Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Tayssa de Almeida Dominguez Guedes da Costa

Posicionamento a partir de Sinais de TV Digital em Redes de Frequência Única

Rio de Janeiro

2019

Tayssa de Almeida Dominguez Guedes da Costa

Posicionamento a partir de Sinais de TV Digital em Redes de Frequência Única

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Orientadores: Prof. Dr. Lisandro Lovisolo

Prof. Dr. Michel Pompeu Tcheou

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C837

Costa, Tayssa de Almeida Dominguez Guedes da.
Posicionamento a partir de sinais de tv digital em redes de frequência Única / Tayssa de Almeida Dominguez Guedes da Costa. – 2019.
86 f.

Orientadores: Lisandro Lovisolo, Michel Pompeu Tcheou.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Sistemas de identificação por radiofrequência - Teses. 3. Redes neurais (Computação) - Teses. 4. Processamento de sinais - Teses. 5. Televisão digital - Teses. I. Lovisolo, Lisandro. II. Tcheou, Michel Pompeu. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 621.397.132.129

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/ 6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Tayssa de Almeida Dominguez Guedes da Costa

Posicionamento a partir de Sinais de TV Digital em Redes de Frequência Única

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Aprovada em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lisandro Lovisolo (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Michel Pompeu Tcheou (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Rafael Saraiva Campos
Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFET-RJ

Prof. Dr. Cristiano Magalhães Panazio
POLI-USP

Rio de Janeiro

2019

DEDICATÓRIA

A Deus, meu esposo e minha família.

AGRADECIMENTO

A Deus, porque em sua infinita graça me permitiu chegar até aqui, me sustentando e fortalecendo em todos os momentos. Hoje eu consigo ver o cuidado e o amor dEle em cada detalhe. Sem Jesus nada teria sentido.

Ao meu amado esposo, Allan Guedes, que foi incansável, me auxiliando e compreendendo em todos os momentos, principalmente nesta reta final, abrindo mão dos momentos de lazer para que eu pudesse me dedicar ao máximo ao mestrado.

Aos meus pais amados, Roberto e Tamira, por serem minha base, minha inspiração e por todo amor e dedicação que sem estes jamais conseguiria chegar até aqui.

Aos meus queridos orientadores, Lisandro e Michel, pela confiança e por todo apoio que têm me dado desde a graduação até agora. Mais algumas horas de vôo...

Minhas flores, Letícia e Tatyane, que acompanharam a minha saga bem de perto, me incentivaram e estiveram disponíveis para o que eu precisasse. Aos parentes, familiares e amigos pela compreensão da minha ausência em alguns momentos e por toda força e carinho.

In memoriam, Francisca Paz Dominguez, Mãezinha, grande professora que deixou de lado a sala de aula para nos dar lições na vida. E que sempre me perguntava: "O que você está estudando agora?", "Mas você não sossega?", "Você precisa descansar, filha...". Me ensinou a ter força para alcançar meus sonhos, da mesma forma que ela, mulher forte que derrubava os bois pelos chifres, me ensinou a nunca desistir e a amar viver a vida.

Ora, a fé é o firme fundamento das coisas que se esperam, e a prova das coisas que se não vêem.

Hebreus 11.1

RESUMO

COSTA, Tayssa de Almeida Dominguez Guedes. *Posicionamento a partir de Sinais de TV Digital em Redes de Frequência Única.* 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2019.

Neste trabalho, desenvolve-se a localização de dispositivos empregando-se o registro circular da intensidade do sinal recebido das SFNs (*Single Frequency Networks*) ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial*). Assim, compõe-se uma assinatura de radiofrequência (RF *fingerprinting*) a partir das intensidades de campo na área onde se deseja prover o serviço de localização, realizando simulações com o modelo de propagação ITU-R-P1546 e gerando um banco de dados geo-referenciado. Desta forma, aplicam-se as assinaturas de cada radial avaliada simultaneamente para determinação da localização utilizando diferentes medidas de similaridades, como o MSE (Mean Squared Error), correlação circular (CC), intensidade de energia do sinal (E) e estimativa de localização com redes neurais artificiais (ANN). Define-se a configuração dos sistemas de transmissão e recepção e avaliam-se diferentes configurações de redes SFNs, tanto em relação à quantidade de transmissores, quanto à disposição dos mesmos geograficamente. Verificam-se através da CDF (*Cumulative Distribution Function*) os erros de posição obtidos, em metros, com cada uma das medidas aplicadas, a fim de se verificar qual das configurações de rede apresenta um melhor desempenho para a estimativa correta da localização. Demostra-se que a proposta é viável, avaliando-se o município do Rio de Janeiro e obtendo-se um erro médio de 85,3 m com uma rede SFN de 6 transmissores em uma área de 635 Km^2. Em geral, demonstra-se que o aumento de transmissores utilizados por uma ou mais redes traz melhoria de desempenho e o efeito *cross-device* resulta em queda no desempenho das medidas de similaridade, assim como a avaliação sem orientação Norte Verdadeiro (NV), exceto para CC que prescinde desta informação.

Palavras-chave: Radiolocalização, Redes Neurais, Assinaturas de Radiofrequência, Redes de Frequência Única, Sinais de Oportunidade.

ABSTRACT

COSTA, Tayssa de Almeida Dominguez Guedes. *Positioning from Digital TV Signals in Single Frequency Networks.* 86 f. Dissertation (Master in Electronic Engineering) - Faculty of Engineering, University of the State of Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2019.

In this work, the location of devices is developed by using the circular register of the signal intensity received from the SFNs (Single Frequency Networks) ISDB-T (Integrated Services Digital Terrestrial Broadcasting). Thus, a radiofrequency signature (RF fingerprinting) from the field strengths in the area where want to provide the location service, performing simulations with the propagation model ITU-R-P1546 and generating a geo-referenced database. In this way,the signatures of each radial evaluated simultaneously for location determination using different measures of similarities, such as Mean Squared Error (MSE), circular correlation (CC), signal energy intensity (E) and artificial neural network (ANN) location estimation. The configuration of the transmission and reception systems is defined and different configurations of SFN networks are evaluated, both in relation to the number of transmitters, and their arrangement geographically. They are verified through the CDF (Cumulative Distribution Function) the position errors obtained, in meters, with each one of the measures applied, in order to verify which of the network configurations presents the best performance for the correct estimation of the location. It is shown that the proposal is feasible, evaluating the city of Rio de Janeiro and obtaining an average error of 85.3 m with an SFN network of 6 transmitters in an area of 635 km^2. In general, it is demonstrated that the increase of transmitters used by one or more networks performance improvement and the cross-device results in a fall in the performance of similarity measures, as well as the evaluation without True North orientation (NV), except for CC that disregard this information.

Keywords: RF Positioning, Neural Network, RF fingerprinting, Single Frequency Network, Signals of Opportunity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa mundi dos sistemas de TV Digital. 18

Figura 2 - Arranjo linear uniforme de antenas [1]. 21

Figura 3 - Ângulos θ e ϕ utilizados nos transmissores e os $\theta + \pi$ e $\phi + \pi$ utilizados nos receptores. [1]. 23

Figura 4 - Comparação de modulação. 28

Figura 5 - Subportadoras OFDM. 29

Figura 6 - Espectro ISDB-T. 31

Figura 7 - Comparação de configuração dos sistemas SFN e MFN. 32

Figura 8 - Esquema de conexão entre antena de recepção giratória junto ao notebook para armazenamento dos dados e geração do CDB (Correlation Database). 34

Figura 9 - Comparação Tfing com CDB. 35

Figura 10 - Sistema de Varredura da Antena Receptora. 36

Figura 11 - Esquema de funcionamento da técnica apresentada. 37

Figura 12 - Diagrama Horizontal com direção do Sistema Internacional (SI) e Norte Verdadeiro (NV) coincidentes. 38

Figura 13 - Deslocamento no processo de Correlação Circular. 39

Figura 14 - Relação vetorial para análise do produto interno. 40

Figura 15 - Neurônio Artificial. 43

Figura 16 - Topologia de rede *Feedfoward* simples. 44

Figura 17 - Topologia de rede feedfoward com 1 camada escondida. 45

Figura 18 - Topologia de Rede Recorrente 46

Figura 19 - Topologia de Rede Reticulada. 46

Figura 20 - Comportamento de uma função de ativação sigmóide variando de 0 a 1. 48

Figura 21 - Estrutura da Rede Neural. 51

Figura 22 - Desempenho de uma Rede Neural 51

Figura 23 - Desenvolvimento e avaliação do CDB. 52

Figura 24 - Mapa do município do Rio de Janeiro. 53

Figura 25 - Mapa da Região do Maracanã. 53

Figura 26 - Disposição dos transmissores das Redes SFNs. 54
Figura 27 - Definição dos pontos coletados para comporem o CDB e os pontos de teste, nota-se um desalinhamento entre os dois conjuntos. 57
Figura 28 - Áreas de avaliação para (a) erro mínimo e (b) máximo esperados. 58
Figura 29 - Região de análise no município do Rio de Janeiro. 59
Figura 30 - Região de avaliação da área do Maracanã. 59
Figura 31 - Organização do Sistema UTM [2] 62
Figura 32 - Curvas de campo elétrico para diferentes distâncias na ITU-T P.1546 [3]. 64
Figura 33 - Mapa de Cobertura do Mendanha, Transmissor da SFN 1, com o modelo ITU-T P.1546. 66
Figura 34 - Mapa de Cobertura de Botafogo, Transmissor da SFN 2, com o modelo ITU-T P.1546. 67
Figura 35 - Mapa de Cobertura do Sumaré, Transmissor da SFN 3, com o modelo ITU-T P.1546. 68
Figura 36 - Precisão vs. Acurácia, ilustração comparativa entre dois métodos de posicionamento [1]. 70
Figura 37 - Desempenho em função da resolução angular do processo de coleta. 72
Figura 38 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 1, operando no canal 48 UHF com orientação inicial de 0^oNV. 74
Figura 39 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 1, operando no canal 48 UHF com *cross-device* e orientação inicial de 0^oNV. 75
Figura 40 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 1, operando no canal 48 UHF sem orientação inicial de 0^oNV. 76
Figura 41 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 3, com 6 estações, operando no canal 48 UHF com orientação inicial de 0^oNV. 77
Figura 42 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 1, operando no canal 48 e SFN 2, no canal 29 UHF, ambas com 3 estações cada e orientações NV. . 78
Figura 43 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 3, com 6 estações, operando no canal 48 UHF com orientação inicial de 0^oNV. 79
Figura 44 - Posições obtidas nas diferentes medidas de similaridades. 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Tabela comparativa das características dos serviços GNSS. 25
Tabela 2 Características dos modos de operação. 32
Tabela 3 Configurações das Redes usada para Localização. 50
Tabela 4 Coordenadas das Estações de Transmissão. 55
Tabela 5 Espaçamento de medidas e erros esperados 60
Tabela 6 Configurações das Simulações. 60
Tabela 7 Parâmetros dos Sistemas Transmissores e Receptores 71
Tabela 8 Comparação de Desempenho dos Resultados. 78

LISTA DE SIGLAS

AM	*Amplitude Modulation*
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANN	*Artificial Neural Network*
AOA	*Angle of Arrival*
ATSC	*Advanced Television System Committee*
BOC	*Binary Offset Carrier*
CC	Correlação Circular
CDB	*Correlation Database*
CDF	*Cumulative Distribution Function*
CDMA	*Code Division Multiple Access*
CEP	*Circular Error Probability*
CNAV	*Civil Navigation*
DTED	*Digital Terrain Elevation Data*
DTMB	*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*
DTV	*Digital Television*
DVB	*Digital Video Broadcasting*
DVB-T	*Digital VideoBroadcasting Terrestrial*
ERP	*Effective Radiated Power*
E	Energia do Sinal
FDMA	*Frequency Division Multiple Access*
FM	*Frequency Modulation*
GLONASS	*Global Navigation Satellite System*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
GPS	*Global Positioning System*
Hz	*Hertz*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IFFT	*Inverse Fast Fourier Transform*
IG	Intervalo de Guarda
ISDB-T	*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial*
ITU	*International Telecommunication Union*

LOS	*Line of Sight*
LTE	*Long Term Evolution*
MBOC	*Multiplexed Binary Offset Carrier*
MFN	*Multiple Frequency Netwok*
MSE	*Mean Square Error*
NAV	*Navigation*
NLOS	*Non Line of Sight*
NM	Norte Magnético
NV	Norte Verdadeiro
OFDM	*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*
QPSK	*Quadrature Phase Shift Keying*
RF	*Radiofrequency*
RSS	*Received Signal Strength*
SBTVD-T	Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre
SFN	*Single Frequency Network*
SI	Sistema Internacional
SOP	*Signal of Opportunity*
TDOA	*Time Difference of Arrival*
TMBOC	*Time-Multiplexed Binary Offset Carrier*
TOA	*Time of Arrival*
UHF	*Ultra High Frequency*
ULA	*Uniform Linear Array*
VHF	*Very High Frequency*
WLAN	*Wireless Local Area Network*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 16

1 **LOCALIZAÇÃO COM SINAIS DE OPORTUNIDADE** 21

1.1 Técnicas para Localização 21

1.1.1 AOA 21

1.1.2 TOA 22

1.1.3 TDOA 22

1.1.4 RSS 22

1.1.5 RF *fingerprinting* 23

1.2 Sistemas de Localização 24

1.2.1 GNSS 24

1.2.1.1 Comparativo entre os GNSS 24

1.2.2 Localização Usando Sinais de Oportunidade (SOP) 26

1.2.2.1 Sinais de Rádio 26

1.2.2.2 Sinais de Redes Wi-Fi 26

1.2.2.3 Sinais de DTV 27

1.3 Fundamentos de Redes de DTV 27

1.3.1 OFDM 29

1.3.2 Rede SFN e MFN 32

1.4 Estado da Arte 33

2 **POSICIONAMENTO USANDO RF *FINGERPRINTING* E SINAIS DE TV DIGITAL** 34

2.1 Fundamentos do RF *fingerprinting* 34

2.1.1 Sistema de Transmissão e Recepção 35

2.2 Estimativa de Posição 36

2.2.1 *Mean Squared Error* 37

2.2.2 Correlação Circular 39

2.2.3 Energia do Sinal 40

3 **POSICIONAMENTO USANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS** ... 42
3.1 Redes Neurais Artificiais ... 42
3.1.1 Neurônio Artificial ... 42
3.2 Características de ANNs ... 43
3.2.1 Arquitetura ... 44
3.2.2 Quantidade de Neurônios ... 47
3.2.3 Função de ativação ... 47
3.2.4 Treinamento: Obtenção dos Pesos Sinápticos ... 48
3.2.5 Validação ... 49
3.2.6 Teste ... 49
3.2.7 Quantidade de épocas ... 49
3.3 Configuração da ANN para Posicionamento ... 49
4 **METODOLOGIAS DE SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO** ... 52
4.1 Geração do Banco de Dados ... 52
4.1.1 Regiões Geográficas ... 52
4.1.2 Quantidade de Redes SFN ... 54
4.2 Resolução Espacial ... 56
4.2.1 Cenários Simulados ... 60
4.2.2 *Path-Loss* ... 60
4.3 Construção da Base de Dados ... 62
4.3.1 Modelagem de Propagação ... 62
4.3.1.1 Interpolação de intensidade de campo elétrico em função da distância ... 65
4.3.1.2 Interpolação de intensidade de campo elétrico em função da frequência ... 65
4.3.2 Mapa de Cobertura ... 66
4.3.3 Dispositivos Cruzados ... 68
4.4 Critérios de Avaliação ... 69
4.4.1 Acurácia ... 69
4.4.2 Precisão ... 69
4.4.2.1 CDF ... 70

5 **RESULTADOS** 71
5.1 Variação da Resolução Angular 71
5.2 Avaliação na Cidade do Rio de Janeiro 73
5.2.1 Desempenho da Rede SFN 1 73
5.2.2 Desempenho da Rede SFN 1 com *cross-device* 74
5.2.3 Desempenho da Rede SFN 1 sem orientação NV 75
5.2.4 Aumento de Transmissores da Rede 76
5.2.4.1 Desempenho da Rede SFN 3 76
5.2.4.2 Desempenho das redes SFN 1 e SFN 2 77
5.3 Avaliação do Bairro do Maracanã 79
5.3.1 Aplicação da Rede de melhor desempenho - SFN 3 79
5.3.2 Visualização das Posições Estimadas 80
CONCLUSÃO 81
REFERÊNCIAS 83

INTRODUÇÃO

É notável que o uso de serviços baseados em localização têm crescido cada vez mais; aplicações em transporte, alimentação, redes sociais e informação de tráfego têm se tornado essenciais nas atividades diárias de seus usuários e a presença dos serviços de localização na vida da população em geral têm impactado até mesmo sua economia, como apresentado em um estudo realizado pela Comissão Europeia sobre radiolocalização via satélites, que aponta que estes serviços controlam de 6-7% do PIB dos países ocidentais e têm crescido a uma taxa anual de 30% [4].

Contudo, os sistemas de localização amplamente difundidos são dependentes de sistemas satelitais, isto é, de GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Os sinais dos sistemas GNSS encontram-se disponíveis somente enquanto seus proprietários permitirem que os mesmos sejam transmitidos de forma livre e acessível a qualquer dispositivo receptor no mundo. Atualmente apenas 4 países detêm os principais sistemas satelitais para geolocalização, como será apresentado no Capítulo 1. Entretanto, se esses sinais forem criptografados e seu acesso restringido, a informação de localização ficará totalmente restrita aos poucos detentores.

Todas as tecnologias de localização existentes possuem limitações de cobertura física, como o GPS (*Global Positioning System*) e o GLONASS (*Global Navigation Satellite Systems*). Nenhum dos sistemas GNSS é capaz de realizar a localização em ambientes fechados como, por exemplo, dentro de prédios. Uma alternativa que têm surgido é empregar sinais alternativos que possuam maior poder de penetração *indoor*, a destacar-se os sinais de TV Digital (DTV - *Digital Television*).

Os sinais de DTV fazem parte dos sinais de RF (radiofrequência), conhecidos também como sinais de oportunidade (SOP - Signals of Opportunity), isto é, sinais disponíveis ao nosso redor; dentre eles, GSM (*Global System for Mobile*), Wi-Fi e sinais de áudio. Como vantagem, estes sinais podem ter potência e cobertura muito superiores às do GNSS, oferecendo além de penetração nas estruturas dos prédios, um menor custo para implantação. Contudo, a localização a partir deles ainda possui diversos desafios a serem vencidos [5], uma vez que estes sinais não foram desenvolvidos para aplicação de localização. É importante destacar que a utilização de um sinal de oportunidade não acarreta nenhum prejuízo ou interferência ao sistema principal em uso, nem em seu receptor.

Técnicas de multilateração [1] realizam posicionamento baseado em medidas de distância entre pontos de referência e o ponto desejado, com base no tempo de chegada do sinal observado, por exemplo, como o caso do TOA (*Time of Arrival*). Além do TOA também podem ser utilizadas técnicas como TDOA (*Time Difference of Arrival*), AOA (*Angle of Arrival*) e RSS (*Received Signal Strength*) sendo que cada uma delas lida com diferentes medidas ou disposições geométricas de seus transmissores e assim aparecem diferentes níveis de acurácia. Uma solução promissora para localização é a integração de sistemas de localização já em uso com a localização a partir de sinais de oportunidade, como por exemplo, GPS e sistemas de DTV. A potência de transmissão do sinal de TV combinada com o grande número de estações implantadas e disponíveis pode proporcionar um aumento da cobertura e acurácia do sistema de localização.

Desde 1998, a DTV tem sido incluída no serviço de televisão terrestre operando juntamente com a TV Analógica, utilizando assim os espectros de UHF (*Ultra High Frequency*) e VHF (*Very High Frequency*). Atualmente, existem diversos padrões de DTV, como DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*), ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial*), ATSC (*Advanced Television System Committee*) e DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting*). Na Figura 1, encontramos a distribuição destes padrões no mundo, sendo no Brasil empregado ISDB-T, que usa a técnica OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), capaz de mitigar efeitos de multipercurso [4].

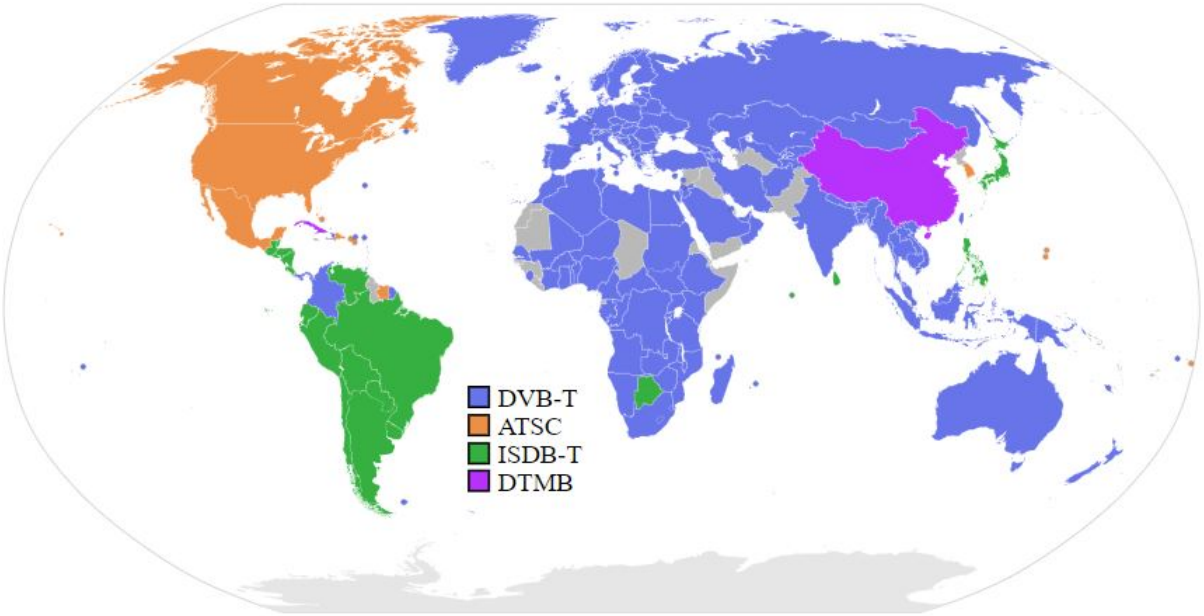


Figura 1 - Mapa mundi dos sistemas de TV Digital.

