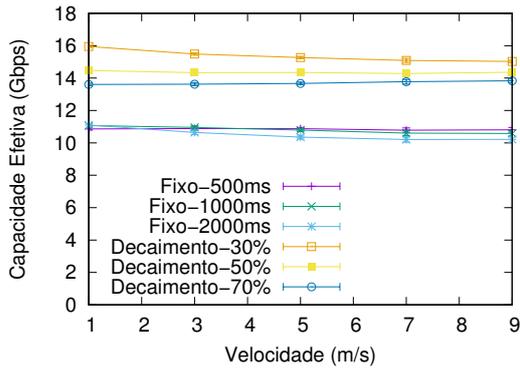


(g) NLOS, Erro=10m, Raio=25m

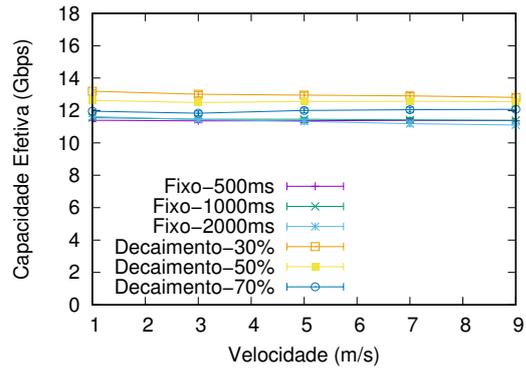


(h) NLOS, Erro=10m, Raio=100m

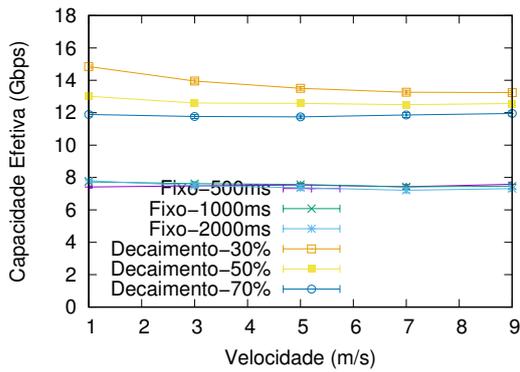
Figura 5.12: Capacidade efetiva com o algoritmo Exaustivo.