Alguns desafios devem ser observados ao se utilizar os sinais de TV como sinais de oportunidade. Os relógios dos transmissores de TV são razoavelmente instáveis, o que pode causar erro na estimação do tempo de propagação e consequentemente na estimação da distância e na localização. O sinal de TV sofre um grande efeito do multipercurso, devendo-se explorar ferramentas capazes de mitigá-lo. A disposição geométrica das antenas transmissoras de TV são um grande problema para o posicionamento baseado em sistema de TV, da mesma forma que a geometria dos satélites são cruciais para obter boas estimativas usando o GPS. O sinal de TV Digital tem aparecido com uma promessa para uso no posicionamento, contudo ainda possui grandes dificuldades a se enfrentar, como o receptor distinguir a fonte da qual ela esta recebendo um determinado sinal.

Para obter uma estimativa de posição adequada são necessários ao menos três transmissores de TV espacialmente posicionados. Quanto maior o número de transmissores, maior é a acurácia. Entretanto, a quantidade de transmissores depende das características físicas da região, como o relevo da área de cobertura pretendida, da potência do transmissor, e diversas outras condições. Para obter uma melhor trilateração, os pontos de referência devem estar bem espaçados. No entanto, quando se trata de sinais de TV é notória a concentração de torres em regiões específicas, pois as diversas emissoras buscam características parecidas que permitam uma melhor cobertura na região. Este é um desafio a ser observado no desenvolvimento desta dissertação e superado com o uso

de redes de frequência única (SFN - *Single Frequency Network*) e com a aplicação do RF *fingerprinting*.

Objetivo

Neste trabalho, objetiva-se desenvolver um sistema capaz de realizar a localização com a máxima acurácia possível a partir de sinais de DTV, em ambientes indoor e outdoor, através do uso de uma antena receptora móvel com padrão de coleta circular da intensidade do sinal recebido e sem o uso de sistema GPS ou de satélites. O sistema proposto realiza localização baseada em sinais de TV Digital, um tipo de Sinal de Oportunidade (SOP), e considera o padrão de DTV empregado no território nacional, o ISDB-T, juntamente com a infraestrutura estabelecida, como *sites* de transmissão em operação. Busca-se aproveitar as vantagens do sinal avaliado empregando técnicas e soluções que minimizem ou eliminem as limitações por ele apresentado.

Organização do texto

Este trabalho é composto de cinco capítulos que enfatizam as características, modelagens e aplicações referentes ao uso de sinais de DTV, para determinação da localização de um dispositivo com a maior precisão possível.

No Capítulo 1, apresentam-se as técnicas e os sistemas de localização existentes, define-se de forma sucinta os diferentes tipos de Sinais de Oportunidade (SOP) e suas características, entre vantagens e dificuldades para a utilização de cada um deles. Os avanços em pesquisas e aplicação destes sinais para localização, com destaque nos sinais de TV Digital,que são o enfoque deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a aplicação do RF *fingerprinting* como técnica para determinação da localização juntamente com as medidas de similaridades, cujas características são evidenciadas. Definição do sistema de transmissão e recepção, considerando o uso de referência do Norte Verdadeiro no processo de medição, com o uso da antena receptora de padrão circular e a normalização dos dados são também abordados.

No Capítulo 3, são apresentadas as características das redes neurais artificiais (ANN), seus parâmetros e a configuração utilizada para a determinação da localização através dos sinais de DTV.

No Capítulo 4, o processo de simulação é apresentado, com a definição das áreas avaliadas, resolução e construção da base de dados, configuração das diferentes redes, critérios de avaliação de desempenho do sistema e modelo de propagação utilizado.

O Capítulo 5 traz os resultados obtidos com as simulações realizadas e avalia cada um deles explicando o comportamento apresentado.

A Conclusão confirma a funcionalidade da técnica apresentada nesta dissertação, destaca as melhores medidas de similaridade utilizadas como MSE e CC e associa o nível de ruído obtido ao distanciamento entre as amostras utilizadas na base de dados. Informa o impacto na alteração da quantidade dos transmissores das redes avaliadas e traz sugestões de trabalhos futuros.

1 LOCALIZAÇÃO COM SINAIS DE OPORTUNIDADE

A determinação da localização a partir de sinais de oportunidade apresenta grandes possibilidades de melhorias na acurácia e tem sido utilizada como promissora solução futura na área da localização.

1.1 Técnicas para Localização

Há diversos tipos de técnicas de localização possíveis para determinação do posicionamento de uma Estação Móvel (EM) em relação a uma estação de referência, e com o passar do tempos novas aplicações e melhorias vão sendo desenvolvidas [6].

1.1.1 AOA

O ângulo de chegada, AOA (Angle of Arrival), foi a técnica que deu início ao Posicionamento RF [1], sendo base de muitas aplicações, como radares e rastreamento de objetos. Um exemplo é fornecido pela configuração ULA *(Uniform Linear Array)*, ilustrada na Figura 2, que traz uma disposição colinear com N_A elementos de antenas uniformemente espaçadas de d_A.

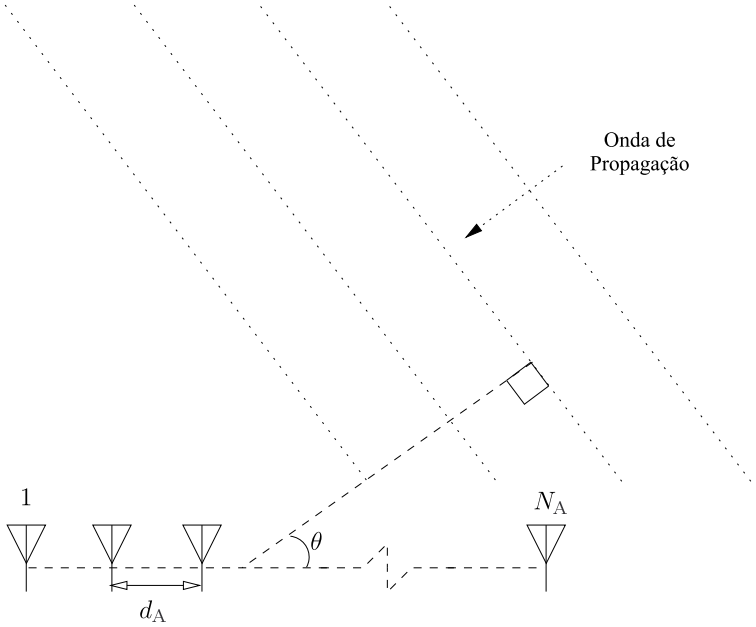


Figura 2 - Arranjo linear uniforme de antenas [1].

Considerando que a antena transmissora esteja instalada a uma distância suficien-

temente grande, isto é, podendo ser considerada como campo distante (*far-field*), a onda de propagação que chega pode ser considerada como plana, com seu ângulo de chegada θ.

1.1.2 TOA

A medida do tempo de chegada (Time of Arrival) requer que o transmissor e o receptor estejam sincronizados [6]. Nesta técnica, também conhecida como tempo de vôo [7], o sinal é definido através de

$$S_r(t) = \sum \alpha_l p(t - lT_s + \Delta(t)) \tag{1.1}$$

onde $p(t)$ é o pulso transmitido, α_l é a amplitude do l-ésimo símbolo, T_s é a duração do símbolo e $\Delta(t)$ atraso de transmissão.

1.1.3 TDOA

A diferença entre tempos de chegada (TDOA) pode ser obtida através de dois ou mais transmissores e um receptor ou vários receptores e um único transmissor [1]. A diferença entre os instantes de chegada determina TDOA que pode ser usada para estimar a posição desejada. A multilateração hiperbólica [1] traz uma grande vantagem em relação aos sistemas TOA pois não requer sincronismo entre os pontos alvo e de referência.

1.1.4 RSS

O RSS (*Received Signal Strength*), Intensidade de Sinal Recebido, é outra maneira de se obter a estimativa de alcance na multilateração circular, calculando a atenuação do sinal pela perda de propagação com base na distância entre o ponto alvo e o de referência.

As medidas de RSS derivam de um sinal de referência cujas características são conhecidas e utilizadas para obter a perda de potência ou atenuação entre o transmissor e o receptor. A definição de RSS_i (dBm) é obtida em

$$\mathrm{RSS}_i(dBm) = P_{t,i}(dBm) - L_{t,i}(dB) + G_{t,\theta,\phi,i}(dB) - Lp, i(dB) + G_{r,(\theta\pm\pi),(\phi\pm\pi),i}(dB) - L_{r,i}(dB) \tag{1.2}$$

onde $P_{t,i}$ corresponde a potência de saída do i-ésimo ponto de referência, $G_{t,\theta,\phi,i}$ é o ganho da antena transmissora, onde θ corresponde ao ângulo horizontal e ϕ ao ângulo vertical, e $G_{r,(\theta\pm\pi),(\phi\pm\pi),i}$ é o ganho da antena receptora, sendo os ângulos de recepção horizontal e vertical definidos, respectivamente, por $\theta \pm \pi$ e $\phi \pm \pi$ em um sistema 3D LOS, estes ângulos aparecem de forma mais clara na Figura 3. O Lp, i é a perda de propagação entre o i-ésimo ponto de referência e o alvo, Lt, i é a perda no receptor e Lr, i a perda no receptor.

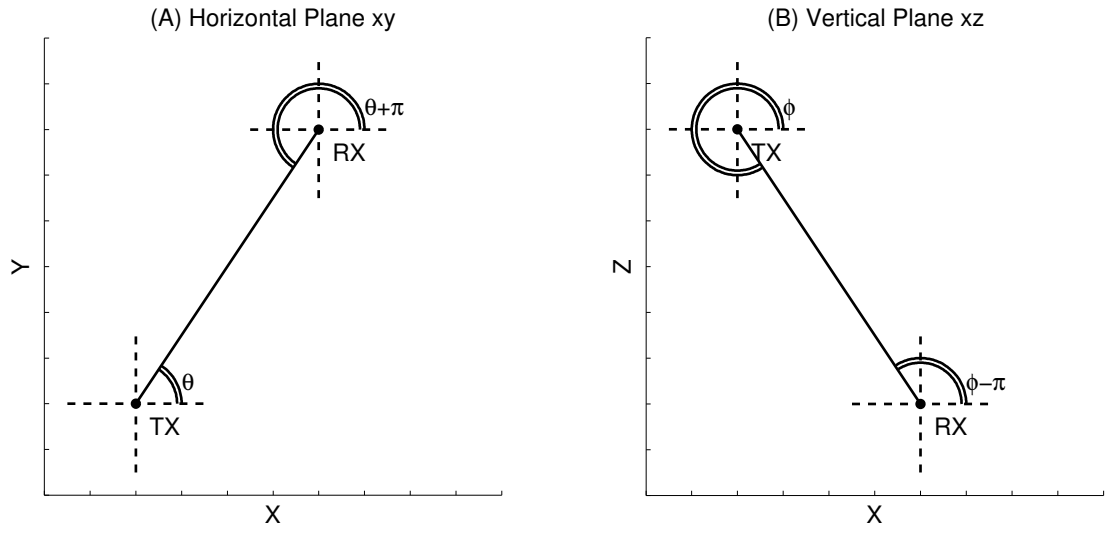


Figura 3 - Ângulos θ e ϕ utilizados nos transmissores e os $\theta + \pi$ e $\phi + \pi$ utilizados nos receptores. [1].

A localização baseada em RSS é mais econômica pois não necessita de investimento em *hardware* ou estrutura adicional [8].

1.1.5 RF *fingerprinting*

Outra técnica que permite a determinação da estimativa de localização com base nas características do sinal RF de avaliação. Esta técnica será apresentada em detalhes no Capítulo 2.

1.2 Sistemas de Localização

As técnicas de localização foram sendo desenvolvidas ao longo dos anos e assim surgiram diversos sistemas. Hoje, várias aplicações desenvolvidas utilizam tais sistemas.

1.2.1 GNSS

Há diversos sistemas de posicionamento global via satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System*). Eles, em geral, empregam constelações de no mínimo 24 satélites, de forma a garantir cobertura de um dispositivo a ser localizado por pelo menos 4 satélites em qualquer região da superfície da Terra, e assim permitir estimar a posição do dispositivo [9]. O GPS (Global Positioning System) é o mais difundido GNSS e foi criado pelo Departamento de Defesa dos EUA, com o intuito de suprir a limitação de serviços anteriormente existentes em sistemas de navegação. Este serviço é disponibilizado para a população sem nenhum custo e seu funcionamento está condicionado ao uso de um dispositivo com receptor GPS.

Outro sistema projetado para usuários civis e militares com serviços equivalentes aos do GPS [1] é o GLONASS. Muitos de seus satélites foram lançados pela União Soviética, a partir de 1982. O sistema foi definido como operacional em 1993 e em 1995 passou a ser composto de 24 satélites.

O sistema COMPASS, também conhecido como BeiDou [1], é um sistema GNSS chinês que possui uma ampla variedade de mensagens de navegação e sua própria referência de tempo. O cálculo de posição pode ser realizado utilizando satélites em órbita LEO, geoestacionários e estações terrenas.

O Galileo é um sistema GNSS desenvolvido pela União Européia e sua Agência Espacial [1]. Este sistema ainda está em fase de conclusão para operar em sua completa capacidade, anunciada para 2019-2020, quando deverá operar com 30 satélites. Alguns serviços oferecidos serão providos autonomamente pelo Galileo, outros contarão com a integração de outros sistemas de posicionamento.

1.2.1.1 Comparativo entre os GNSS

De forma bem resumida, são comparadas as características dos quatro sistemas GNSS na Tabela 1, cujas colunas estão ordenadas cronologicamente pela data de quando

o serviço de GNSS começou ou começará a operar globalmente [1].

Tabela 1 Tabela comparativa das características dos serviços GNSS.

Sistema	GPS	GLONASS	BeiDou (Compass)	Galileo
Proprietário	EUA	Rússia	China	União Europeia
Controle	Governamental	Governamental	Governamental	Civil
Início da Operação	Global in 1994	1995	2012 (Regional)	Primeira posição fixa realizada em 2013
Estado	Operacional em evolução e modernização	Operacional em evolução e modernização	Cobertura restrita Global ≈ 2020	Global ≈ 2020
Altura Orbital	20.2×10^3 km	19.1×10^3 km	21.2×10^3 km	23.2×10^3 km
Período	11h 58m	11h 15m	12h 38m	14h 05m
Evolução por dia sideral	2	17/8	17/9	17/10
Número de Satélites	30	29	Em implantação Planejado para ter 35	Em implantação Planejado para ter 30
Satélites usados para serviço	27 costuma usar 24	24	30 (5 GEO)	27
Frequência de Transmissão	1.57542 GHz (L1) 1.2276 GHz (L2) 1.17645 GHz (L5)	1.602 GHz+n0.5625 MHz (L1) 1.246 GHz+n0.4375 MHz (L2) 1.20714 MHz (L3)	1.561098 GHz (B1) 1.20714 GHz (B2) 1.26852 GHz (B3) 1.17645 GHz (E5a) 1.20714 GHz (E5b)	1.57542 GHz (E1) 1.27875 GHz (E6) 1.191795 GHz (E5)
Multiplexação	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Modulação	BPSK, TMBOC BOC	BPSK BOC	QPSK, BOC, MBOC and AltBOC	BPSK, BOC, CBOC and AltBOC
Mensagem de Navegação	L1 C/A, L1 P, L2 P, L2-CNAV, L5-CNAV, L1C (CNAV2), MNAV	L1OF, L1SF L2OF, L2SF L1OC, L3OC	D1 (no B1) D2 (no B2)	F/NAV (no E5aI), C/NAV (no E6B), I/NAV (E1B and E5bI), G/NAV (E1A and E6A)
Acurácia (tempo)	C/A receptores 5-10 m P/Y receptores 2-9 m 40 ns	4-7 m horizontal 10-15 m vertical 200ns	25 m horizontal 30 m vertical 50 ns	4 m horizontal 8 m vertical 30ns

Dentre as características apresentadas é possível observar que os sistemas apresentados operam em frequências similares e utilizam a mesma técnica de multiplexação, o CDMA. Porém, cada um dos serviços de GNSS é controlado pelo governo de um país diferente e a maioria possui controle militar [1].

1.2.2 Localização Usando Sinais de Oportunidade (SOP)

Os sinais de oportunidade, também conhecidos como SOP [5], são sinais cujas funções principais estão ligadas a um serviço ou função específicos e a denominação oportunidade surge justamente do aproveitamento dos sinais existentes sendo aplicados para outros fins. Existem diversos sinais de oportunidades disponíveis e cada um deles possui características que os faz distinguíveis dos demais e traz consigo benefícios e malefícios marcantes.

Os diferentes tipos de SOP, possuem características específicas de acordo com seus padrões de geração e aplicações. Uma vez que os sinais não são designados para navegação, vários desafios são encontrados quando utilizados para o cálculo de estimativas de posicionamento.

Muitos estudos e artigos têm sido desenvolvidos apresentando os SOP como alternativas na localização independente ou em auxílio a outros sistemas já existentes [10], [11], [12]. Os aplicativos de localização de sistema GPS já solicitam permissão para uso de outros aplicativos e sinais para melhoria da precisão da localização do usuário, utilizando SOP em conjunto com GPS.

1.2.2.1 Sinais de Rádio

Sinais de áudio analógico, como FM (*Frequency Modulation*) e AM (*Amplitude Modulation*), modulados respectivamente em frequência e amplitude, e sinais digitais poderiam ser utilizados para navegação. Seus benefícios estariam na possibilidade de recepção indoor e outdoor, seu baixo custo, área de cobertura muito ampla [8] e grande número de transmissores, que podem proporcionar geometrias que facilitem a determinação da localização. O grande desafio destes sinais é que suas portadoras não carregam nenhuma informação de tempo [5], essencial para estimativa da localização em determinados sistemas, como TDOA. Seus transmissores não estão sincronizados e o sinal é degradado em cenários NLOS (Non Line of Sight) [5].

1.2.2.2 Sinais de Redes Wi-Fi

Os sinais de redes Wi-Fi, do padrão IEEE 802.11b, tornaram as redes locais sem fio (WLAN) mais populares, utilizando radiofrequência em 2,4 GHz. Possui um curto

alcance de seus sinais, sendo assim a área de cobertura se limita a alguns metros, logo os sinais não sofrem efeitos decorrentes das condições geográficas, como montanhas e vales, nem do multipercurso [5]. Contudo, os sinais sofrem interferências de diversos dispositivos e sinais, como *bluethooth*, câmeras de segurança e pontos de acesso de redes via celulares.

1.2.2.3 Sinais de DTV

Sinais de DTV têm sido incluídos no serviço terrestre de TV mundial nas últimas décadas e são bons candidatos de SOP para localização, especificamente para navegação, uma vez que são difundidos em torno de todo o globo [5]. A combinação entre localização e DTV já vem sendo investigada e artigos têm sido publicados utilizando o sinal de *broadcasting* e suas vantagens [12], [5] sobre os sistemas satelitais [10].

Além disso, comparado ao GNSS, a DTV possui forte potência de transmissão do sinal, uma melhor propagação urbana e penetração nas construções, decorrente de sua faixa de frequência de operação (174-698 MHz) e a localização de seus transmissores são conhecidos [11]. No geral, a informação de tempo de transmissão é o grande desafio pois os relógios dos transmissores são imprecisos, o que causa erro na estimação do tempo de transmissão [5].

1.3 Fundamentos de Redes de DTV

Os sinais de DTV ainda estão sendo implantados no território nacional operando na faixa de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*) [13]. A primeira fase da digitalização foi concluída em 9 de janeiro de 2019, o planejamento inicial previa a conclusão ainda no ano de 2018, mas foi adiado, uma vez que algumas cidades não tinham conseguido atingir o percentual mínimo de 90% dos domicílios com acesso ao sinal digital. A conclusão desta fase abrangeu um território total de 1378 cidades com mais de 130 milhões de brasileiros. Nesta primeira fase, o desligamento do sinal analógico foi feito em municípios onde era necessário liberar a faixa de 700 MHz, usada pelas operadoras para oferecer a tecnologia 4G (LTE) de telefonia móvel [14]. Entretanto, o processo de desligamento do canais analógicos (*switch-off*) ainda não acabou, faltam mais de 4 mil municípios, o calendário final para digitalização de todo território brasileiro, incluindo o interior, está previsto inicialmente para 2023 [14]. Mas, anualmente, têm sido liberados

cronogramas que antecipam o desligamento em alguns municípios, a fim de tornar esta transição mais célere.

Os sinais digitais trazem um aumento na qualidade da imagem e som, além de uma maior possibilidade de aplicações interativas e customizadas. Além disso, a inserção desta nova tecnologia também traz um aquecimento no mercado para fábricas e soluções de DTV, receptores e set-top-boxes.

Existem vários padrões de DTV mundialmente implantados como o ATSC e DVB, contudo, o padrão escolhido para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital- SBTVD foi o ISDB-T, que é o padrão japonês.

A base de camada física, que provê a robustez necessária para transmissão em ambientes com forte desvanecimento seletivo em frequência, é a técnica de transmissão por divisão de múltiplas frequências ortogonais (OFDM-*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

O OFDM faz um uso eficiente da largura de banda, pois utiliza menor largura de banda que os esquemas de modulação tradicional em uma determinada taxa de transmissão, como visto na Figura 4 na comparação entre a modulação FDMA, cujo espaçamento entre as portadoras é grande, e a OFDM, com espaçamento estreito das portadoras, neste caso com N portadoras e W largura de banda.

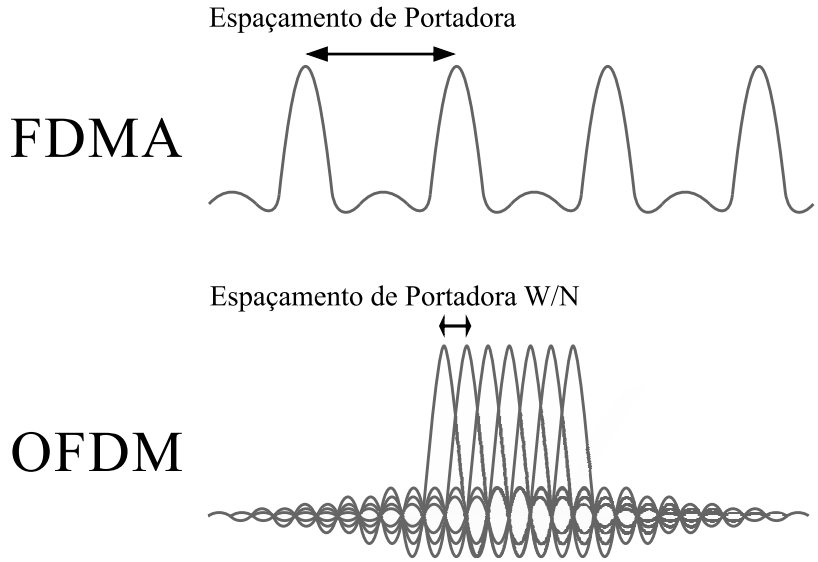


Figura 4 - Comparação de modulação.

O intervalo de guarda (IG) é utilizado a fim de evitar a interferência intersimbólica (ISI) entre os sinais e pode assumir os seguintes valores 1/4, 1/8, 1/16, 1/32. Este

intervalo corresponde ao período sem nenhuma informação acrescentado a cada símbolo transmitido.

O sinal de DTV se torna um grande conjunto de sub-portadoras ortogonais no qual o sinal será multiplexado e o comprimento da IFFT *(Inverse Fast Fourier Transform)* alterado. A IFFT é utilizada na geração do símbolo OFDM. A restrição para o uso das transformadas rápidas é que o número de subportadoras deve ser um múltiplo de 2, por isso encontramos nos padrões de TV Digital, os modos – 2K(2048), 4K(4096) e 8K (8192).

1.3.1 OFDM

O OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) é uma técnica de modulação utilizada por alguns sistemas de DTV, como ISDB-T e DVB-T [15]. Na Figura 5, é possível visualizar a disposição das subportadoras OFDM no domínio da frequência. Essa técnica inclui em seu sinal um símbolo piloto que permite computar a correlação do sinal medido com uma réplica local no receptor e traz uma grande robustez frente ao multipercurso, permitindo o seu uso em redes SFN [7]. A vantagem mais relevante do OFDM é que estas sub-portadoras não interferem umas nas outras, aumentando a eficiência espectral.

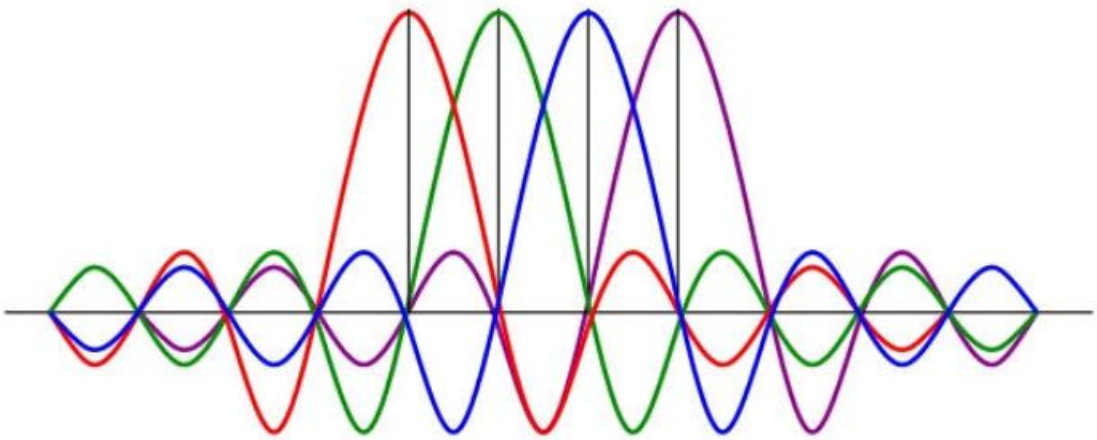


Figura 5 - Subportadoras OFDM.

O sinal transmitido é gerado usando [16]

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X'_k e^{j2\pi \frac{kt}{T}}, \qquad 0 \leq t \leq T \tag{1.3}$$

onde $\frac{1}{\sqrt{N}}$ é um fator de escala, X_k são os símbolos de informação com valores complexos de cada subportadora k definidos na sequência $\{X_k\ ,\ k = 0, 1, ..., K-1\}$ e T é a duração do símbolo.

Os símbolos de informação representam os valores da DFT de um sinal OFDM de multiportadoras, x(t), sendo a modulação de cada portadora em QAM. Para que x(t) seja um sinal de valor real em seus N pontos de DFT $\{X_k\}$ é necessário satisfazer as condições de simetria (sinal real) definidas como [16]

$$X_{N-k} = X_k^*, \quad k = 1, 2, ..., K-1 \tag{1.4}$$

$$X_0' = Real(X_0) \quad e \tag{1.5}$$

$$X_k' = Im(X_0). \tag{1.6}$$

O sinal informação X_0 é dividido em duas partes, real e imaginária, representadas respectivamente por X_0' e X_k'. É conveniente definir $X_0 = 0$ para que a componente dc seja nula, fazendo com que os valores de X_0' e X_k' sejam ambos reais. Desta forma torna-se necessária a apresentação de uma nova sequência de símbolos como $\{X_k'\ ,\ k = 0, 1, ..., N-1\}$ cuja IDFT do ponto N produz uma sequência de valor real.

Assim, fazendo uso das condições de simetria, o sinal OFDM de multiportadoras é expresso como [16]

$$x(t) = \frac{2}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^{K-1} |X_k| \cos(\frac{2\pi kt}{T} + \theta_k) \qquad 0 \leq t \leq T, \tag{1.7}$$

com um total de K subportadoras, $X_k = |X_k| e^{j\theta_k}$, k = 0,...,K-1.

A transmissão hierárquica ocorre através da divisão do canal em camadas. No caso máximo pode-se ter 3 camadas, considerando assim as camadas A, B e C, como ilustradas na Figura 6, onde para cada uma delas seus parâmetros podem ser configurados de forma independente. O sinal de DTV, 6MHz, é dividido em 13 segmentos [17] e as camadas são organizadas na sequência ascendente do nº de segmentos pertencentes a cada uma delas.

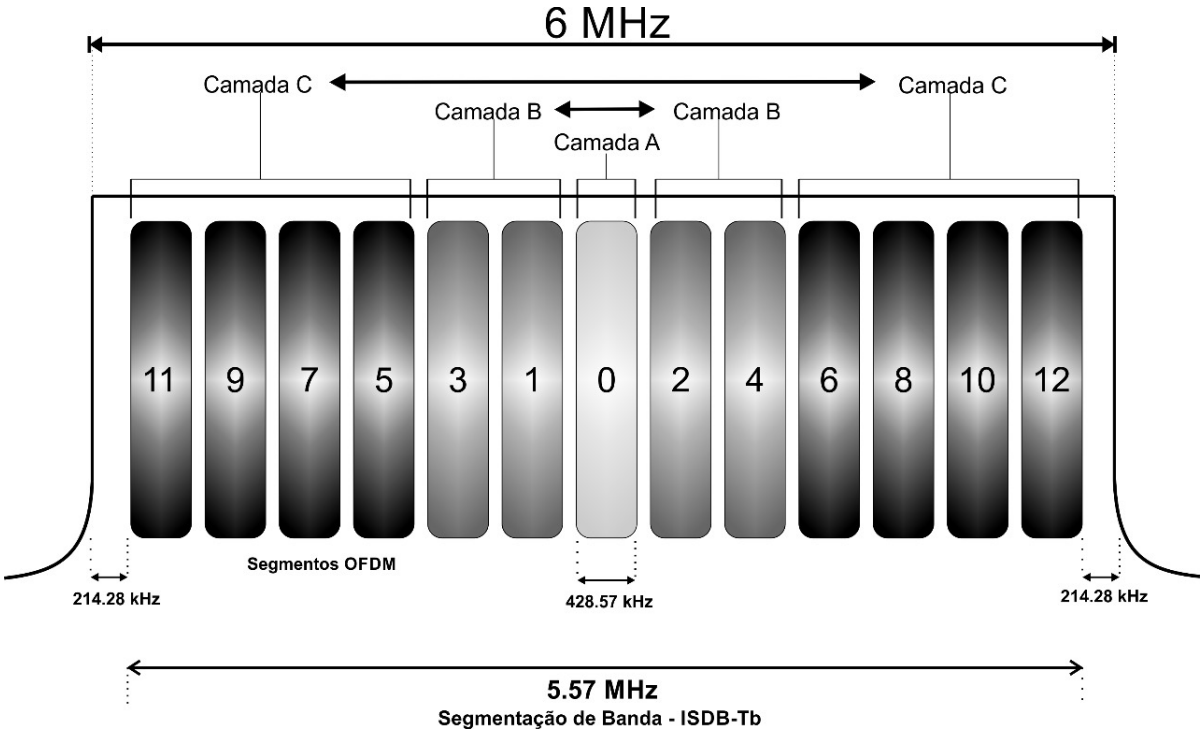


Figura 6 - Espectro ISDB-T.

Cada segmento ocupa 1/14 da banda do canal de DTV [17], o que equivale a 428,57 kHz. A camada A, de segmento central, é destinada ao receptores *one-seg* [18], que possibilitam o acesso a DTV em equipamentos móveis. O sistema de transmissão pode ser configurada em três modos de operação distintos, onde cada modo é baseado no espaçamento das frequências das portadoras OFDM.

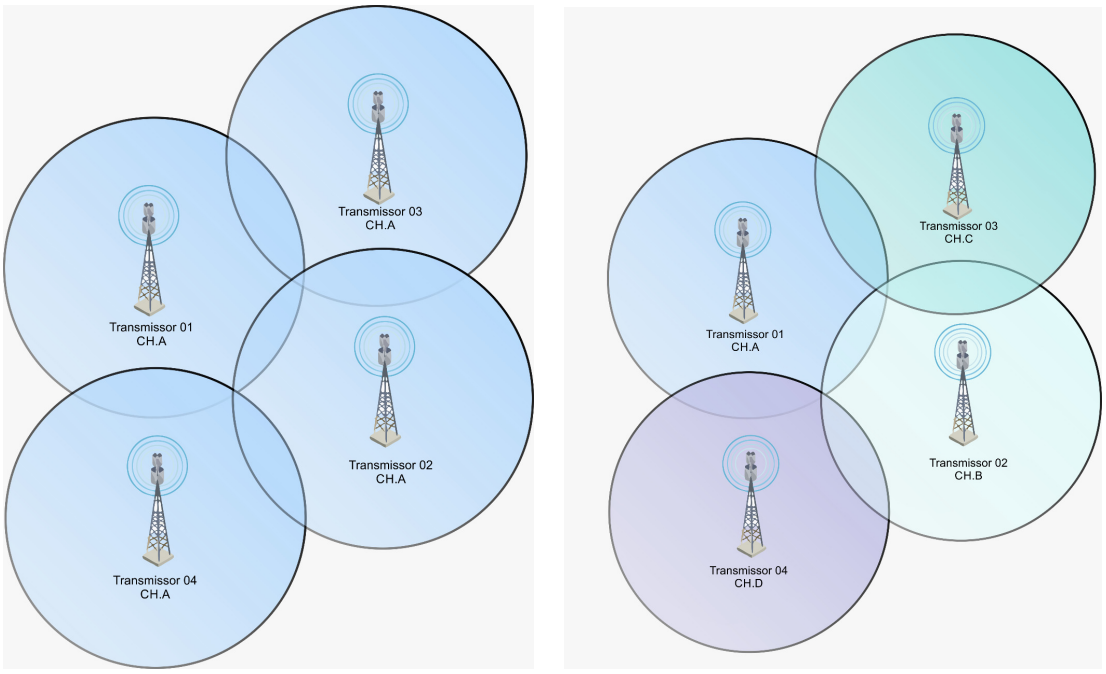
As principais diferenças nas configurações dos modos é apresentado na Tabela 2, juntamente com suas caracteríticas principais.

Tabela 2 Características dos modos de operação.

Parâmetro	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Nº de segmento OFDM	13 segmentos		
Intervalo entre subportadoras	3,968 kHz	1,984 kHz	0,992 kHz
Nº de subportadoras	1405	2809	5617
Modulações Digitais	QPSK 16-QAM DQPSK		
Comprimento de símbolo útil	252 μs	504 μ s	1.008 ms
Comprimento Intervalo de Guarda (IG)	1/4, 1/8 , 1/16 e 1/32		
Nº de símbolos por frame	204		
Entrelaçamento temporal	0 / 4 / 8 / 16		
Entrelaçamento na frequência	Inter-segmento / Intra-segmento		
Código interno	Taxa = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8		
Código externo	Reed Solomon		
Taxa de transmissão	3,65Mbps - 23,23Mbps		

1.3.2 Rede SFN e MFN

A diferença de operação entre SFN (*Single Frequency Network*) e MFN (*Multiple Frequency Network*) pode ser observada na Figura 7, onde temos em (a) a estrutura de uma rede SFN com 4 transmissores operando no mesmo canal (CH.A) e em (b) a estrutura da rede MFN também com 4 transmissores, mas operando com 4 canais diferentes (CH.A, CH.B, CH.C e CH.D).



(a) SFN (b) MFN

Figura 7 - Comparação de configuração dos sistemas SFN e MFN.

A rede de frequência única é amplamente difundida mundialmente, vem sendo implantada por muitas emissoras e apresenta uma perda na transmissão significativamente menor do que em redes que operam com apenas um transmissor [13]. A rede SFN é muito útil na expansão da cobertura para demais regiões próximas ao transmissor principal sem requerer nova frequência de operação, utilizando a mesma frequência. Isso permite um melhor uso do espectro, principalmente em relação à configuração MFN.

O uso dessas redes que operam com mais de um transmissor aumentam a capacidade de cobertura das emissoras, sendo estas capazes de cobrirem regiões de sombra na sua área de contorno de operação com a inserção de estações retransmissoras auxiliares. Outra vantagem, é que o sinal pode ultrapassar o limite municipal, cobrindo a região metropolitana da qual sua estação transmissora faça parte, caso pertença a alguma. Além disso, se trata de sinal de *broadcasting* e o serviço está disponível 24h por dia.

A configuração da rede SFN traz consigo algumas características que fornecem condições necessárias para aplicação na área de localização, como o sincronismo dos transmissores da rede, além de propiciar melhoria de cobertura através do reuso de frequência.

1.4 Estado da Arte

Atualmente encontramos diversos trabalhos que apresentam o uso de sinais de oportunidade em aplicações de localização, tanto comparando diferentes tipos sinais de oportunidade, como DTV, GSM e CDMA 2000 [19], AM/FM e DVBtenikookar2016introduction, quanto para complementar a cobertura do GPS [20]. Com o foco especial no uso de TV Digital, sinal avaliado nesta dissertação, encontramos publicações com uso do padrão ATSC [21], do padrão DVB [22] e com a modulação OFDM [23] que é utilizada no ISDB-T para seu uso em localização indoor [24].

No Capitulo 2 serão apresentadas as medidas de similaridades aplicadas neste trabalho utilizando a intensidade de campo elétrico dos sinais de DTV com base na técnica RF *fingerprinting*.

2 POSICIONAMENTO USANDO RF *FINGERPRINTING* E SINAIS DE TV DIGITAL

Neste trabalho, o sistema de RF escolhido para aplicação de técnicas alternativas para determinação de localização se refere ao sistema de TV Digital, conforme apresentado previamente no Capítulo 1.

No Brasil, o padrão de TV Digital utilizado é o ISDB-T, padrão japonês, que utiliza OFDM como modulação [17].

2.1 Fundamentos do RF *fingerprinting*

O RF *fingerprinting* pode ser usado em diferentes redes sem fio e consiste basicamente de um conjunto de parâmetros específicos extraídos do sinal RF que sejam dependentes da posição, variando assim os parâmetros obtidos de acordo com cada posição avaliada. Estes parâmetros podem ser obtidos de diversas formas em uma posição, e devem ser coletados pelo dispositivo ou estação móvel, ou simulados e armazenados na base de dados de correlação, o CDB (Correlation Database) [1]. Um sistema de coleta com antena receptora de padrão circular é ilustrado na Figura 8.

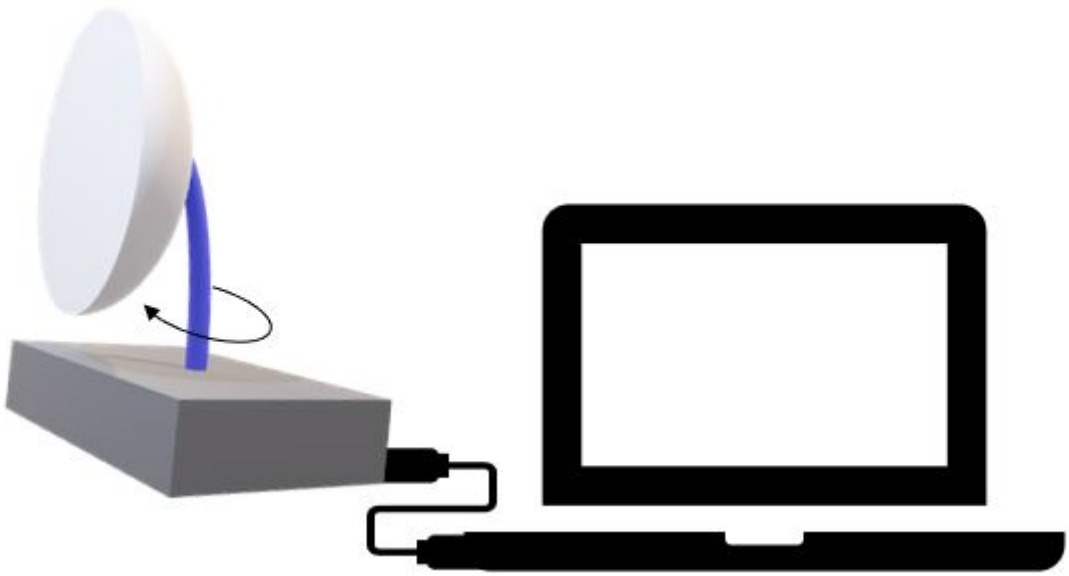


Figura 8 - Esquema de conexão entre antena de recepção giratória junto ao notebook para armazenamento dos dados e geração do CDB (Correlation Database).

Nesta dissertação, o parâmetro escolhido para determinação das posições pela técnica do RF *fingerprinting* é a intensidade de campo elétrico recebido (dBμV/m) em cada ponto avaliado. Os valores destas intensidades de campo são extraídas em várias radiais a cada ciclo completo. Considerando que um ciclo completo ocorre quando um giro de 360º é realizado pela antena receptora em torno de seu eixo fixo e gerando um vetor com estas informações características para cada posição. Este vetor é identificado como $\mathbf{Rfing}_i$ e obtido para cada posição i avaliada, alcançando o valor máximo de N. A configuração das dimensões do CDB são definidas por N linhas e o seu total de colunas pela quantidade de radiais avaliadas. Sendo assim, cada $\mathbf{Rfing}_i$ que carrega os parâmetros de uma posição i de referência corresponde a um único par de coordenadas geográficas.

Uma vez composto o CDB, cada $\mathbf{Tfing}_i$, cuja localização deseja-se descobrir, tem suas informações comparadas com a base de dados, através da observação de suas similaridades a posição i correspondente é obtida, conforme ilustrado na Figura 9, e o par de coordenadas associado a esta linha do CDB será então a localização do ponto avaliado.