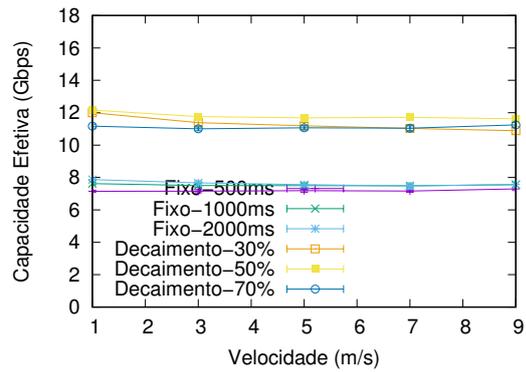
(a) LOS, Erro=5m, Raio=25m



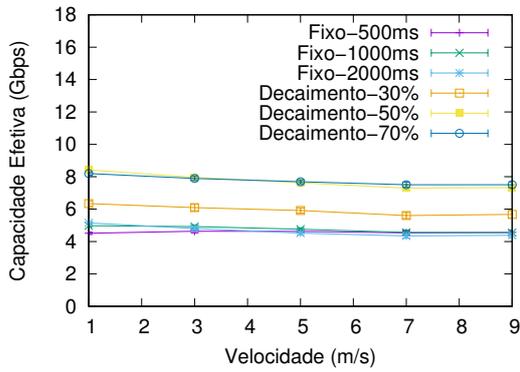
(b) LOS, Erro=5m, Raio=100m



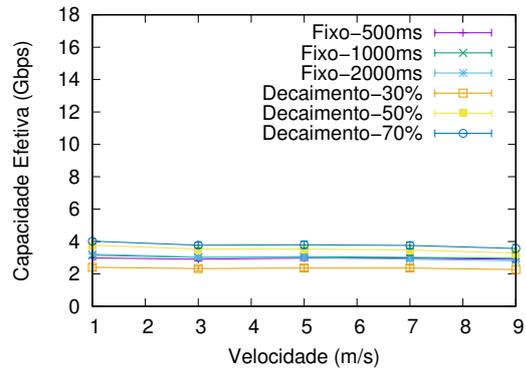
(c) LOS, Erro=10m, Raio=25m



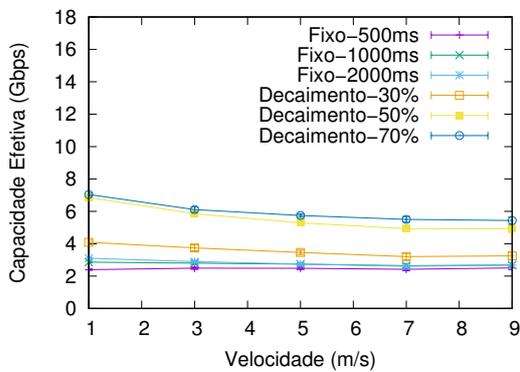
(d) LOS, Erro=10m, Raio=100m



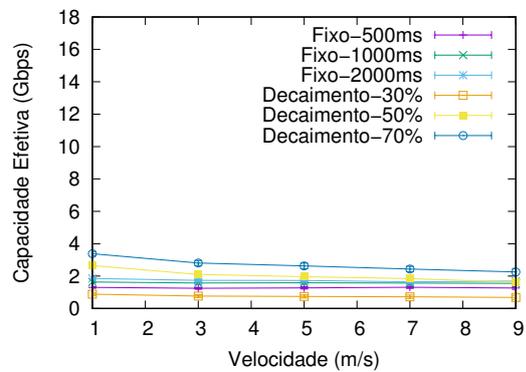
(e) NLOS, Erro=5m, Raio=25m



(f) NLOS, Erro=5m, Raio=100m



(g) NLOS, Erro=10m, Raio=25m



(h) NLOS, Erro=10m, Raio=100m

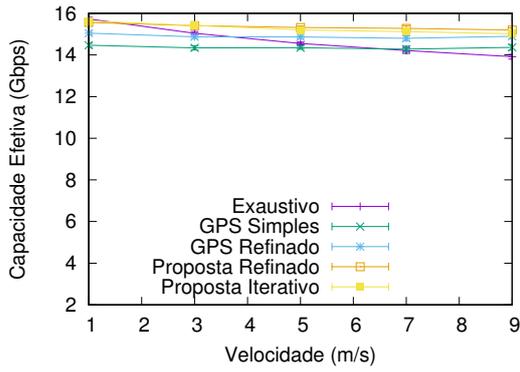
Figura 5.13: Capacidade efetiva com o algoritmo GPS Simples.

diminuindo o impacto do IA na capacidade do canal, provocando C_{ef} constantes com o aumento da velocidade até para decaimentos mais sensíveis, como o de 30%.

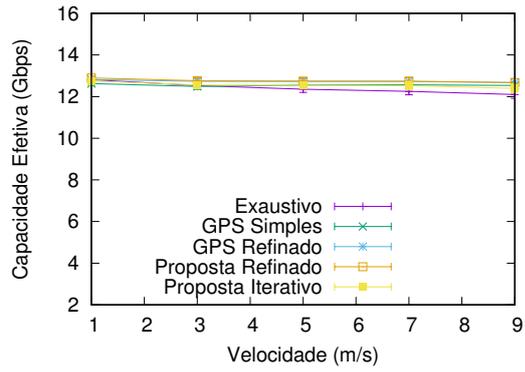
Em relação ao EG, a Figura 5.13 comprova o que foi detalhado na subseção 5.3.4, em que quando diminuimos a acurácia do GPS ocasiona queda de sua C_{ef} . Essa queda é resultante do aumento das combinações não ótimas entre os feixes. Mas no caso do **GPS Simple**s, as curvas de C_{ef} em raios pequenos também ficaram constantes. No Fixo, a causa desse fato foi explicado na subseção 5.3.4, no entanto o Reativo apresentou o mesmo comportamento. No caso do Reativo a redução do tempo gasto no IA é a causa dessa constância na C_{ef} , pois quando aumentamos a velocidade o espaçamento temporal entre os IA's diminui e o tempo gasto no IA começa a afetar o desempenho do USR. Como os algoritmos que usam a inforção de contexto consomem menos tempo no processo de IA, o efeito da velocidade é reduzido, diminuindo a variação da C_{ef} .