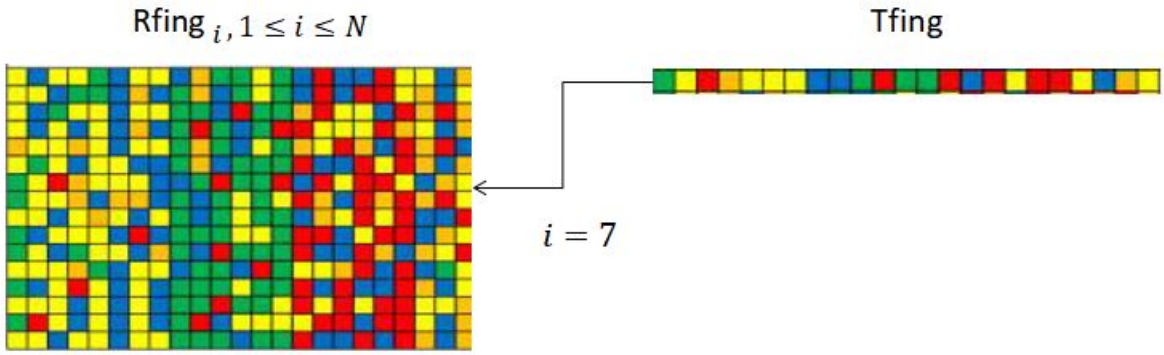


Figura 9 - Comparação Tfing com CDB.

2.1.1 Sistema de Transmissão e Recepção

Considera-se um sistema composto por transmissores ideais, que irradiam a potência igualmente em todas as direções, i.e., considera-se uma antena isotrópica.

A antena de recepção idealizada consiste em uma antena capaz de realizar um giro de 360° e coletar medidas de intensidade de sinal com uma resolução (passo) angular ϕ. Na Figura 10 temos um exemplo do funcionamento de tal antena com passo angular de 30°, que ao final de um giro completo, realizada a varredura angular, gera um vetor com 12 medidas de intensidade de sinal.

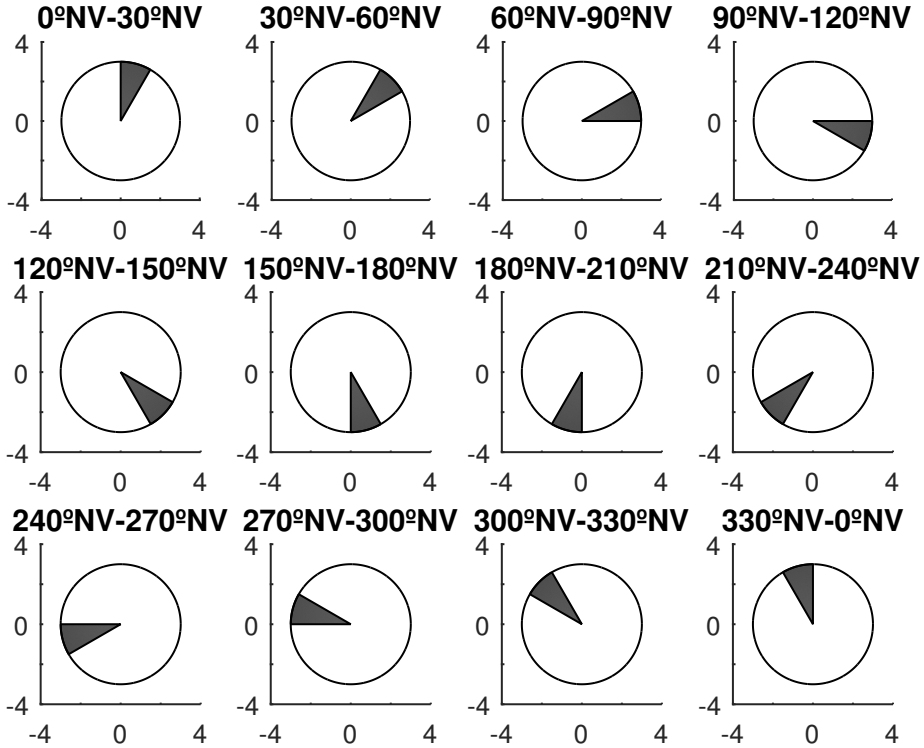


Figura 10 - Sistema de Varredura da Antena Receptora.

Considera-se uma antena suficientemente diretiva, com padrão de ganho como o de antenas de micro-ondas usadas em enlaces ponto-a-ponto. Isso restringe a recepção de intensidade razoável aos casos em visada direta entre transmissor e receptor, o que irá variar conforme a posição angular da antena, caso não ocorra tal situação, a intensidade é considerada nula.

Para estabelecer uma melhor correlação entre os sinais de recepção medidos e os existentes no CDB, é necessária a definição de referências, no caso 0^oNV (Norte Verdadeiro), ou 0^oTN (*True North*), que é a referência padrão nos sistemas de transmissão de TV para orientação das antenas de transmissão, como visto na Seção 2.1.1.1.

A escolha do passo angular utilizado neste trabalho foi de $\phi = 10^o$ e será explicado em detalhes na Seção 5.1.

2.2 Estimativa de Posição

Em um ponto, cuja localização deseja-se descobrir, mede-se as mesmas características gerando um **Tfing**. Este vetor carrega as informações do ponto alvo (*target*), cuja

localização deseja-se descobrir. O processo consiste basicamente dos processos apresentados na Figura 11.

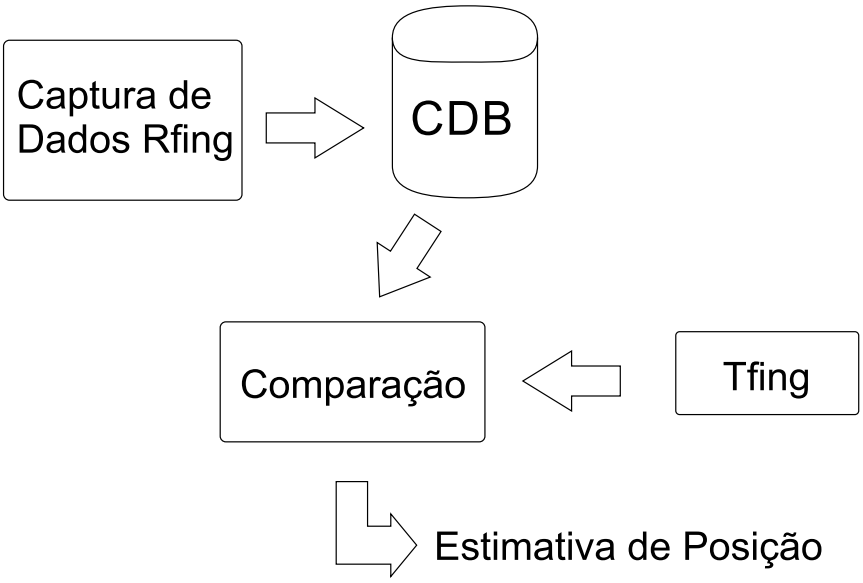


Figura 11 - Esquema de funcionamento da técnica apresentada.

Onde **Tfing** é comparado com cada um dos $\mathbf{Rfing}_i$ do CDB, de maneira que o $\mathbf{Rfing}_i$ mais similar ao **Tfing** pode ser tomado como referência para retornar a localização em latitude e longitude (x_i,y_i) de **Tfing**. Para realizar a estimativa da posição avaliada podem ser aplicadas diferentes medidas de similaridade entre **Tfing** e $\mathbf{Rfing}_i$, a seguir relacionadas.

2.2.1 *Mean Squared Error*

O MSE *(Mean Squared Error)*, erro médio quadrático, é a média da diferença entre os valores de dois vetores elevados ao quadrado. O MSE entre os vetores $\mathbf{Rfing}_i$ e **Tfing** é

$$\mathrm{MSE}_i = E[(\mathbf{Rfing}_i - \mathbf{Tfing})^2] = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(\mathrm{Rfing}_i(n) - \mathrm{Tfing}(n))^2, \tag{2.1}$$

onde N é

$$N = \frac{360^o}{\phi}. \tag{2.2}$$

e ϕ corresponde ao valor de passo angular definido para coleta dos dados [25].

Para a aplicação do MSE são exigidas medidas obtidas com a mesma orientação,

baseadas no Norte Verdadeiro (NV). A orientação referenciada pelo NV é uma prática comum em radiodifusão para estabelecimento do azimute. Consideramos neste trabalho que o Norte Magnético (NM) coincide com o NV, sendo assim, uma vez que conhecemos a existência de um norte magnético, com o simples uso de uma bússola, este serve de referência para as demais direções. As antenas possuem uma marcação de fábrica identificada como 0º do Sistema Internacional (SI), esta referência de 0ºSI é de onde se baseiam a orientação e os diagramas das antenas. Na Figura 12 é apresentado o diagrama horizontal, sem a curva de radiação da antena, demonstrando apenas que os valores de 0ºSI, coincidem com 0º NV, contudo, dependendo do apontamento definido na antena recepção esta orientação pode mudar, mas deve-se buscar seu valor de NV com base na direção do 0º SI.

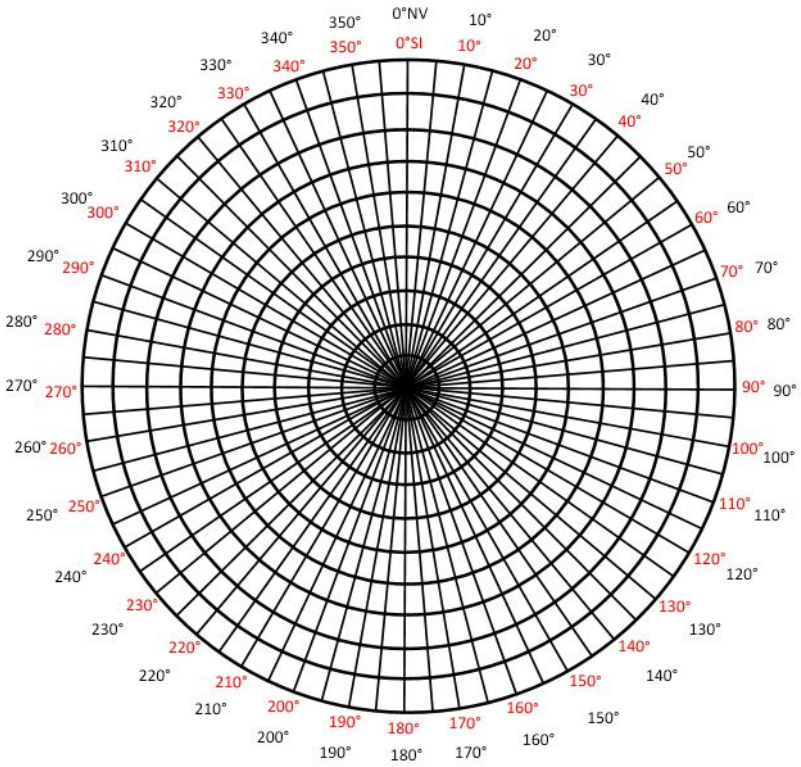


Figura 12 - Diagrama Horizontal com direção do Sistema Internacional (SI) e Norte Verdadeiro (NV) coincidentes.

Sendo assim, após a avaliação dos dados através do MSE a posição i é definida como

$$i = arg \min_{i \in CDB} MSE_i. \tag{2.3}$$

2.2.2 Correlação Circular

Dado dois sinais, $f(n)$ e $g(n)$, no domínio do tempo, é possível definir a correlação circular através de

$$f[n] \circledast g[n] = \sum_{m=0}^{N-1} f[m]g[(n-m)]_N, \tag{2.4}$$

na qual N a quantidade de amostras dos sinais. E $g[(n-m)]_N$ representa $[(n-m)\ mod\ N]$, correspondendo ao resto da divisão de $(n-m)$ por N.

Desta forma o processo de correlação é aplicado com todo os elementos do CDB, obtendo a correlação circular no ponto i como

$$\mathrm{CC}_i = \mathbf{Tfing} \circledast \mathbf{Rfing}_i. \tag{2.5}$$

Uma forma rápida de fazer isso é usar o fato que a correlação circular no domínio do tempo corresponde a multiplicação no domínio da Transformada de Fourier [26]. A correlação circular ocorre com o deslocamento de um de seus vetores realizando a multiplicação dos valores dos sinais a cada deslocamento realizado até que o mesmo retorne a posição inicial, este processo é apresentado na Figura 13, com o deslocamento do círculo interno no sentido horário e o externo permanecendo fixo.

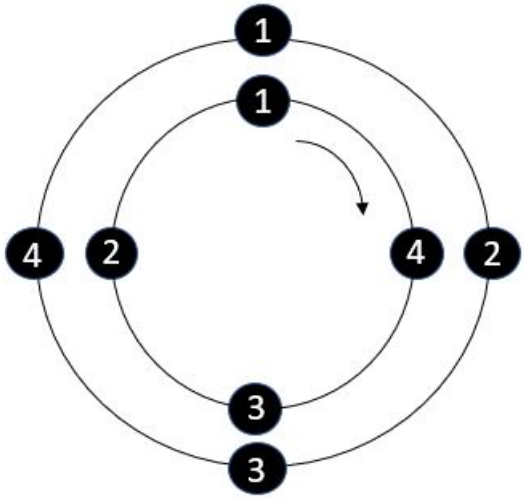


Figura 13 - Deslocamento no processo de Correlação Circular.

Neste caso, considera-se que a correlação circular é realizada entre um vetor $\mathbf{f} = [1, 2, 3, 4]$ e ele mesmo, tendo como resultado após realizar um giro completo, um vetor de

mesma dimensão descrito por $\mathbf{w} = [26, 28, 26, 20]$.

A definição de produto interno, vetorialmente falando, é dada por [27]

$$\langle \overrightarrow{x}, \overrightarrow{y} \rangle = |x||y|cos(\theta) \tag{2.6}$$

e através desta esclarece-se a ilustração na Figura 14, onde os vetores **x** e **y** separados pelo ângulo θ, têm em **z** sua diferença.

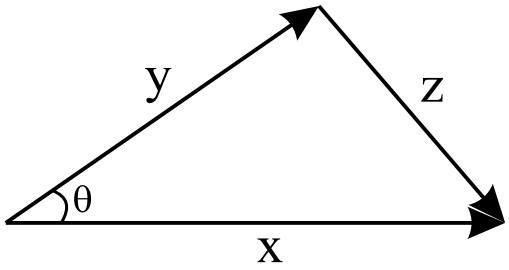


Figura 14 - Relação vetorial para análise do produto interno.

Uma outra forma de compreensão consiste de que são gerados todos os produtos internos dos sinais **Tfing** e $\mathbf{Rfing}_i$ em cada um dos deslocamentos realizados durante o processo da correlação circular, como visto na Figura 13. Desta forma a correlação circular prescinde da informação de NV para determinação da localização.

É possível notar a relação entre o produto interno, e também da correlação circular, com o MSE, dado que quando o valor de MSE for nulo, o produto interno apresentará seu resultado máximo e assim será fácil ver que o comportamento MSE e CC estão inversamente ligados. Uma grande vantagem da CC é que esta prescinde da orientação do NV.

Sendo assim, após a avaliação dos dados através da CC a posição i é definida como

$$i = arg \max_{i \in CDB} CC_i, \tag{2.7}$$

onde i equivale a linha do CDB com a coordenada geográfica correspondente.

2.2.3 Energia do Sinal

A energia de um sinal é classicamente definida como [28]

$$\mathrm{E} = \int |s(t)|^2 dt \tag{2.8}$$

contudo, para sinais discretos a energia é obtida por

$$\mathrm{E}_i = \sum_{n=1}^{N} |\mathbf{Rfing}_i(n)|^2, \tag{2.9}$$

gerando diferentes valores de energia para cada posição i. Busca-se através da comparação deste valores de energia de cada Rfing com a energia do sinal de Tfing definida como

$$\mathrm{E}_{Tfing} = \sum_{n=1}^{N} |\mathbf{Tfing}_i(n)|^2. \tag{2.10}$$

Assim, a posição é estimada através de

$$i = arg \min_{i \in CDB} |E_i - E_{Tfing}|, \tag{2.11}$$

através da menor diferença entre as energias dos sinais comparados, resultando na posição i do CDB.

De certa forma, a varredura circular realizado pela antena de recepção avaliando a energia do sinal a cada passo angular tomado equivale ao comportamento de uma antena omnidirecional.

Para balanceamento dos dados, normalizou-se cada $\mathbf{Rfing}_i$ pela Norma Euclidiana, também conhecida como l_2 e definda como

$$||\mathbf{Rfing}_i||_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^{N} |\mathrm{Rfing}_i[k]|^2}, \tag{2.12}$$

esta foi a normalização aplicada aos $\mathbf{Rfing}_i$, em que $\mathbf{Rfing}_i[k]$ representa o k-ésimo elemento do vetor $\mathbf{Rfing}_i$, que possui comprimento N. Da mesma forma este processo de normalização é aplicado a cada **Tfing** avaliado. Após o processo de normalização os vetores são identificados como $\mathbf{Rfingn}_i$ e **Tfingn**, utilizada em CC.

Neste capítulo, foram apresentadas as formas de obtenção das estimativas de localização através das técnicas de similaridade, que utilizam diretamente RF *fingerprint*, que são o MSE, CC e E. A seguir, no Capitulo 3, será apresentada outra forma de estimativa de localização com aplicação de redes neurais artificiais.

3 POSICIONAMENTO USANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

3.1 Redes Neurais Artificiais

O surgimento das Redes Neurais Artificiais, ANN (*Artificial Neural Network*), corresponde ao sonho antigo da construção de uma máquina ou mecanismo autônomo dotado de inteligência. Elas são inspiradas nos neurônios biológicos e na estrutura altamente paralela do cérebro que possui a capacidade de adquirir, armazenar e utilizar conhecimento experimental. O tema começou a ser fortemente pesquisado nos anos 90, contudo, pesquisas têm sido publicadas há mais de 50 anos [29]. As Redes Neurais estão inseridas na área de sistemas inteligentes e possuem diversas aplicações, como classificação de padrões, reconhecimento facial e controle de aparelhos eletrodomésticos, eletrônicos [30] e também em localização [31], [32].

Uma rede neural pode ser dividida em 3 camadas, com suas características voltadas para localização:

- Entrada - Recebe informações do meio externo para o processamento pela rede neural, ou seja, onde são inseridos os dados de medição obtidos em um determinado ponto cuja localização deseja-se descobrir.

- Escondida - Extrai as características associadas ao sistema ou processo a ser inferido e com base no treinamento realizado na rede processa os dados de entrada a fim de fornecer os dados de saída.

- Saída - Produz e apresenta os resultados finais da rede, informando assim a localização estimada do ponto cujas medições de entrada são correspondentes.

3.1.1 Neurônio Artificial

Cada neurônio é uma unidade de processamento fundamental na formação de uma rede neural e sua estrutura é apresentada na Figura 15.

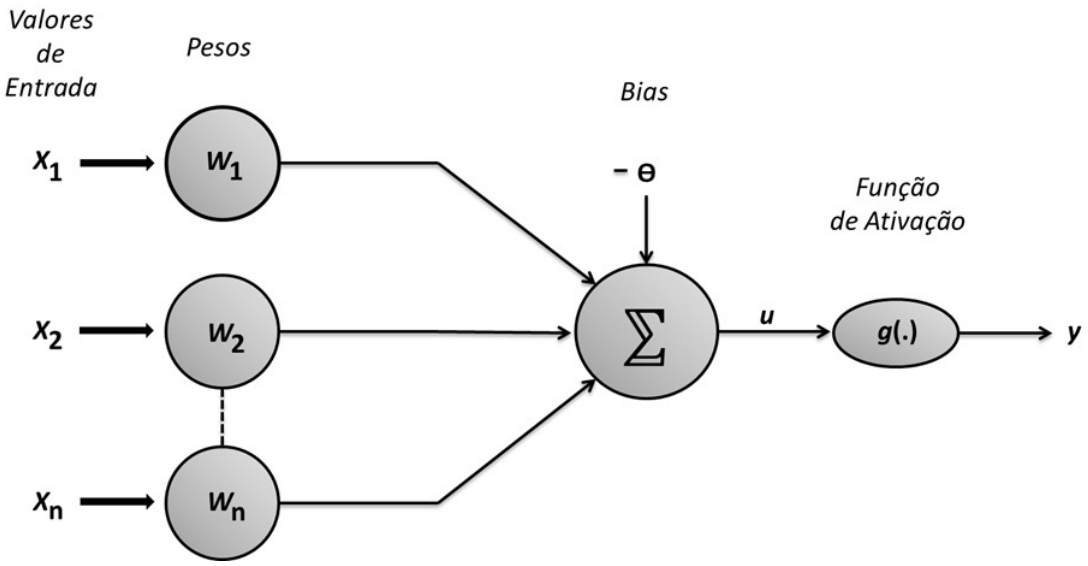


Figura 15 - Neurônio Artificial.

Na estrutura tem-se as variáveis de entrada $[x_1, x_2, ..., x_n]$, que trazem informações do sinal de interesse para modelagem pela rede, que são multiplicadas pelos pesos sinápticos $[w_1, w_2, ..., w_n]$, responsáveis por estabelecer a ponderação de cada variável segundo sua relevância. Ao chegar no combinador linear (Σ) estes valores são subtraídos do bias (θ), que estabelece o limiar de ativação, para verificar se o potencial de ativação será positivo, produzindo um potencial excitatório, ou negativo, produzindo um potencial inibitório. Uma vez o potencial de ativação seja positivo, o sinal u passa pela função de ativação resultando no sinal de saída y.