Outra análise do Reativo quando adicionamos o impacto do EG, é que reagir de forma rápida é melhor no cenário de LOS. Pois como existe a possibilidade da escolha de um feixe ruim, reagir rapidamente permite a saída de uma condição ruim para outra melhor, aumentando sua C_{ef} como expressa a Figura 5.13e. Se mudarmos o ambiente para NLOS, onde as taxas são baixas junto com maior possibilidade da escolha ruim de feixes, causando uma maior quantidade de capacidades nulas, usar limiares baixos causa o aumento significativo na quantidade de IA's executados, diminuindo sua C_{ef} .

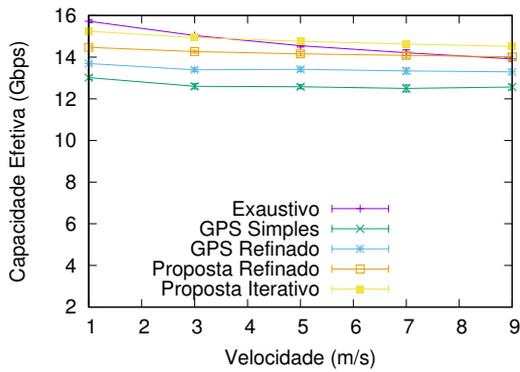
No geral, o Reativo que considera a condição do canal teve melhores resultados que o Fixo, que apenas efetua o IA de maneira independente do canal, o que já era esperado. Então nos próximos gráficos da Figura 5.14, vamos comparar todos os algoritmos com a estratégia que teve melhor desempenho na média. Assim podemos analisar qual é o melhor algoritmo e avaliar os motivos de sua superioridade. No entanto a métrica de decaimento de 50% foi a adotada para fazer a comparação, pois na média foi a que demonstrou o melhor desempenho.