Desta forma, um neurônio é descrito matematicamente por duas equações, onde

$$v = \sum_{j=1}^{n} w_j x_j \tag{3.1}$$

caracteriza a saída do combinador linear e

$$y = g(u) = g(v - \theta) \tag{3.2}$$

aplica a função de ativação no potencial de ativação [33].

3.2 Características de ANNs

As redes neurais possuem características específicas.

3.2.1 Arquitetura

A arquitetura da rede neural artificial leva em conta a disposição de seus neurônios, bem como suas interligações e camadas. Diversos tipos de arquiteturas podem ser utilizados, como *feedfoward* de camada única, ou de camadas múltiplas, redes recorrentes e reticuladas [29].

A arquitetura Feedfoward de camada simples, também conhecida como *feedfoward* de camada única, é ilustrada na Figura 16. A rede é formada por uma camada de entrada e apenas uma camada de neurônios, correspondente à camada de saída. A quantidade de saídas da rede corresponde ao número de neurônios da camada de saída. Esta rede é aplicada em classificação de padrões e filtragem linear [34].

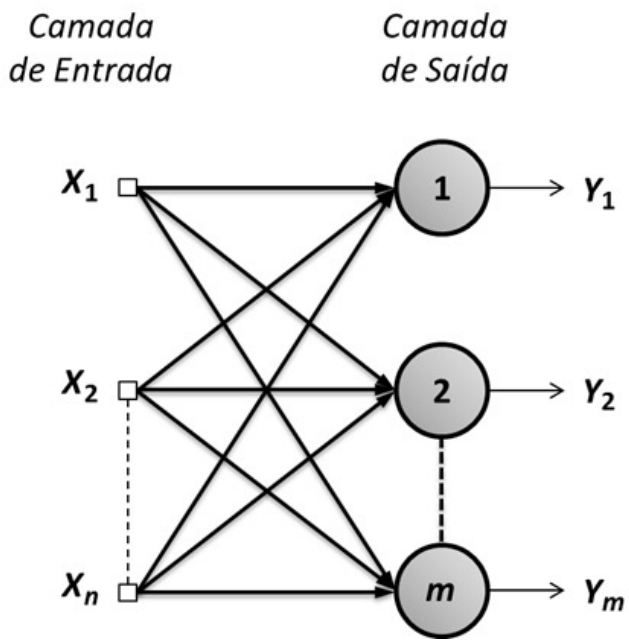


Figura 16 - Topologia de rede *Feedfoward* simples.

Numa rede *feedfoward* de camadas múltiplas, a arquitetura é similar à anteriormente vista, contudo, existe uma ou mais camadas escondidas de neurônios, como visto na Figura 17. Um exemplo de rede que utiliza esta arquitetura é a *Multilayer Perceptron*, aplicada em diversos problemas como aproximações de funções, robótica e controle de processos [29].

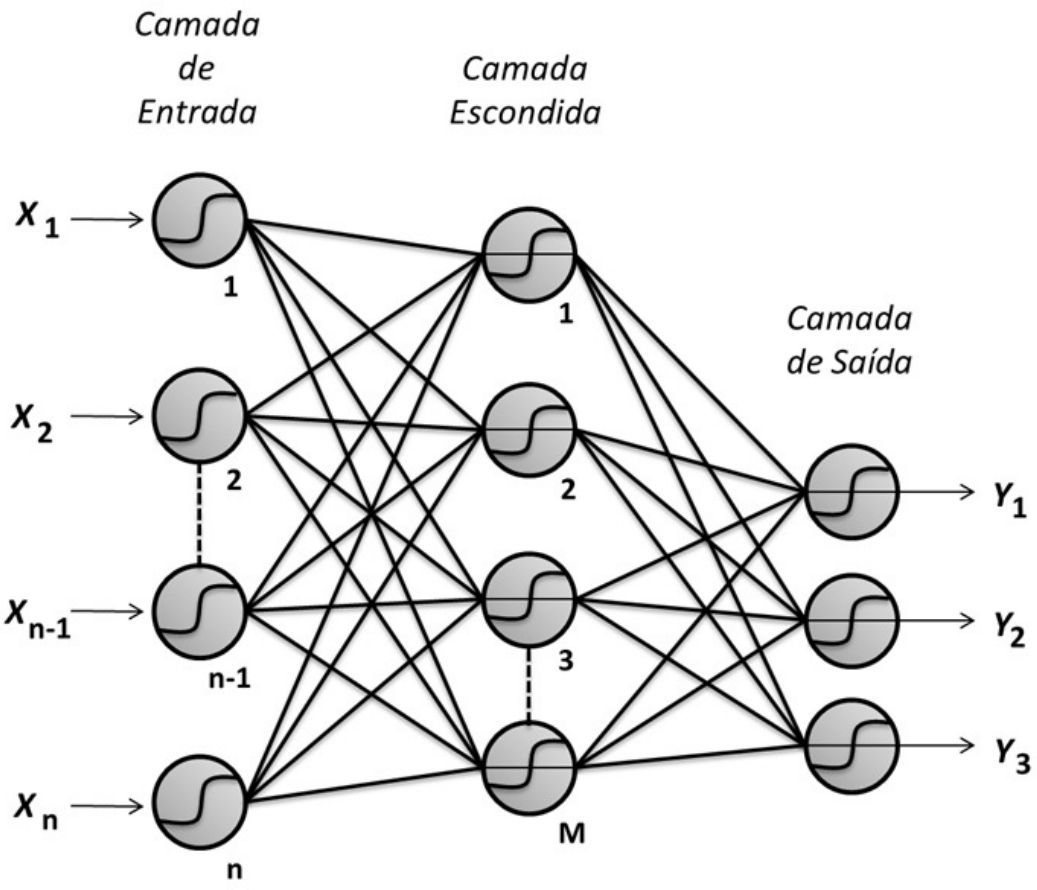


Figura 17 - Topologia de rede feedfoward com 1 camada escondida.

As redes que utilizam arquiteturas recorrentes têm suas entradas realimentadas pelos neurônios da camada de saídas, como apresentado na Figura 18. Esta arquitetura de realimentação permite que as redes sejam aplicadas em sistemas variantes no tempo, como previsão de séries temporais [35]. Conhecidas redes que utilizam estas arquitetura são a *Hopfield* [36] e *Perceptron* [37].

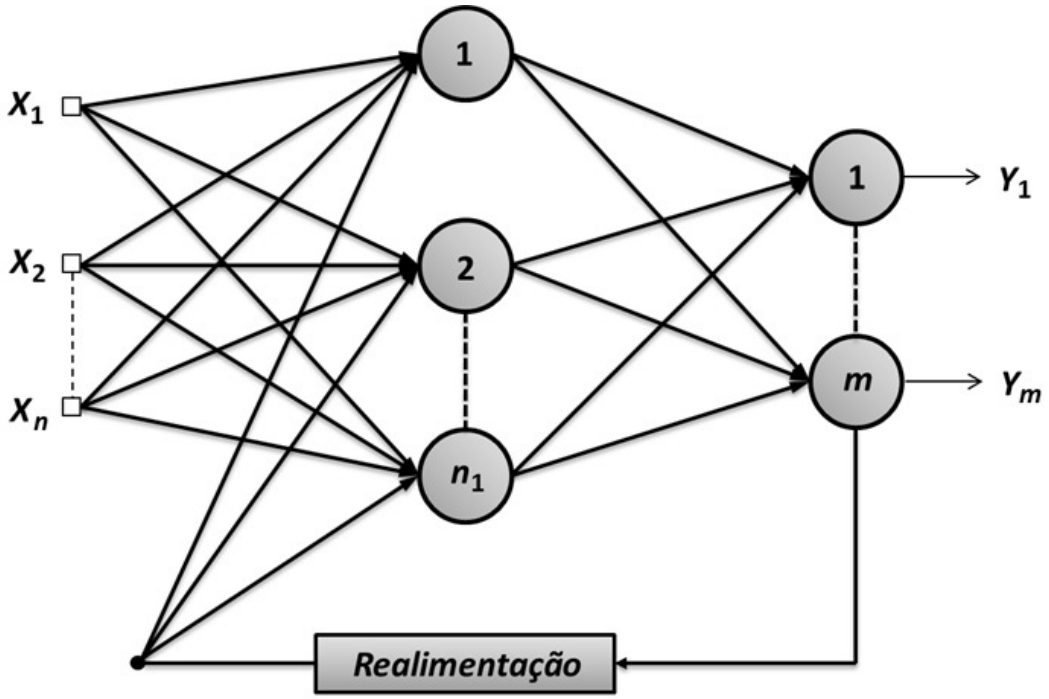


Figura 18 - Topologia de Rede Recorrente

A principal representante da arquitetura em estrutura reticulada é a rede *Kohonen* [38], sua arquitetura apresenta uma disposição espacial de neurônios bem diferente das demais, como visto na Figura 19, e os sinais de entrada são inseridos em todos os neurônios da rede.

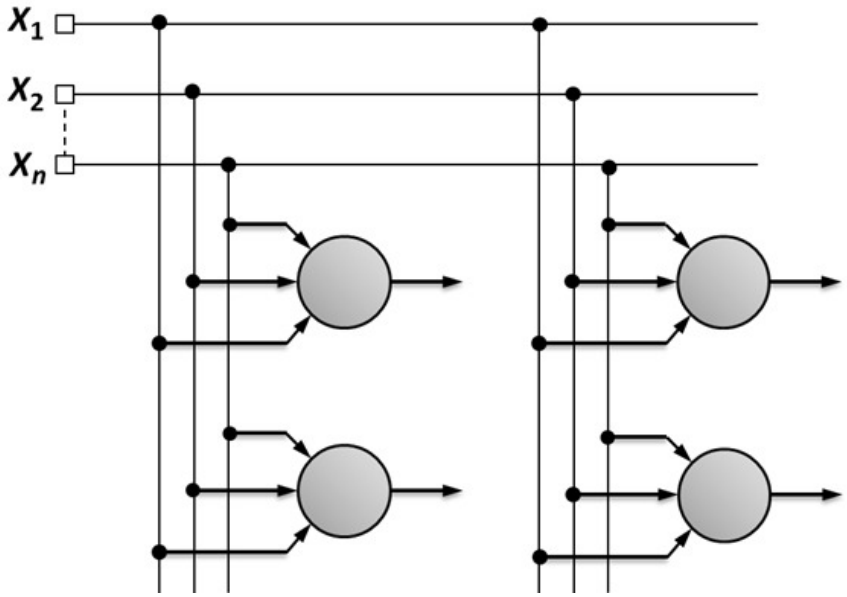


Figura 19 - Topologia de Rede Reticulada.

3.2.2 Quantidade de Neurônios

Neurônios artificiais formam um conjunto de unidades de processamento simples interligados por um grande número de interconexões que funcionam como as sinapses cerebrais. A quantidade de neurônios na camada escondida influencia na capacidade de processamento. Quando super dimensionada, ou seja, havendo um número de neurônios muito acima do necessário para a quantidade de dados avaliados, pode ocorrer que a rede sofra um *overfitting*. Neste caso, a rede só responde corretamente aos dados conhecidos de treinamento, já dados novos ou de teste é incapaz de avaliar. E quando subdimensionada, ocorre o *underfitting*, onde a rede não é capaz de aprender, ou seja, não responde corretamente nem aos pontos de treinamento utilizados.

3.2.3 Função de ativação

Existem vários tipos de função de ativação: linear, degrau, tangente hiperbólica e etc [39]. Estas funções são as responsáveis por limitarem o nível de ativação do neurônio, ou seja, sua amplitude de sinal de saída dentro de uma faixa de valores desejados a serem assumidos, e a escolha das mesmas deve ser feita de acordo com o desempenho para cada caso avaliado especificamente. O comportamento de uma função sigmoide é definido por

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{3.3}$$

e é umas das funções mais utilizadas como função de ativação de neurônios [40] e foi utilizada como função de ativação da camada escondida das ANNs utilizadas neste trabalho, sua forma é apresentada na Figura 20.

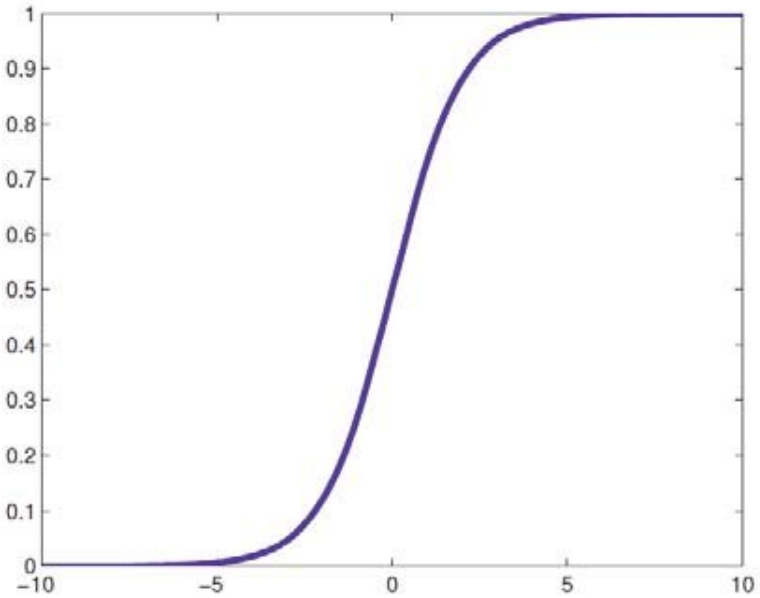


Figura 20 - Comportamento de uma função de ativação sigmóide variando de 0 a 1.

O volume total de dados é dividido randomicamente em três grupos, que correspondem às etapas de "uso"da rede neural: Treinamento, validação e teste. Cada um desses grupos possui funções específicas durante o processo de configuração da rede neural artificial. Quanto maior a base de dados e parâmetros (características) dos dados de entrada, melhor a rede conseguirá ser ajustada em seus pesos sinápticos de maneira que seu funcionamento seja razoável não só para entradas conhecidos, mas também para as desconhecidos.

3.2.4 Treinamento: Obtenção dos Pesos Sinápticos

Deseja-se que a maior quantidade de dados seja destinada ao processo de treinamento para um melhor ajuste da rede, uma vez que os valores iniciais dos pesos sinápticos devem ser ajustados durante o processo de treinamento com base na diferença entre os resultados produzidos pela rede avaliada e os valores desejados na saída. É justamente o ajuste dos pesos sinápticos, de acordo com o erro gerado, que garante o ajuste da rede. Algumas funções de treinamento, responsáveis pelo ajuste dos pesos, comumente usadas são o *Levenberg-Marquardt*, mais rápido mas consome mais memória durante o processamento, e o *Scaled Conjugate Gradient*, consome menos memória [41] e possui uma velocidade de convergência um pouco maior. Ambos interrompem o processo de treinamento quando a

generalização da rede para de melhorar, ou seja, quando o desempenho dos dados de validação começa a cair. Outra também conhecida função é a do *backpropagation*, o algoritmo de treinamento mais utilizado pelas ANNs. Seu modo de treinamento é supervisionado e o ajuste dos pesos é feito pelo algoritmo do gradiente descendente [39].

De acordo com os dados de entrada apresentados o treinamento pode ser supervisionado, ou seja, para cada valor de entrada existe um determinado valor de saída, ou não supervisionado, sem esta relação direta entre dados de entrada e saída, onde a própria rede se auto-organiza em relação aos elementos do conjunto de amostras identificando subconjuntos com similaridades.

3.2.5 Validação

Estes dados são utilizados para avaliar o nível de generalização da rede, ou seja, avaliação da capacidade de responder corretamente a dados que não foram utilizados no processo de treinamento, pois utiliza-se outra porcentagem de dados destinada para esta etapa que não pertencem ao conjunto de treinamento. Deseja-se encontrar a rede com melhor capacidade de generalização, este é o principal objetivo do processo de aprendizado, de maneira que a rede forneça saídas coerentes para entradas desconhecidas por ela.

3.2.6 Teste

São dados usados para avaliar o desempenho da rede treinada. Quando o volume de dados é pequeno, muitas vezes opta-se por não se utilizar esta divisão, apenas o treino e validação.

3.2.7 Quantidade de épocas

É a quantidade de vezes em que a base de dados de treinamento é utilizada para o ajuste dos pesos sinápticos da rede.

3.3 Configuração da ANN para Posicionamento

Para cada CDB gerado, com diferentes grades de resolução verificados, transmissores utilizados e redes SFN's aplicadas, novas redes foram treinadas e criadas. Contudo,

suas configurações e características se mantiveram muito similares e na Tabela 3 estas características são apresentadas.

Tabela 3 Configurações das Redes usada para Localização.

Entradas	36
Pesos sinápticos	Iniciados aleatoriamente
Limiar (θ)	Iniciados aleatoriamente
Saídas	2
Divisão dos dados	Treino - 70% Validação - 15% Teste - 15%
Processo de Treinamento	Supervisionado
Arquitetura	*feedfoward*
Camada escondida	1
Neurônio/camada	15
Função de treinamento	*Scaled Conjugate Gradient.*
Função de ativação	Sigmóide

A aplicação das ANNs utiliza o CDB apenas como base de dados de treinamento da rede, subdividindo-o em grupos de treino, validação e teste, com diferentes percentuais do CDB utilizado. O processo de treinamento supervisionado garante que para cada valor de Tfing, intensidade de campo elétrico obtido em um ponto desconhecido, seja associada uma saída com as coordenadas da posição estimada. Os pesos e o limiar são iniciados aleatoriamente.

A arquitetura utilizada, *feedfoward*, é apresentada na Figura 21, ilustrando a configuração da rede com 36 entradas, uma camada escondida formada com 10 neurônios e 2 neurônios na camada de saída, que correspondem às informações de latitude e longitude que se deseja estimar.

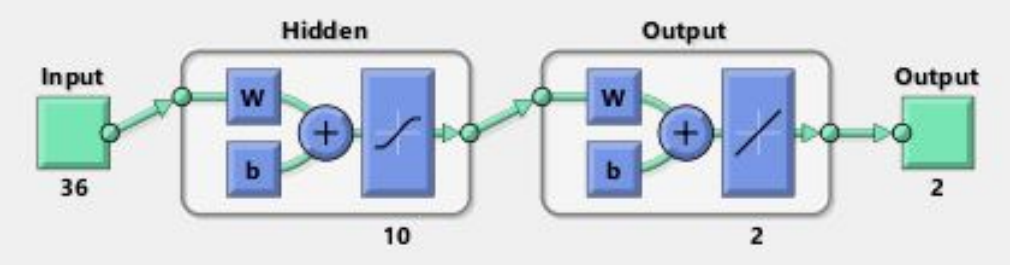


Figura 21 - Estrutura da Rede Neural.

Após o todo o processo de treinamento da rede é gerado na Figura 22 o gráfico de desempenho obtido em cada uma das etapas em cada época utilizada e a parada antecipada ocorre a fim de se manter a configuração da melhor performance obtida pela etapa de validação.

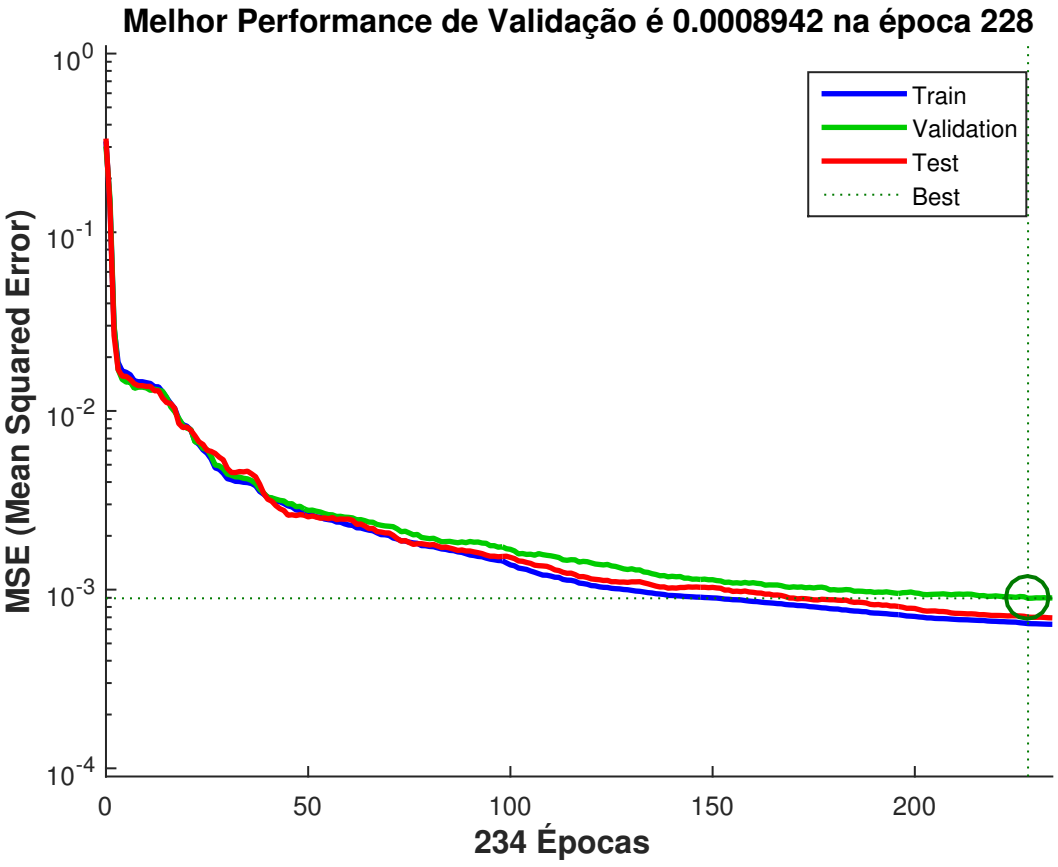


Figura 22 - Desempenho de uma Rede Neural

4 METODOLOGIAS DE SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO

Esta dissertação visa desenvolver e apresentar uma técnica para a determinação da localização de um dispositivo usando sinais de redes de TV Digital. Anteriormente, nos Capítulos 2 e 3, propusemos as medidas de similaridade para esse fim. Neste capítulo, apresenta-se a metodologia de simulação que é esquematizada pela sequência de etapas mostrada na Figura 23. Basicamente, o processo é dividido em 1) a geração da base de dados, o CDB, i.e., a fase de treino; e 2) posteriormente, tem-se a fase de teste para avaliação da técnica de localização através das medidas de similaridade definidas. Todas as etapas foram realizadas usando o MatLab.