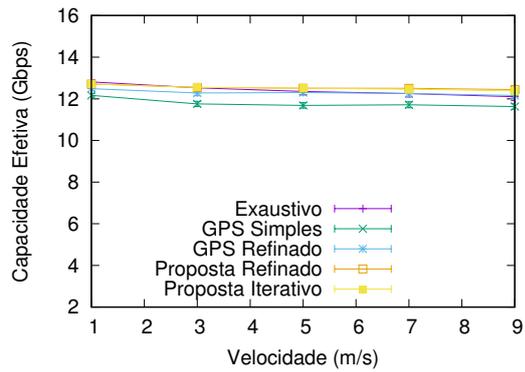
(a) LOS, Erro=5m, Raio=25m



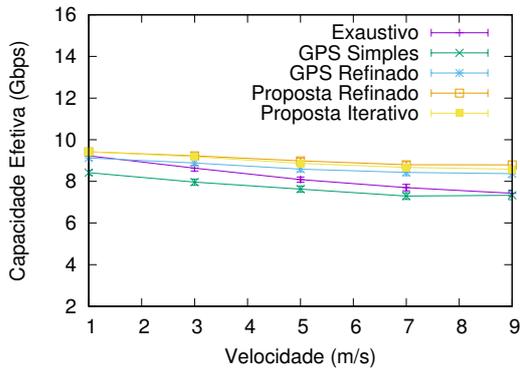
(b) LOS, Erro=5m, Raio=100m



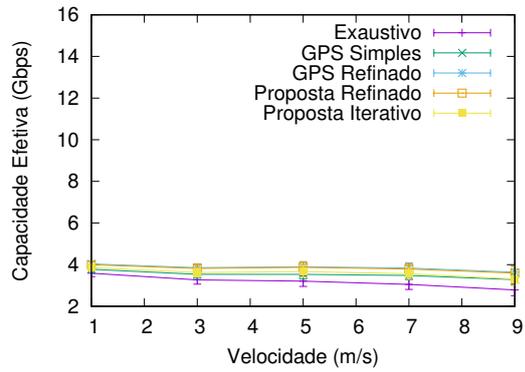
(c) LOS, Erro=10m, Raio=25m



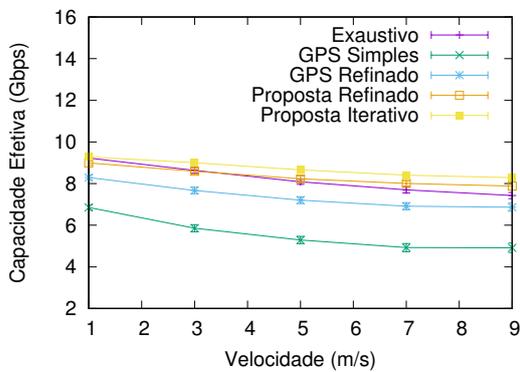
(d) LOS, Erro=10m, Raio=100m



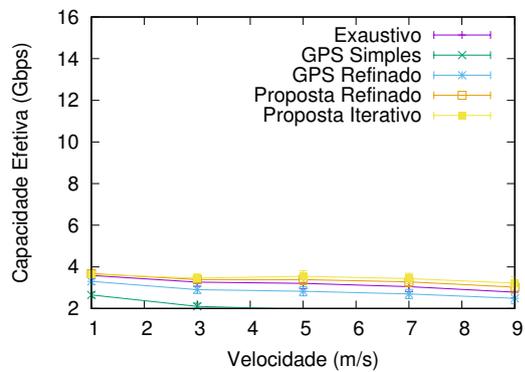
(e) NLOS, Erro=5m, Raio=25m



(f) NLOS, Erro=5m, Raio=100m



(g) NLOS, Erro=10m, Raio=25m



(h) NLOS, Erro=10m, Raio=100m

Figura 5.14: Capacidade efetiva do Reativo com decaimento da taxa de 50% comparando todos os algoritmos.

Nossa primeira observação em relação a Figura 5.14, está relacionada ao desempenho geral dos algoritmos, onde nossas propostas aparecem empatadas ou superiores na maior parte do tempo. Só ficando inferior ao exaustivo apenas até a velocidade de 5m/s, no cenário de LOS em que o EG é mais significativo. Neste cenário de maior média de EG e com o menor raio de célula apresenta uma grande possibilidade de se escolher uma combinação de feixes ruim usando os algoritmos de informação de contexto, prejudicando-os o máximo possível. O impacto do tempo de IA é menos significativo em LOS do que em NLOS, devido ao maior intervalo dos IAs em LOS, beneficiando o exaustivo. Então, para o exaustivo como o grau de EG é irrelevante, no cenário onde o EG é mais proeminente e o tempo de IA tempo menor relevância, ele acaba levando um certa vantagem sobre os demais. No entanto, na média os algoritmos propostos tiveram um desempenho superior.

Comparando exclusivamente na Figura 5.14 os algoritmos de que usam a informação de contexto, nossas propostas mostram uma C_{ef} superior. Isso se deve à diminuição da influência do EG sobre as propostas, porém buscando despende o menor tempo para IA possível. Esses dois compromissos levaram ambas a apresentarem melhores resultados em suas médias de C_{ef} . Essa diferença fica nítida nos cenários com maiores EG e menores raios de célula.

Nos ambientes de simulação com raios igual a 100 metros, todas as curvas dos algoritmos se aproximam. Isso decorre da menor interferência do EG, o que leva os algoritmos que usam informação de contexto a errarem menos nas escolhas de seus feixes. Também pode-se dizer que uma menor fluabilidade do canal aumenta o espaçamento entre os IAs no Reativo, logo o o tempo empregado no IA começa a perder a relevância. Por causa disso, os algoritmos de IA se equiparam em raios de células mais elevados.

5.5 Resultados Com FAST-IA

A Figura 5.15 mostra os resultados utilizando o algoritmo de FAST-IA, em cenários onde variamos o EG, estado do canal e raio da célula. Onde a métrica de recuperação do canal empregada no FAST-IA foi de 60% em comparação com a capacidade máxima adquirida na etapa de dados até aquele instante.

Os algoritmos escolhidos para análise do efeito junto ao FAST-IA foram a *Proposta Refinado* e a *Proposta Iterativo* com a utilização da estratégia Reativo e limiar de 50%. Pois como ambas tiveram o melhor desempenho médio que os outros algoritmos, logo com o uso do FAST IA tentaremos melhorar aqueles que obtiveram os resultados mais satisfatórios.

É notável um ganho em todos os cenário. No entanto, nos cenários em que a acurácia do GPS têm a maior influência (raio da célula de 25 metros e EG com

média de 10 metros) foi onde o FAST-IA mostrou o maior ganho. Vale lembrar que foi nos cenários de alta imprecisão do GPS que nossas propostas tiveram as maiores dificuldades anteriormente e com a inclusão do FAST-IA proporcionou resultados mais significativos, chegando a superar 1.5 Gbps a Proposta Refinado e a Proposta Iterativo depois de sua utilização.

Um dos motivos do FAST IA apresentar esse aumento em sua C_{ef} , é a redução do tempo empregado para realinhar os feixes do transmissor e do receptor. Pois antes teria que ser feito um processo de IA completo baseado nos algoritmos propostos, mas com o teste feito pelo FAST IA o realinhamento se dá muito mais rápido. A Figura 5.16 mostra essa redução do tempo despendido para o IA, em que no cenário de NLOS onde era realizado maior números de IAs a diminuição se revelou mais substancial.

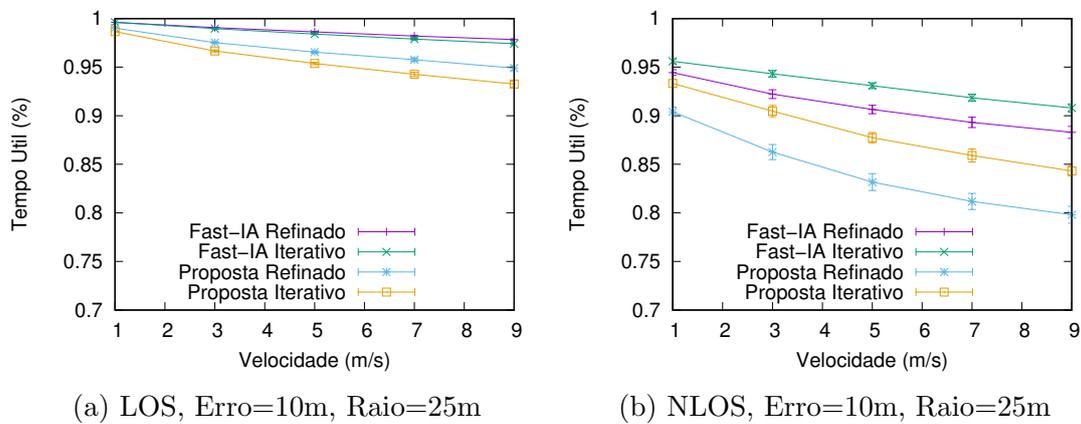
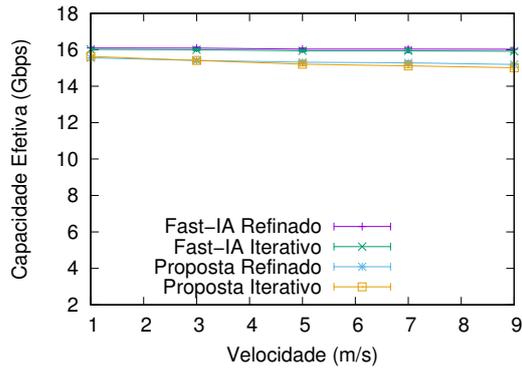
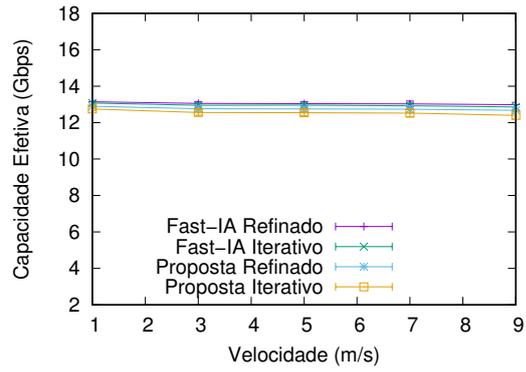


Figura 5.16: Comparação percentual do tempo empregado para dados com e sem o uso do FAST-IA

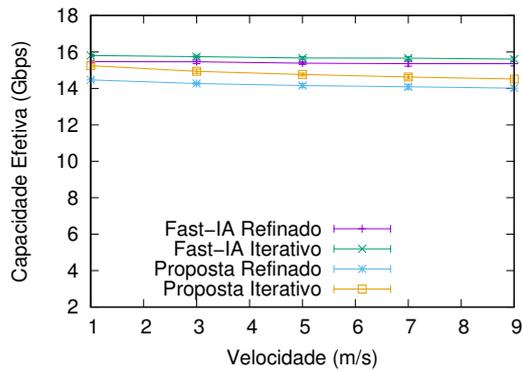
O cenário no qual o FAST-IA apresentou maior ganho foi em LOS, mesmo não sendo o que teve a maior redução do tempo de IA. Esse efeito é decorrente do EG associado ao algoritmo, pois quando adotamos um combinação não ótima de feixes devido a uma posição errada enviada pelo GPS ocorre uma queda na taxa. Mas se analisarmos um situação que o FAST-IA recuperou a capacidade sem precisar refazer o IA. Nós então não precisaríamos usar a informação de GPS para realinhar os feixes evitando a imprecisão causado pelo EG. Como no cenário de LOS o espaçamento entre os IAs é maior, o efeito de se fazer um bom realinhamento é mais significativo. Pois o período que se irá ficar com um combinação de feixes que não produzam um maior taxa é maior em LOS.