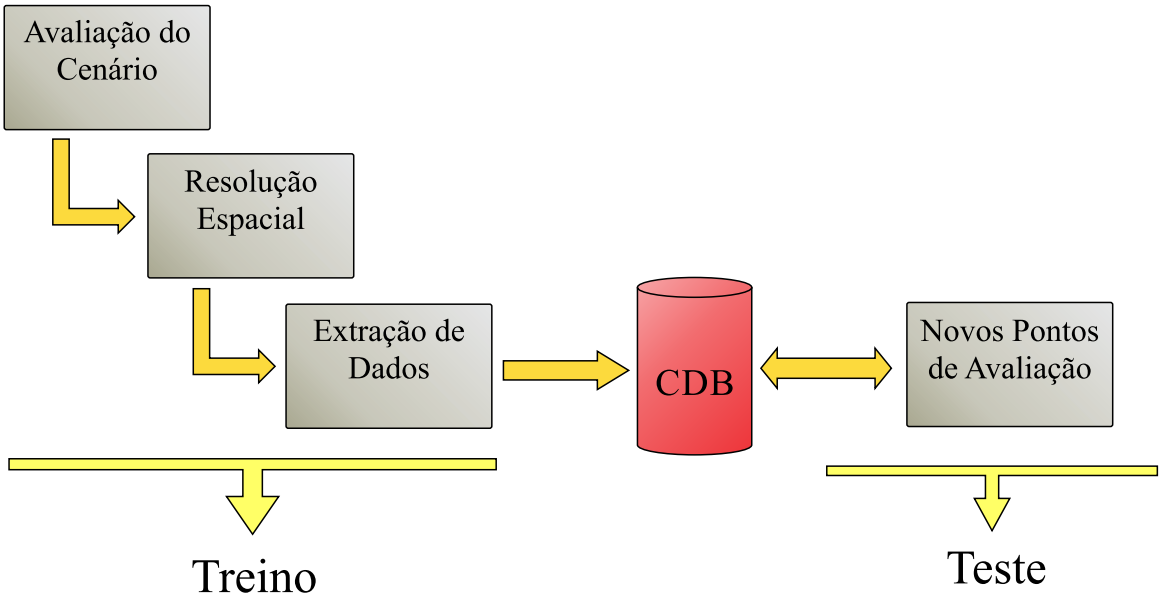


Figura 23 - Desenvolvimento e avaliação do CDB.

4.1 Geração do Banco de Dados

4.1.1 Regiões Geográficas

Neste trabalho, a área de avaliação ou interesse é o município do Rio de Janeiro, região mostrada na Figura 24 em destaque com um contorno vermelho. Sua a área total é de aproximadamente 1.200 Km^2.

Figura 24 - Mapa do município do Rio de Janeiro.

Reduz-se a área territorial de avaliação para uma sub-área do município do Rio de Janeiro, o bairro do Maracanã, cuja área é observada na Figura 25, correspondendo a aproximadamente 4 Km^2.

A redução da área de avaliação visa estimar a acurácia obtenível em diferentes escalas territoriais usando a estratégia e técnica proposta.

Figura 25 - Mapa da Região do Maracanã.

4.1.2 Quantidade de Redes SFN

Foram empregadas 3 redes SFNs com diferentes configurações de seus transmissores, onde 2 destas redes são avaliadas operando com mesmo número de transmissores mas com canais e configurações geográficas distintas de suas estações transmissoras. As disposições das estações das SFNs são apresentadas na Figura 26.

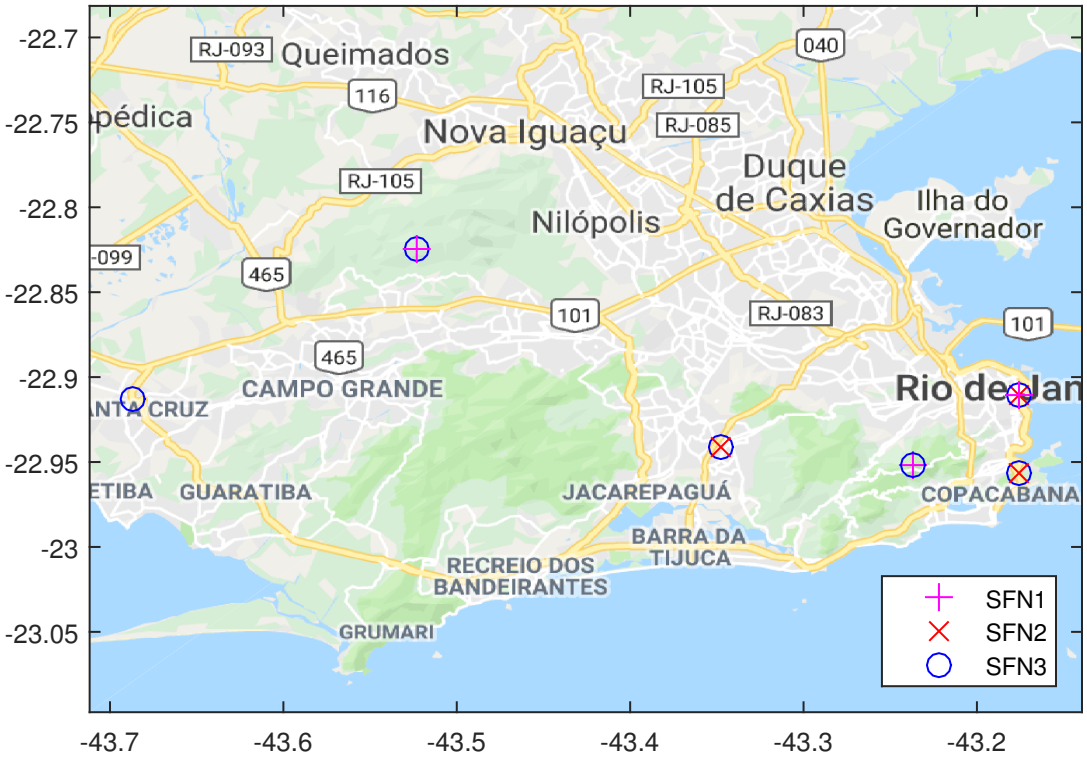


Figura 26 - Disposição dos transmissores das Redes SFNs.

As redes empregam diferentes quantidades de transmissores com disposições variadas, como pode ser observado na Tabela 4, sendo que SFN 1 e SFN 2 são compostas de 3 transmissores cada e a SFN 3 emprega 6 transmissores, co-localizados com os transmissores das redes SFN 1 e SFN 2. A posição das estações transmissoras foram escolhidas com base em estações reais de diversas emissoras localizadas no Rio de Janeiro como disponibilizadas pela Anatel [42].

Tabela 4 Coordenadas das Estações de Transmissão.

Estações por Rede SFN			
Rede de Uso	Tx	Latitude	Longitude
SFN 1	1	-22.951	-43.237
	3	-22.824	-43.523
	6	-22.910	-43.175
SFN 2	2	-22.957	-43.176
	4	-22.941	-43.347
	6	-22.910	-43.175
SFN 3	1	-22.951	-43.237
	2	-22.957	-43.176
	3	-22.824	-43.523
	4	-22.941	-43.347
	5	-22.913	-43.686
	6	-22.910	-43.175

As SFNs possuem dois ou mais transmissores e existe diversas formas de se calcular a intensidade de sinal resultante em um determinado ponto de interesse, através de métodos numéricos ou aproximações analíticas a ser avaliado, considerando-se as diferentes fontes de emissão envolvidas. Dentre todos, utilizou-se o método de Soma de Potências [43], com o qual é possível obter-se, aproximadamente, o valor resultante dos campo F_Σ [dBμV/m]. Assim, temos

$$\mathbf{P} = 10^{\frac{\mathbf{F}}{10}} \tag{4.1}$$

$$\tag{4.2}$$

onde o vetor $\mathbf{F}$, contendo os campos elétricos medidos em diferentes orientações, é convertido em um vetor $\mathbf{P}$, que possui um total de n posições. Em seguida suas posições são

somadas resultando em

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{P}(i) \tag{4.3}$$

$$\tag{4.4}$$

após isto, seu somatório convertido no campo médio resultante

$$F_{\Sigma} = 10 \times \log_{10}(\mathrm{P}_{\Sigma}) \;\; [dB\mu V/m]. \tag{4.5}$$

4.2 Resolução Espacial

A resolução espacial empregada na construção do CDB, em função das áreas avaliadas, são definidas de acordo com o espaçamento de pontos de avaliação. Na Figura 27, o espaçamento apresentado corresponde a uma distância de 0,0001^o (no globo terrestre), ou seja, aproximadamente 11,12 m. Os pontos de coleta para formação do CDB aparecem em vermelho e os de teste em azul.

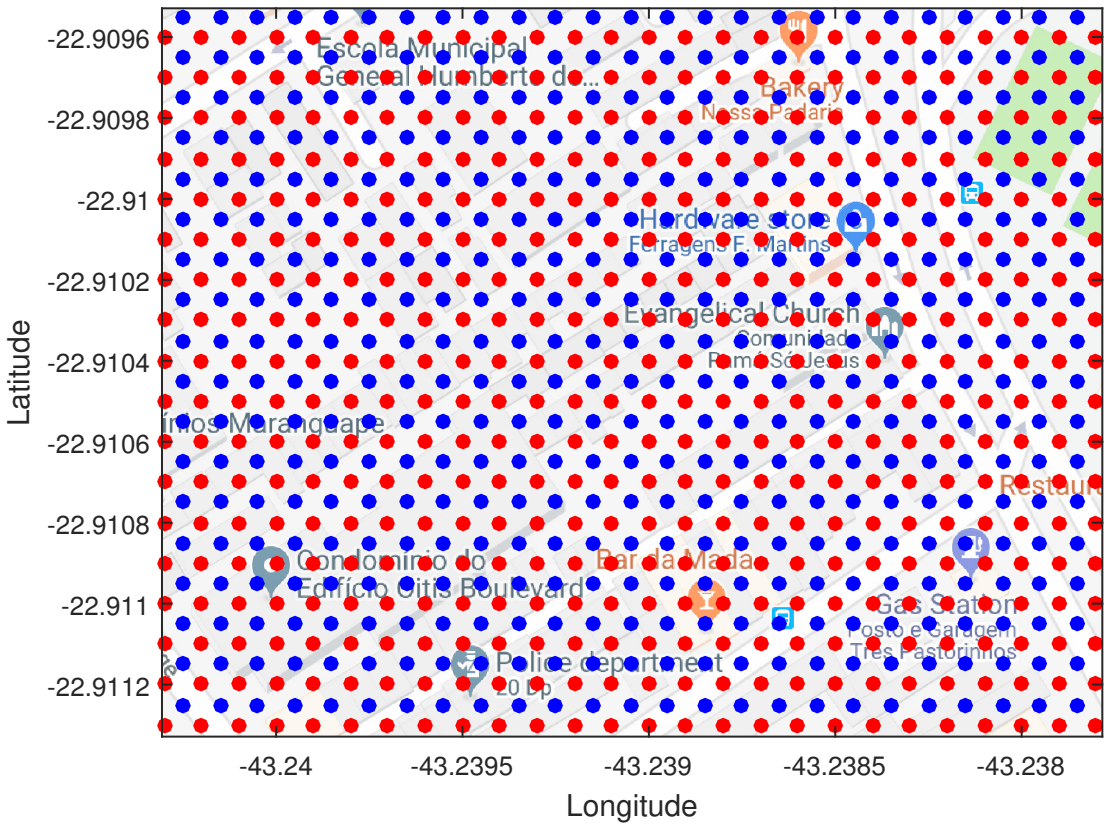


Figura 27 - Definição dos pontos coletados para comporem o CDB e os pontos de teste, nota-se um desalinhamento entre os dois conjuntos.

Esta ilustração apresenta claramente a disposição dos pontos avaliados e que os mesmos são obtidos em coordenadas diferentes, ou seja, os pontos de coleta do CDB estão em posições geográficas distintas dos pontos de teste. Esta configuração é importante para garantir que se possa avaliar os CDBs com os métodos sem *overfitting*, já que os dados de teste não serão os mesmos utilizados na construção da base de dados.

Espera-se que o erro de localização esteja diretamente ligado com a área analisada, conforme Figura 28, para os valores de (a) erro mínimo e (b) máximo esperados. Sendo (d_e) a distância de espaçamento, que é a distância mínima de separação entre os pontos adjacentes de coleta da CDB, h a altura e l o comprimento da área avaliada.

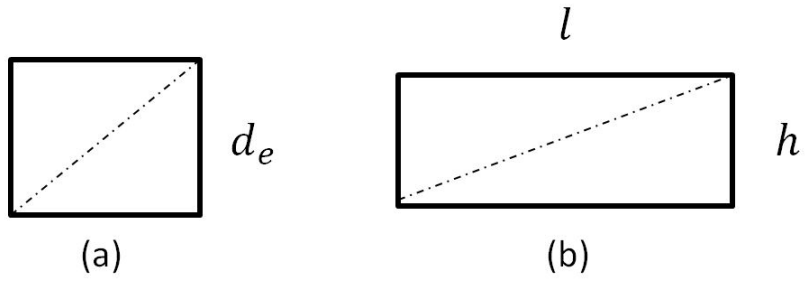


Figura 28 - Áreas de avaliação para (a) erro mínimo e (b) máximo esperados.

Uma vez que os pontos de teste estão posicionados no centro do quadrilátero (a), cujos vértices são quatro pontos de treinamento igualmente espaçados entre si por (d_e), o erro de localização mínimo é

$$\min_{\text{Tfing,Rfing}} e = \frac{d_e\sqrt{2}}{2}. \tag{4.6}$$

Também é possível dizer que o erro de localização máximo, isto é, o pior caso, é definido por

$$\max_{\text{região}} e = \sqrt{h^2 \times l^2} = k \times d_e, \tag{4.7}$$

que corresponde à diagonal do quadrilátero (b) formado pela área total da região avaliada e sendo k um número natural.

Quanto menor o espaçamento entre os pontos de medidas, maior a quantidade de padrões no CDB, como ilustra a Tabela 5. Desta forma, para a maior área avaliada, Rio de Janeiro, foi utilizado d_e equivalente a 0,001^o, correspondente a uma distância aproximada de 0,11 Km, como apresentado na Figura 29, de forma a manter a complexidade computacional aceitável.

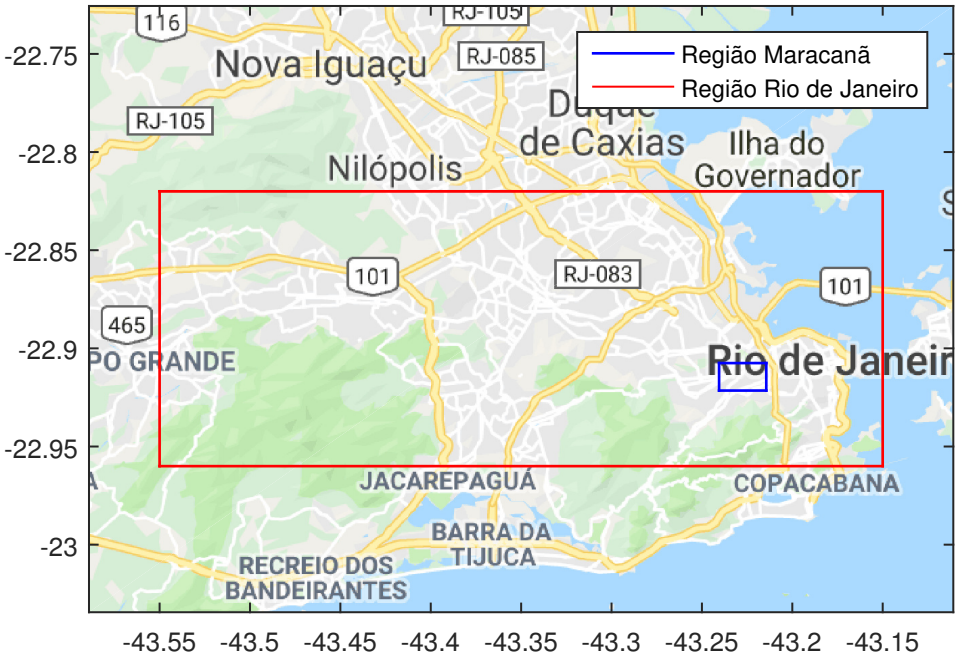


Figura 29 - Região de análise no município do Rio de Janeiro.

Conquanto, na menor área, o bairro do Maracanã, d_e equivale a 0,0001^o, apresentado na Figura 30 que como anteriormente mencionado é igual a 11,12 m.

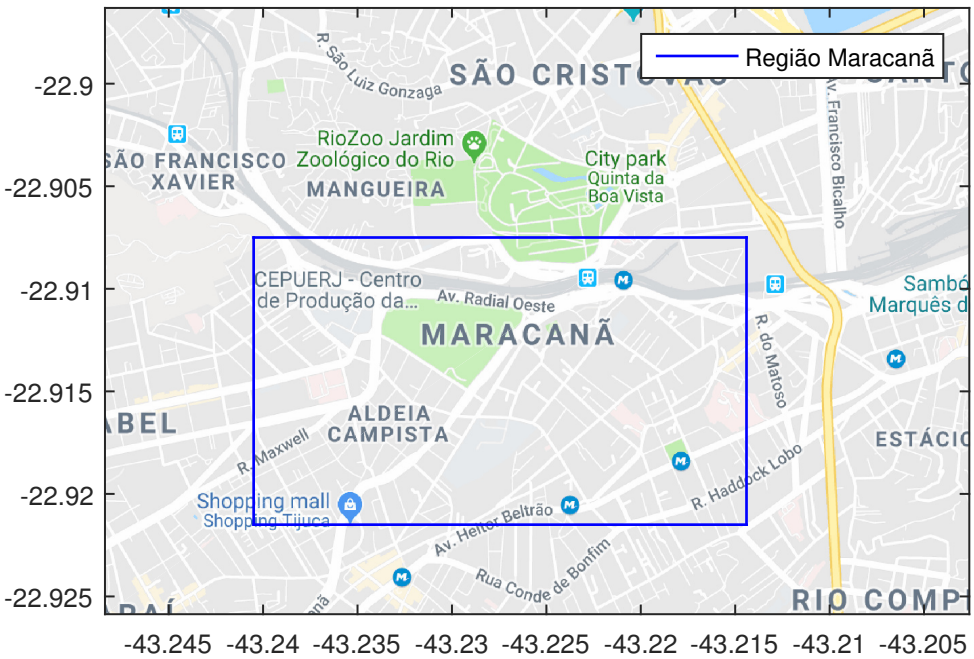


Figura 30 - Região de avaliação da área do Maracanã.

Tabela 5 Espaçamento de medidas e erros esperados

Configurações	Rio de Janeiro	Maracanã
d_e [^{o}]	0,001	0,0001
d_e [m]	111	11,12
$\min_{\text{região}} e[m]$	75,50	7,55
$\max_{\text{região}} e[m]$	47.110	3.280
Pontos do CDB	56.541	36.942

4.2.1 Cenários Simulados

A Tabela 6 consolida as configurações de áreas de avaliação (de diferentes dimensões) empregadas nas simulações, diferentes configurações de rede SFN e quantidade de transmissores. Contudo, outros aspectos, como o ruído, devem ser ainda incluídos.

Tabela 6 Configurações das Simulações.

Modo Simulação	**Quantidade de SFN's**	**Quantidade de Estações por SFN**	**Área Avaliada**
1	1	3	Município do Rio de Janeiro
2	1	6	Município do Rio de Janeiro
3	2	3	Município do Rio de Janeiro
4	1	6	Maracanã

No caso de avaliação de duas redes SFN, são obtidos os valores para cada uma das redes, ajustados, concatenados os vetores obtidos com diferentes normalizações e após isto comparados com a base de dados construída no mesmo formato.

4.2.2 *Path-Loss*

Abstraindo o modelo de propagação escolhido neste trabalho e observando o modelo *path-loss*, temos [44]

$$L = P_{\mathrm{r}} - P_{\mathrm{t}} = 10\ \alpha \log(d) + \mathrm{C}\ [dB] \tag{4.8}$$

onde temos L como a perda de percurso em dB que é dependente da relação entre as potências recebida P_{r} e transmitida P_{t}, mas que também pode ser vista de outra forma como dependente de α, um coeficiente de perda de percurso, da distância d e uma constante C inerente das características do sistema.