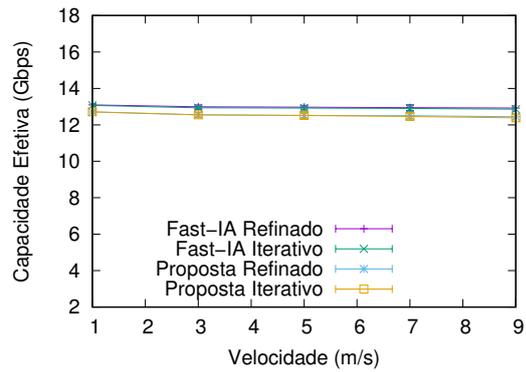
(a) LOS, Erro=5m, Raio=25m



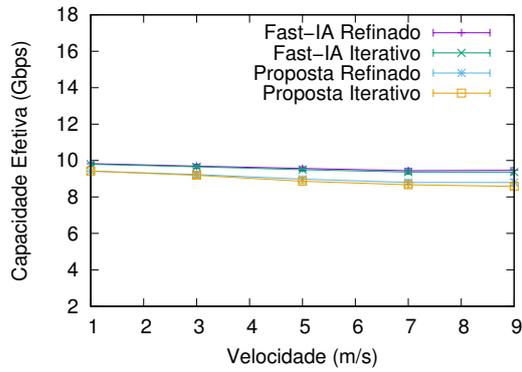
(b) LOS, Erro=5m, Raio=100m



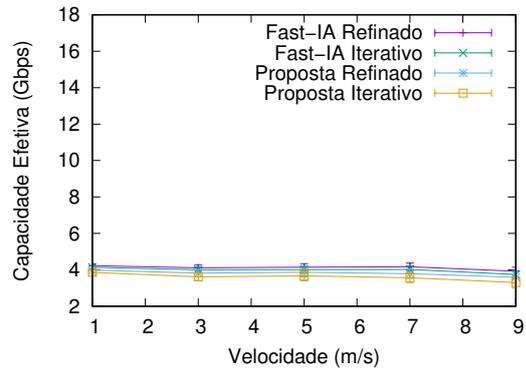
(c) LOS, Erro=10m, Raio=25m



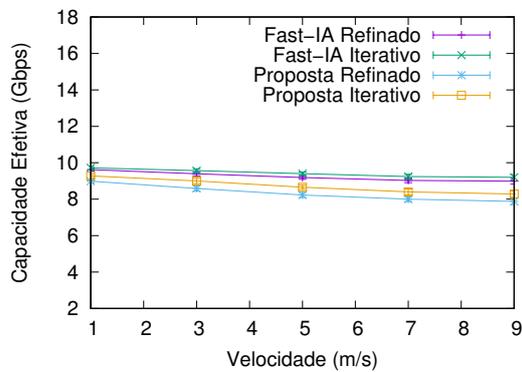
(d) LOS, Erro=10m, Raio=100m



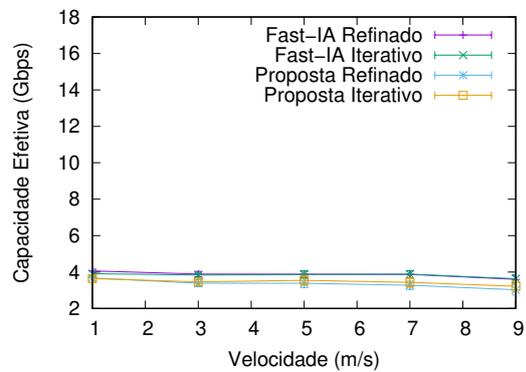
(e) NLOS, Erro=5m, Raio=25m



(f) NLOS, Erro=5m, Raio=100m



(g) NLOS, Erro=10m, Raio=25m



(h) NLOS, Erro=10m, Raio=100m

Figura 5.15: Comparação da capacidade efetiva com e sem o uso do FAST-IA.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

O acesso inicial em redes de ondas milimétricas é uma tarefa importante e que pode influenciar no desempenho da rede. Alguns trabalhos que estudam o problema consideram o uso da geolocalização do USR para acelerar esta tarefa, mas desconsideram possíveis imprecisões nesta informação.

Neste trabalho foi proposto um modelo para a análise do impacto do acesso inicial no desempenho da rede de ondas milimétricas, onde levamos em consideração que o tempo do IA pode afetar diretamente na taxa de transmissão. Então propusemos a métrica chamada de capacidade efetiva, que correlaciona a taxa máxima obtida pela Teoria de Shannon, com o tempo perdido no IA. Então vimos que, dependendo da intermitência do canal e o tempo que o algoritmo leva para executar o IA nossas taxas reduzirão drasticamente. Também foi feito um modelo de mobilidade cuja proposta era simular a configuração de ruas no interior de uma célula milimétrica, no qual o USR se locomoveria.

Foram elaborados dois novos algoritmos de BF que visam lidar com os erros de geolocalização. Os resultados obtidos com a avaliação de desempenho dos algoritmos propostos mostram que eles possuem maior imunidade a erros de geolocalização que o estado da arte na maioria dos cenários avaliados. Este resultado é causado principalmente pelo fato das propostas cobrirem uma maior área angular no entorno da posição indicada pela geolocalização, porém tendo um tempo de IA reduzido.

Em seguida foi proposto um algoritmo que tenta o realinhamento dos feixes sem a execução do IA (**FAST IA**), se mostrando efetivo em todos os cenários, mas teve a sua ênfase nos ambientes que os algoritmos de IA propostos apresentaram as maiores dificuldades. Esse ganho se deu através da redução do tempo gasto em IA, mas como também diminuição das perdas causadas pelo EG.

Em trabalhos futuros pretendemos estender esta análise de desempenho para o novo padrão 5G NR (*new radio*) que não foi considerado e propor novos algoritmos que sejam adaptativos ao erro estimado de geolocalização, a frequência com que o acesso inicial é realizado e também à distância estimada entre EBmm e USR.

Referências Bibliográficas

- [1] RAPPAPORT, T. S., SUN, S., MAYZUS, R., et al. “Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!” *IEEE Access*, v. 1, pp. 335–349, 2013. ISSN: 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
- [2] RANGAN, S., RAPPAPORT, T. S., ERKIP, E. “Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges”, *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 3, pp. 366–385, March 2014. ISSN: 0018-9219. doi: 10.1109/JPROC.2014.2299397.
- [3] WILTSE, J. C. “History of Millimeter and Submillimeter Waves”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 32, n. 9, pp. 1118–1127, Sep. 1984.
- [4] BAI, T., HEATH, R. W. “Analysis of self-body blocking effects in millimeter wave cellular networks”. In: *48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 1921–1925, Nov 2014. doi: 10.1109/ACSSC.2014.7094804.
- [5] BALANIS, C. A. *The Antenna Theory Analysis and Design Book*. John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [6] BARATI, C. N., HOSSEINI, S. A., RANGAN, S., et al. “Directional Cell Discovery in Millimeter Wave Cellular Networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 14, n. 12, pp. 6664–6678, Dec 2015. ISSN: 1536-1276. doi: 10.1109/TWC.2015.2457921.
- [7] GIORDANI, M., MEZZAVILLA, M., BARATI, C. N., et al. “Comparative analysis of initial access techniques in 5G mmWave cellular networks”. In: *Annual Conference on Information Science and Systems (CISS)*, pp. 268–273, March 2016. doi: 10.1109/CISS.2016.7460513.
- [8] GIORDANI, M., MEZZAVILLA, M., ZORZI, M. “Initial Access in 5G mmWave Cellular Networks”, *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 11, pp. 40–47, November 2016. ISSN: 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2016.1600193CM.