Considerando

$$d_e = \gamma\ d \tag{4.9}$$

onde d_e é a variação de espaçamento das medidas realizadas, apresentada na Seção 4.2, e a perda de percurso entre dois pontos na área próxima, é definida como a perda gerada pelo espaçamento das medidas (e_{m})

$$e_{\mathrm{m}} = \alpha\ 10[\ \log(d) - \log(d + d_e)] \tag{4.10}$$

Substituindo-se a relação de (4.9) em (4.10) temos

$$\frac{e_{\mathrm{m}}}{\alpha 10} = \log(d) - \log(d(1+\gamma)) \tag{4.11}$$

e aplicando-se propriedade logarítmica, tem-se

$$\frac{e_{\mathrm{m}}}{\alpha 10} = -\log(1+\gamma) \tag{4.12}$$

e

$$e_{\mathrm{m}} = -\alpha\ 10\ \ \log(1+\gamma). \tag{4.13}$$

Uma vez que o valor de α seja conhecido, a resolução da base de dados deve ser construída de acordo com a sensibilidade do receptor, ou seja, com base no valor mínimo detectável pelo mesmo para distinção entre intensidades de campo das diferentes posições avaliadas.

4.3 Construção da Base de Dados

Como dito anteriormente, todas as simulações foram realizadas usando o MatLab [41]. Uma vez definida a área a ser avaliada e a sua resolução, a fim de definir a quantidade de pontos e as coordenadas a serem utilizados, inicia-se o processo de obtenção das intensidade de campo elétrico. Para isso, é necessário o uso de um modelo de propagação adequado e de uma base topográfica. Assim, as altitudes para simulação em cada um dos pontos avaliados são retiradas da base topográfica *Digital Terrain Elevation Data* (DTED) [45] em formato DTED nível 2 (.dt2), com dados de resolução um segundo de arco, aproximadamente 30 metros. Os pontos intermediários a esta distância são obtidos via interpolação. Cada arquivo é referente a uma região do globo terrestre com área correspondente a um grau de latitude e um grau de longitude. Essas coordenadas são convertidas para o sistema UTM *(Universal Transverse Mercator)*, que divide a Terra em 60 regiões de 6 graus de longitude, como ilustrado na Figura 31, permitindo obter-se uma localização no globo terrestre com baixa distorção.

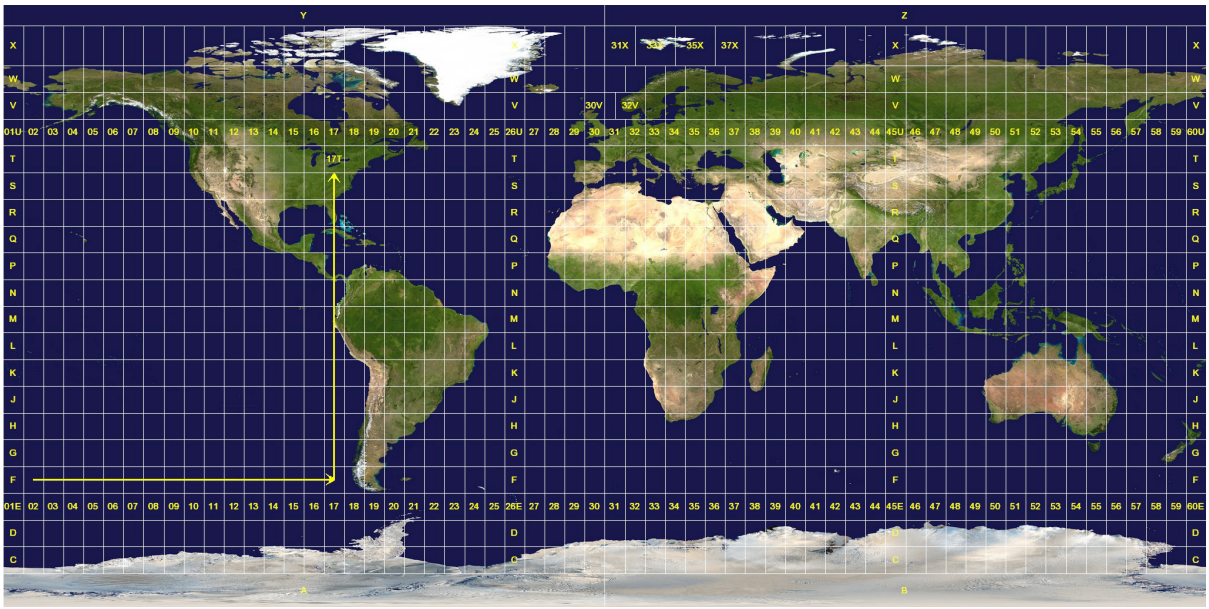


Figura 31 - Organização do Sistema UTM [2]

.

4.3.1 Modelagem de Propagação

Dentre diversos modelos de propagação existentes, como, por exemplo, o difundido Okumura-Hata, extensivamente utilizado para predição de cobertura em VHF e UHF,

escolhemos o modelo de predição de cobertura ponto-área dado pela recomendação ITU-R P.1546-5 [3], utilizado pela Anatel [46]. Este modelo é empregado para a modelagem de serviços terrestres na faixa de frequência de 30 MHz até 3 GHz, que no uso do espectro no Brasil corresponde a diversos serviços de telecomunicações, incluindo rádio e TV. O modelo traz consigo a definição de valores da intensidade de campo para uma fonte de ERP (*Effective Radiated Power*) igual a 1kW, para distâncias a partir de 1 Km até 1.000 Km excedendo a 50%, 10% e 1% do tempo para as frequências nominais de 100 MHz, como na Figura 32, 600 MHz e 2 GHz.

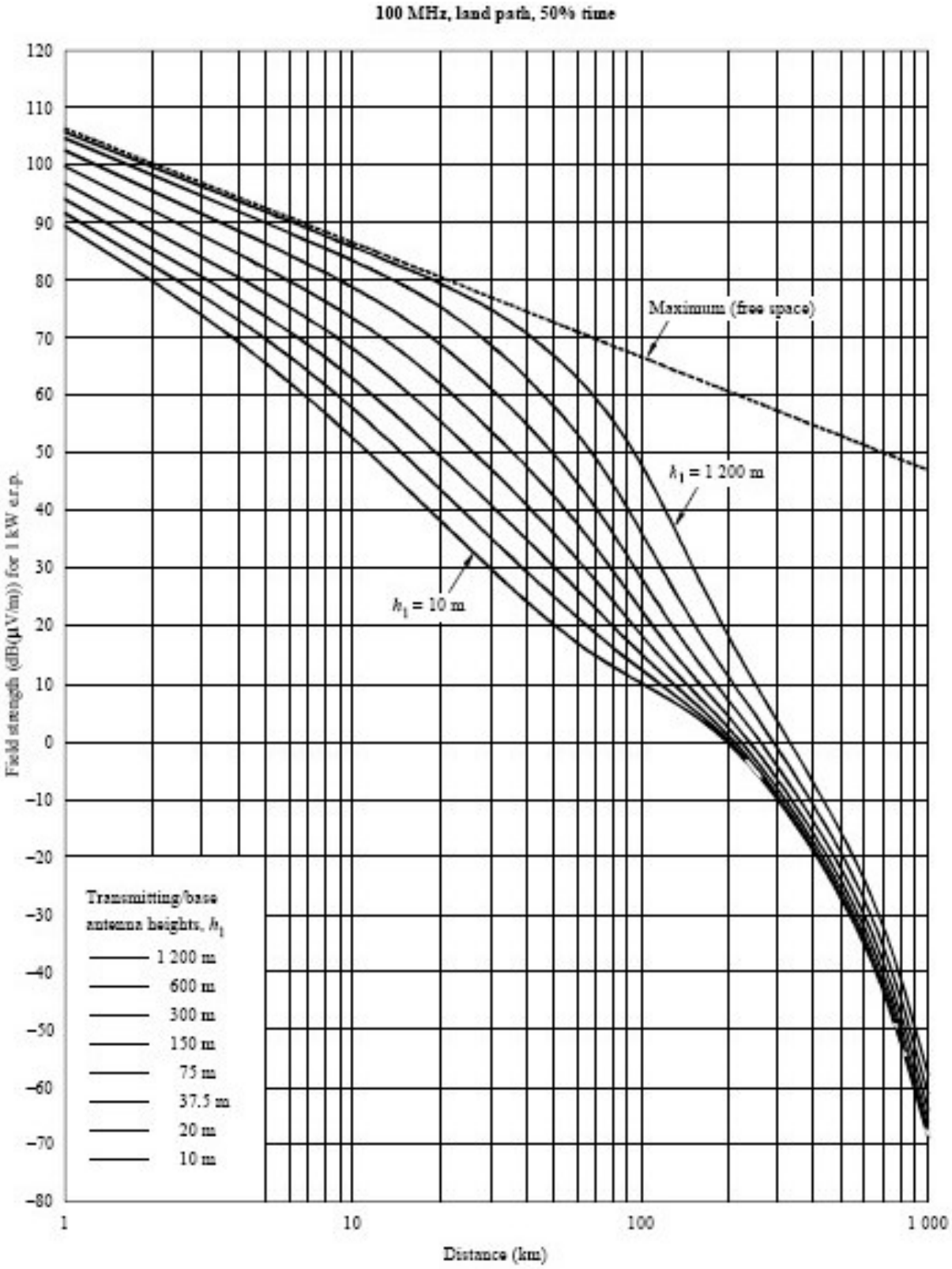


Figura 32 - Curvas de campo elétrico para diferentes distâncias na ITU-T P.1546 [3].

As curvas apresentadas na recomendação ITU-R P.1546 já consideram as perdas devidas às rugosidades das superfícies encontradas no terreno [47]. A altitude do terreno

é aplicada apenas nos pontos de transmissão e recepção avaliados e considera-se uma transmissão LOS. Desta forma, observa-se que para cada um dos oito valores de h_1 (altura da antena transmissora) considerados são geradas diferentes curvas. A ERP, potência efetiva radiada, equivale ao produto (ou soma na escala log/dB) da potência de entrada na antena pelo seu ganho de potência, relativamente a um dipolo de meia onda. Estações transmissoras são classificadas com base em seus valores de ERP autorizados, e para cada irradiador, não pode superar o valor máximo de ERP autorizado em cada radial. Para distâncias menores que 1 Km, a intensidade de campo é definida por

$$E = 106,9 - 20\log(d_{\text{inf}})\ [dB\mu V/m]. \tag{4.14}$$

4.3.1.1 Interpolação de intensidade de campo elétrico em função da distância

Para as demais distâncias, não avaliadas diretamente pelo modelo, os valores de intensidade de campo elétrico devem ser obtidos através de interpolações [3]

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}})\frac{\log(d/d_{\text{inf}})}{\log(d_{\text{sup}}/d_{\text{inf}})}\ [dB\mu V/m], \tag{4.15}$$

sendo E_{inf} o valor de intensidade de campo elétrico na distância d_{inf}, a distância imediatamente inferior à desejada (d) que deve ser identificada a partir da Figura 32. Na mesma lógica, a distância imediatamente superior a desejada, d_{sup}, corresponde à intensidade de campo superior correspondente, E_{sup}.

4.3.1.2 Interpolação de intensidade de campo elétrico em função da frequência

Como os gráficos são gerados apenas para as frequências específicas de 100 MHz, 600 MHz e 2.000 MHz, para uma frequência desejada a estimativa do campo elétrico deve ser obtida através de interpolação [3]

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}})\frac{\log(f/f_{\text{inf}})}{\log(f_{\text{sup}}/f_{\text{inf}})}\ [dB\mu V/m], \tag{4.16}$$

onde os campos elétricos inferiores, E_{inf}, e superiores, E_{sup}, correspondem respectivamente aos valores obtidos nos gráficos das frequências imediatamente inferiores, f_{inf}, e superiores, f_{sup}.

4.3.2 Mapa de Cobertura

Com base no modelo de propagação escolhido foram simuladas as intensidades de campo para cada ponto avaliado. Em paralelo, foram desenvolvidos os mapas de cobertura de uma estação de cada rede avaliada, demonstrando a área de alcance de sinal de cada estação.

Desta forma, é possível observar em Figura 33 o mapa do transmissor localizado no morro do Mendanha.

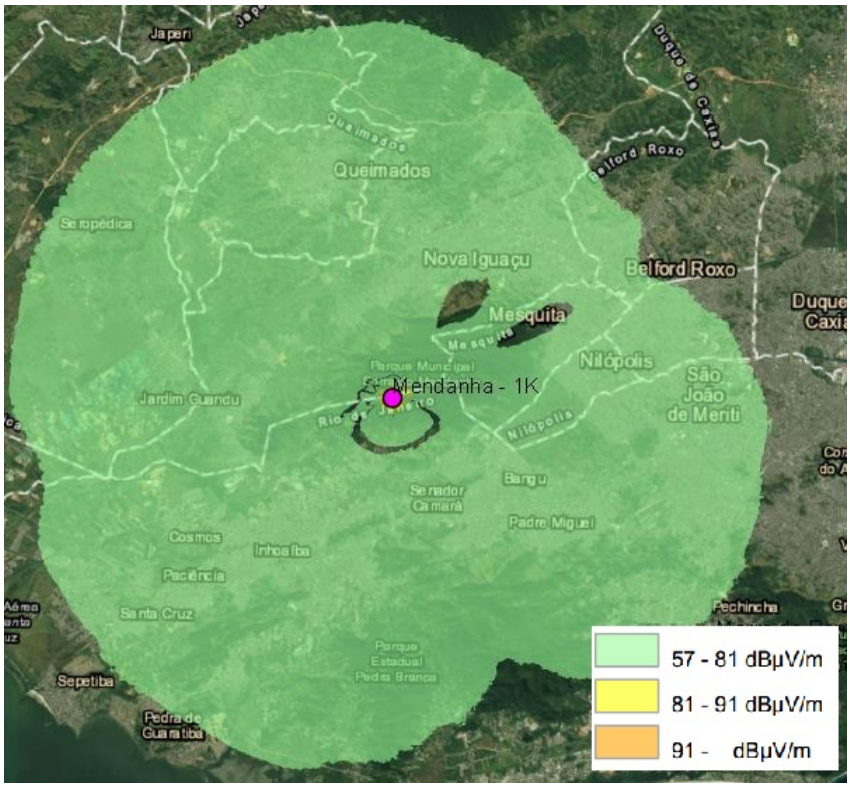


Figura 33 - Mapa de Cobertura do Mendanha, Transmissor da SFN 1, com o modelo ITU-T P.1546.

É possível observar também em Figura 34 o mapa do transmissor localizado em Botafogo.

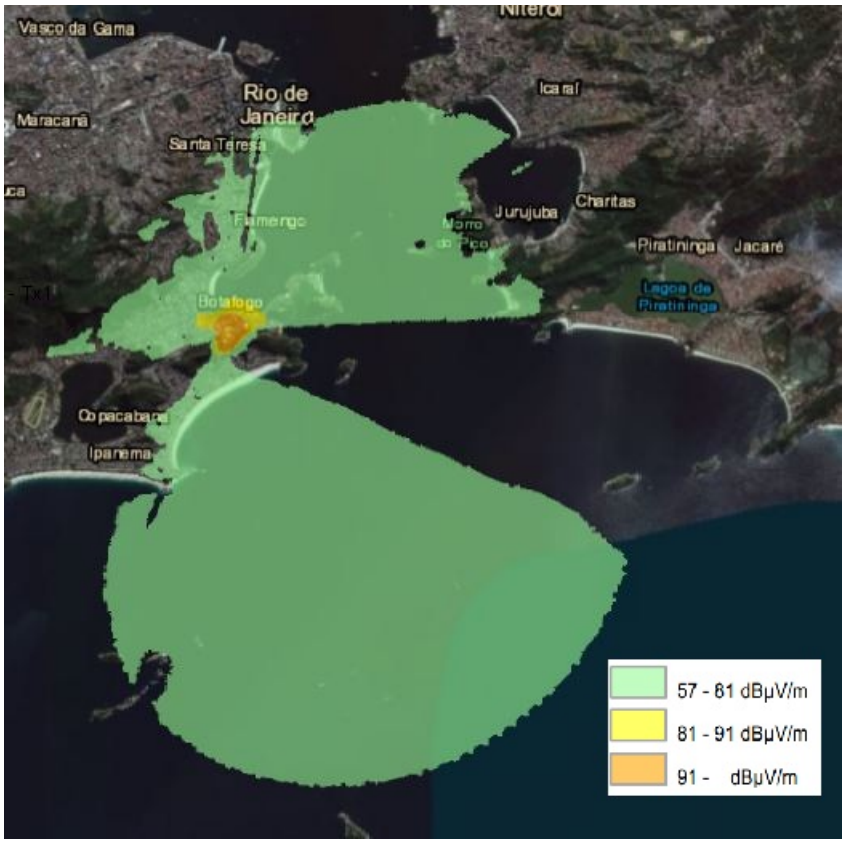


Figura 34 - Mapa de Cobertura de Botafogo, Transmissor da SFN 2, com o modelo ITU-T P.1546.

E a cobertura da estação do Figura 35, correspondendo a estação do Sumaré, completando o conjunto de transmissores que compõem a rede de interesse.

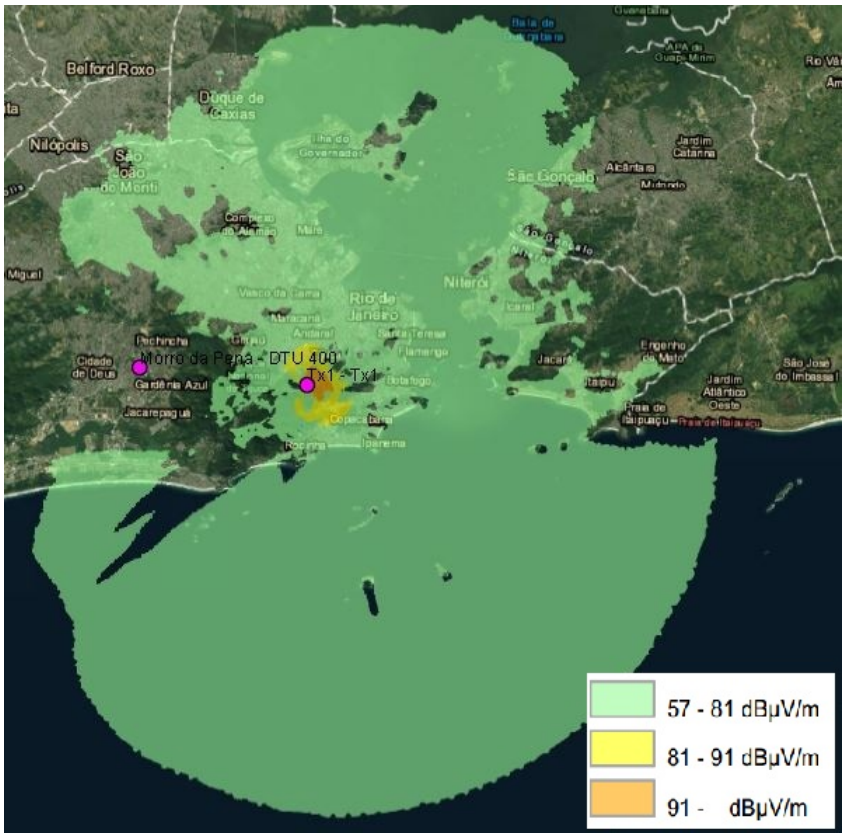


Figura 35 - Mapa de Cobertura do Sumaré, Transmissor da SFN 3, com o modelo ITU-T P.1546.

Nota-se que a cobertura, com mesmo modelo de antena e ERP, apresenta diferentes mapas de cobertura em cada localidade, devido aos valores de altitude, relevos próximos e áreas de sombra. Os sinais gerados por cada transmissor operando em cada rede e na mesma frequência, contribui para os valores finais da cobertura da rede.

4.3.3 Dispositivos Cruzados

Técnicas de localização baseadas em *fingerprinting* geralmente tem o desempenho deteriorado pelo efeito de dispositivos cruzados, conhecido como *cross-device*. Se o CDB é coletado com um dispositivo e a estimativa de localização deve ser produzida para outro dispositivo, pode haver diferenças nas medidas que prejudicam a estimativa de localização obtida. Para simular isso, adicionamos ganhos (constantes) distintos na coleta das medidas alvo (a localizar) e de referências (CDB).

4.4 Critérios de Avaliação

Para avaliar a técnica de RF *fingerprinting* em localização através das diferentes medidas de similaridades, é necessário dispor de critérios comparativos, para isso, avaliamos a acurácia e a precisão.

4.4.1 Acurácia

A acurácia de uma posição estimada pode ser definida como a distância Euclidiana entre a posição estimada $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ e a posição correta (x_i, y_i), traduzindo, assim, o resultado como o erro na estimativa de posição. Neste caso, a acurácia de uma posição estimada é definida por

$$e = \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}. \tag{4.17}$$

Para a avaliação da acurácia de um método de localização é necessário avaliar do erro de posição de uma quantidade de pontos M, conforme

$$\overline{e} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} e_i. \tag{4.18}$$

4.4.2 Precisão

A precisão de um método de posicionamento pode ser definida usando a distribuição de probabilidade da acurácia de um conjunto de posições estimadas [1]. Considerando que as posições estimadas são obtidas enquanto o dispositivo a ser localizado está estacionário, a precisão pode ser caracterizada pela probabilidade de erro circular, o CEP (*Circular Error Probability*), conforme ilustrada na Figura 36.