- [9] BARATI, C. N., HOSSEINI, S. A., MEZZAVILLA, M., et al. “Directional initial access for millimeter wave cellular systems”. In: *49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 307–311, Nov 2015. doi: 10.1109/ACSSC.2015.7421136.
- [10] BARATI, C. N., HOSSEINI, S. A., MEZZAVILLA, M., et al. “Initial Access in Millimeter Wave Cellular Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 15, n. 12, pp. 7926–7940, Dec 2016. ISSN: 1536-1276. doi: 10.1109/TWC.2016.2609384.
- [11] CAPONE, A., FILIPPINI, I., SCIANCALEPORE, V., et al. “Obstacle avoidance cell discovery using mm-waves directive antennas in 5G networks”. In: *IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 2349–2353, Aug 2015. doi: 10.1109/PIMRC.2015.7343691.
- [12] PENG, H., MORIWAKI, K., SUEGARA, Y. “Macro-Controlled Beam Database-Based Beamforming Protocol for LTE-WiGig Aggregation in Millimeter-Wave Heterogeneous Networks”. In: *IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–6, May 2016.
- [13] WEI, L., LI, Q., WU, G. “Exhaustive, Iterative and Hybrid Initial Access Techniques in mmWave Communications”. In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1–6, March 2017. doi: 10.1109/WCNC.2017.7925666.
- [14] GIORDANI, M., POLESE, M., ROY, A., et al. “A Tutorial on Beam Management for 3GPP NR at mmWave Frequencies”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 21, n. 1, pp. 173–196, Firstquarter 2019. ISSN: 1553-877X. doi: 10.1109/COMST.2018.2869411.
- [15] INOUE, T. “5G standards progress and challenges”. In: *2017 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, pp. 1–4, Jan 2017. doi: 10.1109/RWS.2017.8048566.
- [16] SHOKRI-GHADIKOLAEI, H., FISCHIONE, C., FODOR, G., et al. “Millimeter Wave Cellular Networks: A MAC Layer Perspective”, *IEEE Transactions on Communications*, v. 63, n. 10, pp. 3437–3458, Oct 2015. ISSN: 0090-6778. doi: 10.1109/TCOMM.2015.2456093.
- [17] ALKHATEEB, A., BELTAGY, I., ALEX, S. “MACHINE LEARNING FOR RELIABLE MMWAVE SYSTEMS: BLOCKAGE PREDICTION AND

- PROACTIVE HANDOFF”. In: *2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, pp. 1055–1059, Nov 2018.
- [18] VAITL, C., KUNZE, K., LUKOWICZ, P. “Does On-body Location of a GPS Receiver Matter?” In: *International Conference on Body Sensor Networks*, pp. 219–221, June 2010. doi: 10.1109/BSN.2010.51.
- [19] MENARD, T., MILLER, J., NOWAK, M., et al. “Comparing the GPS capabilities of the Samsung Galaxy S, Motorola Droid X, and the Apple iPhone for vehicle tracking using FreeSim Mobile”. In: *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 985–990, Oct 2011. doi: 10.1109/ITSC.2011.6083141.
- [20] MENARD, T., MILLER, J. “Comparing the GPS capabilities of the iPhone 4 and iPhone 3G for vehicle tracking using FreeSim Mobile”. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 278–283, June 2011. doi: 10.1109/IVS.2011.5940500.
- [21] RENFRO, B. A., STEIN, M., BOEKER, N., et al. “An Analysis of Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance for 2017”. <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/2017-GPS-SPS-performance-analysis.pdf>, 2018. Último acceso: 22/12/2018.
- [22] DJUKNIC, G. M., RICHTON, R. E. “Geolocation and assisted GPS”, *Computer*, v. 34, n. 2, pp. 123–125, Feb 2001. ISSN: 0018-9162. doi: 10.1109/2.901174.
- [23] RAPPAPORT, T. S. *Wireless communications: Principles and practice*. Prentice Hall, 1996.
- [24] AKDENIZ, M. R., LIU, Y., SAMIMI, M. K., et al. “Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 32, pp. 1164–1179, June 2014. ISSN: 0733-8716. doi: 10.1109/JSAC.2014.2328154.
- [25] VISWANATHAN, M. *Simulation of Digital Communication System Using Matlab*. Mathuranathan Viswanathan at Amazon, 2014.
- [26] ZHANG, M., POLESE, M., MEZZAVILLA, M., et al. “Ns-3 Implementation of the 3GPP MIMO Channel Model for Frequency Spectrum Above 6 GHz”. In: *Proceedings of the Workshop on Ns-3, WNS3 ’17*, pp. 71–78, New York, NY, USA, 2017. ACM.