A Figura 36 evidencia a diferença entre a precisão e a acurácia de um estimador; enquanto o estimador (a) possui uma acurácia superior, definida pela distância entre P, posição estimada, e P_0, posição correta, sua precisão é inferior à do estimador em (b), já que seu CEP é muito maior [1].

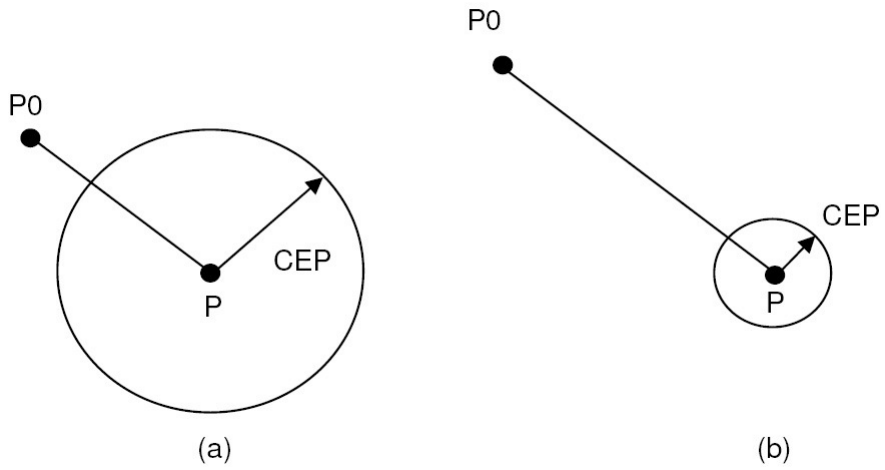


Figura 36 - Precisão vs. Acurácia, ilustração comparativa entre dois métodos de posicionamento [1].

4.4.2.1 CDF

Outra ferramenta de avaliação é a CDF (*Cumulative Distribution Function*). Ela é tipicamente utilizada para comparar diferentes métodos de posicionamento ou para especificar requisitos de precisão mínimos, por ser mais fácil de representar graficamente. A CDF de uma V.A. (Variável Aleatória) X é

$$F(x) \equiv Pr(X \leq x); \tag{4.19}$$

isto é, a CDF F(x) informa a probilidade de que o valor observado de X seja menor ou igual a x. Como ela enseja tanto uma medida de acurácia como de precisão, de forma a comparar os desempenhos das propostas apresentadas no Capítulo 2 com as medidas de similaridade MSE, CC e E, e no Capítulo 3 com ANN, usamos a CDF do erro de localização.

A seguir, no Capítulo 5, avaliam-se as medidas de similaridade apresentadas nos Capítulos 2 e 3.

5 RESULTADOS

A configuração final e os parâmetros definidos para criação da base de dados de simulação são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 Parâmetros dos Sistemas Transmissores e Receptores

Parâmetro	**Valor**
Sistema Transmissor	Isotrópico
ERP	1 kW
Sistema Receptor	Diretivo
Passo Angular	10°
Cross-device	3 dB

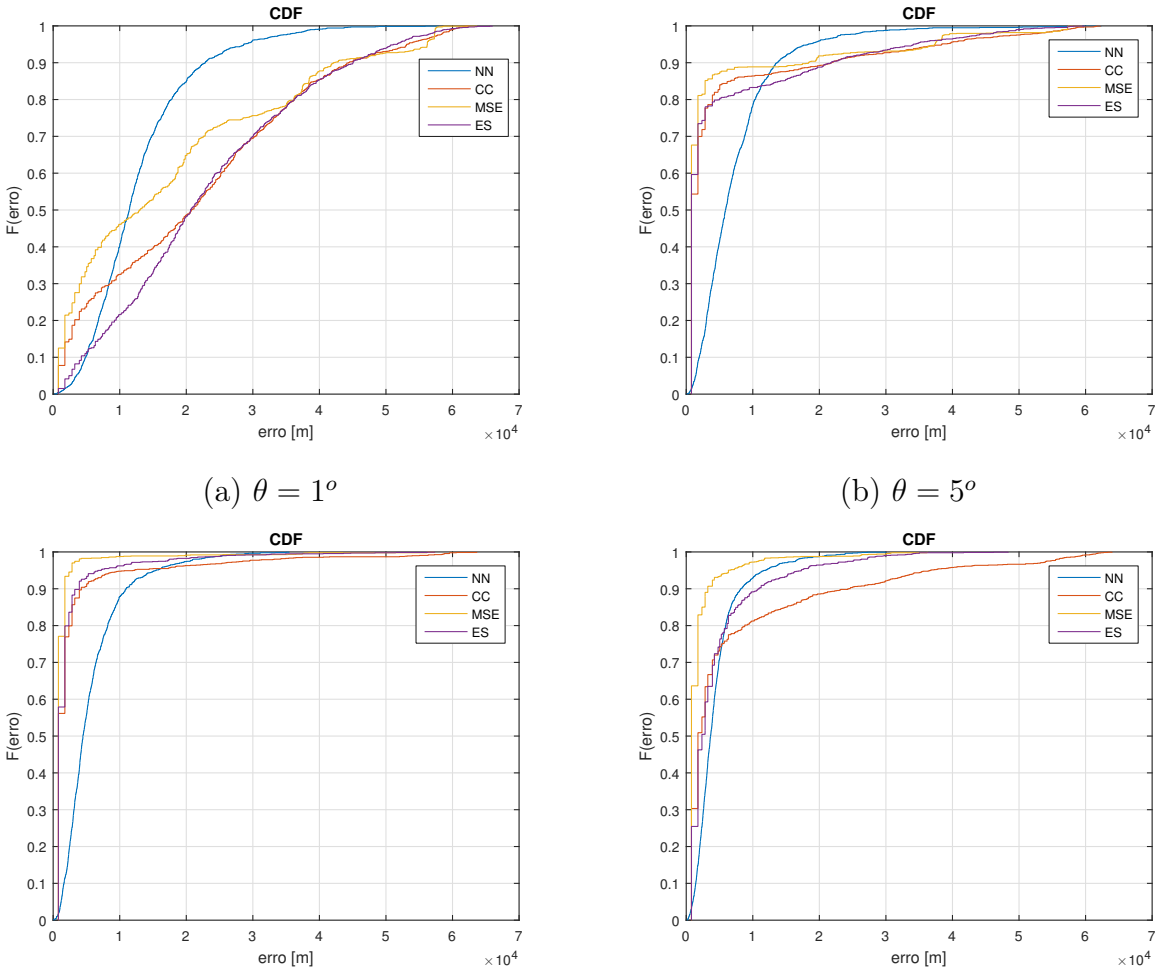
O sistema de transmissão é idealizado irradiando isotropicamente, com sistema de recepção diretivo e passo angular de 10° para realização das medidas no ponto de interesse.

Cada Rfing_i, que compõe o CDB traz a informação de intensidade de campo elétrico do ponto i correspondente em 36 orientações. No caso de avaliação *cross-device* foram utilizadas antenas com diferenças de ganho de 3 dB.

O CDB original é utilizado para estimação da localização usando as medidas de similaridade. Para CC e ANN foram aplicados dados normalizados, melhorando o desempenho das mesmas.

5.1 Variação da Resolução Angular

Variou-se a resolução angular na geração da base de dados do bairro Maracanã considerando a SFN 1, de forma a avaliar possíveis impactos na determinação da localização. Na Figura 37 temos as CDFs dos erros de localização para as medidas de similaridades investigadas nesta dissertação usando diferentes resoluções angulares θ na coleta. As medidade de similaridades utilizadas são o Erro Médio Quadrático (MSE), Correlação Circular (CC), Energia do Sinal (E) e Rede Neural Artificial (ANN), respectivamente apresentados nas Seções 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 e no Capítulo 3.



(a) $\theta = 1^o$ (b) $\theta = 5^o$

(c) $\theta = 10^o$ (d) $\theta = 30^o$

Figura 37 - Desempenho em função da resolução angular do processo de coleta.

Na Figura 37 temos as CDFs obtidas através da avaliação de uma Rede SFN, mantidas as suas características, variando apenas o passo angular em (a) igual a 1°, em (b) para 5°, em (c) para 10° e em (d) para 30°. Nota-se que o erro aumenta de formas diferentes conforme o valor de θ escolhido. Quanto menor for θ, mais informações são coletadas no giro, a estimação da posição emprega mais dados e consequentemente uma melhor caracterização da localização.

É possível observar, através dos gráficos da Figura 37, todos na mesma escala de erro, que o ajuste das curvas ocorre conforme a variação do passo angular é empregada na formação de cada CDB. De (a) para (b) nota-se que há uma mudança relevante nos resultados das medidas de similaridade, pois os gráficos que em (a) tendiam para um comportamento linear, variando rapidamente os valores de erro obtidos, em (b) ajustam-se concentrando a maior parte de seus resultados, 3 medidas de similaridades, com um

valor de erro mínimo em mais de 50% dos registros além de atingir em uma das medidas o erro mínimo em quase 70% dos registros. Nessa evolução temos em (c) as características similares a obtida no gráfico anterior, mas com um erro mínimo de uma das medidas acima de 75% dos registros. Contudo em (d) desempenho reduz e o erro mínimo é mantido apenas até 60% dos registros, aproximadamente. Considerando esta avaliação, definiu-se o passo angular utilizado na formação do CDB deste trabalho no valor de 10°.

5.2 Avaliação na Cidade do Rio de Janeiro

A avaliação em toda a cidade do Rio de Janeiro, compreende uma área extensa de 635 Km^2. Utilizou-se a rede SFN 1, com espaçamento de $0{,}001^o$ (correspondendo a uma distância de 0,111 Km), gerando um CDB com 56.541 pontos de análise. Para avaliação são utilizadas 1.200 amostras de pontos novos, não contidos no CDB. Todas as definições foram estabelecidas visando um processamento realizável dos dados.

5.2.1 Desempenho da Rede SFN 1

A Figura 38 apresenta o desempenho considerando os sinais recebidos dos transmissores da rede SFN 1; o erro mínimo é aproximadamente 75,5 m, que é observado para 84% dos registros aplicando-se o MSE, para a CC o erro mínimo ocorre em 38% dos registros e em 43% usando a E. Com a ANN o comportamento é um pouco inferior, mas mostra a viabilidade de obter-se a estimativa da posição. Observamos a existência de um erro mínimo não-nulo, ele deriva do desalinhamento entre os pontos do CDB e os pontos de teste.

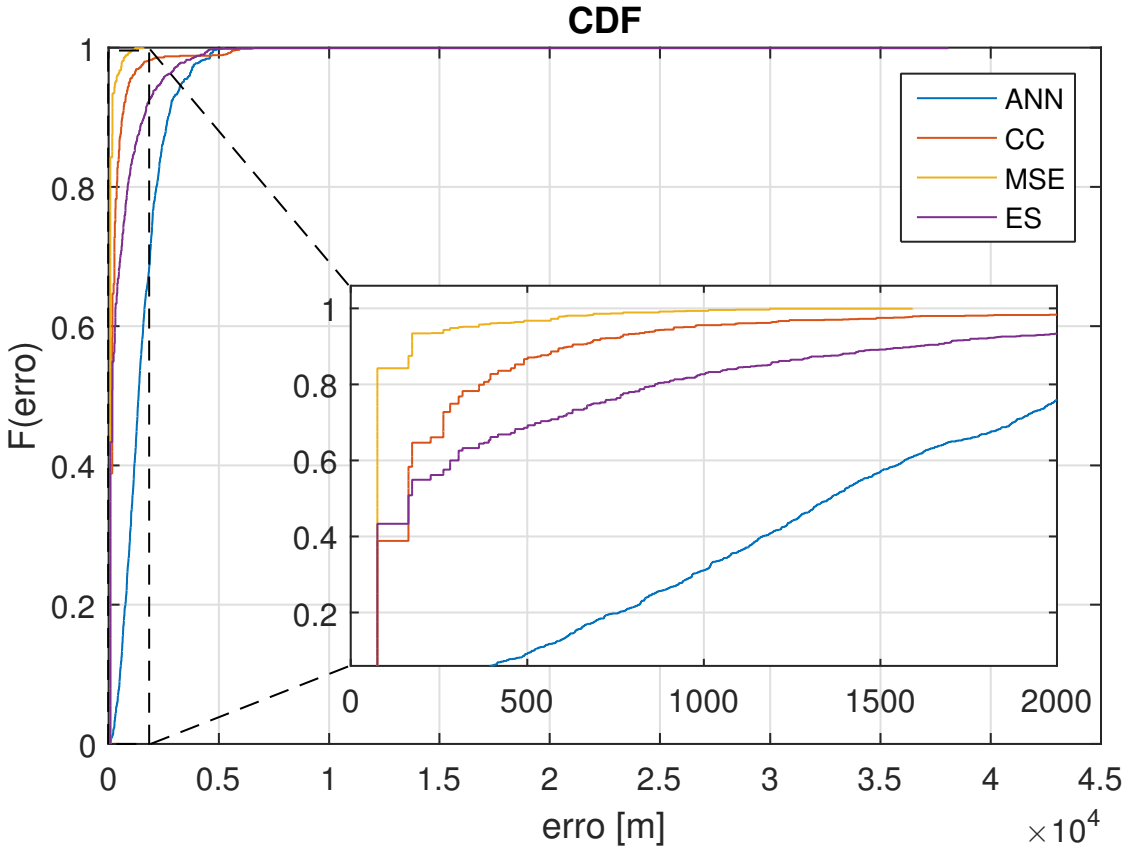


Figura 38 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 1, operando no canal 48 UHF com orientação inicial de 0°NV.

5.2.2 Desempenho da Rede SFN 1 com *cross-device*

A Figura 39 apresenta os resultados obtidos considerando um ganho 3 dB superior para a coleta das medidas alvo em relação as da construção do CDB. É possível notar uma queda no desempenho geral, uma vez que as CDFs estão por baixo das correspondentes na Figura 38, e que o nível de erro máximo dobrou.

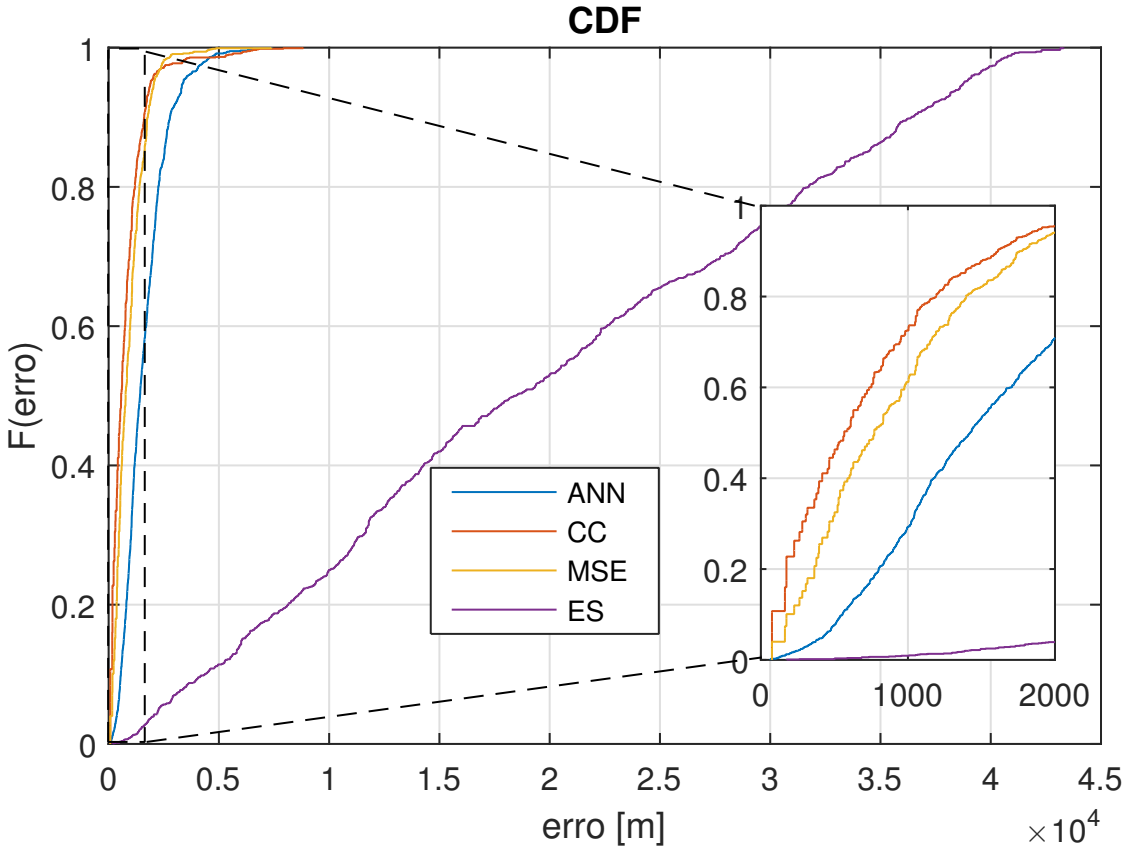


Figura 39 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 1, operando no canal 48 UHF com *cross-device* e orientação inicial de 0^oNV.

5.2.3 Desempenho da Rede SFN 1 sem orientação NV

O desempenho obtido usando a rede SFN 1 sem dispor-se da informação de Norte Verdadeiro é apresentado na Figura 40. Enquanto o erro mínimo se mantém em 38% dos registros de CC, mesmo resultado obtido na Figura 38, há uma grande deterioração para MSE e E, com queda do desempenho, obtendo o erro mínimo em 10% e 6% dos registros, respectivamente. Apesar da ANN não manter uma porcentagem de erro mínimo, esta apresenta seu comportamento similar ao do MSE e E.

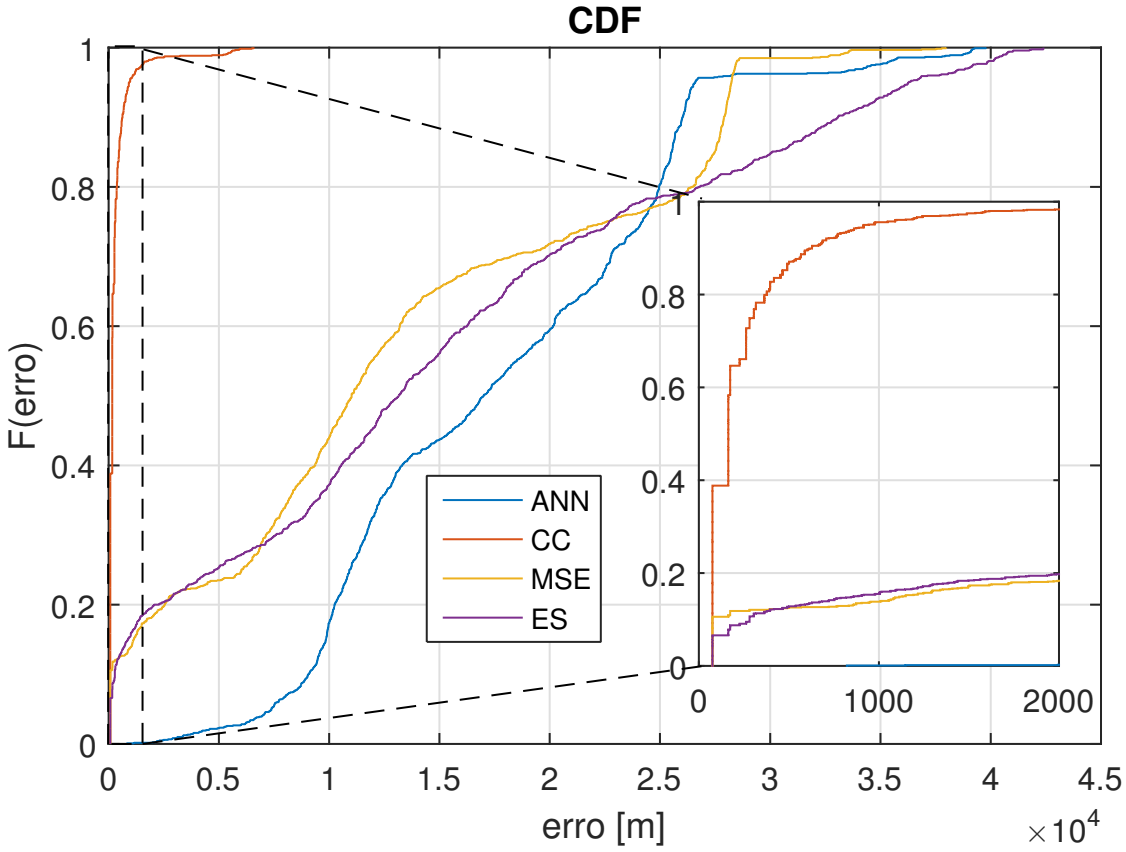


Figura 40 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 1, operando no canal 48 UHF sem orientação inicial de 0ºNV.

5.2.4 Aumento de Transmissores da Rede

Para observar-se a relevância do aumento de transmissores de uma rede SFN foram geradas avaliações com a rede SFN 3, com 6 estações transmissoras.

5.2.4.1 Desempenho da Rede SFN 3

Empregando-se a rede SFN 3, com aumento da quantidade de estações transmissoras de três para seis, observa-se uma melhora no desempenho geral, conforme ilustrado na Figura 41.Para a SFN 3, o erro mínimo de 75,5 m é obtido para 92% dos registros com o MSE, 90% dos registros com a CC e 55% dos registros com E. Apesar da ANN iniciar com erro nulo, no destaque até 2 Km, podemos ver que o erro cresce rapidamente e de forma bem defasada das demais medidas de similaridades.

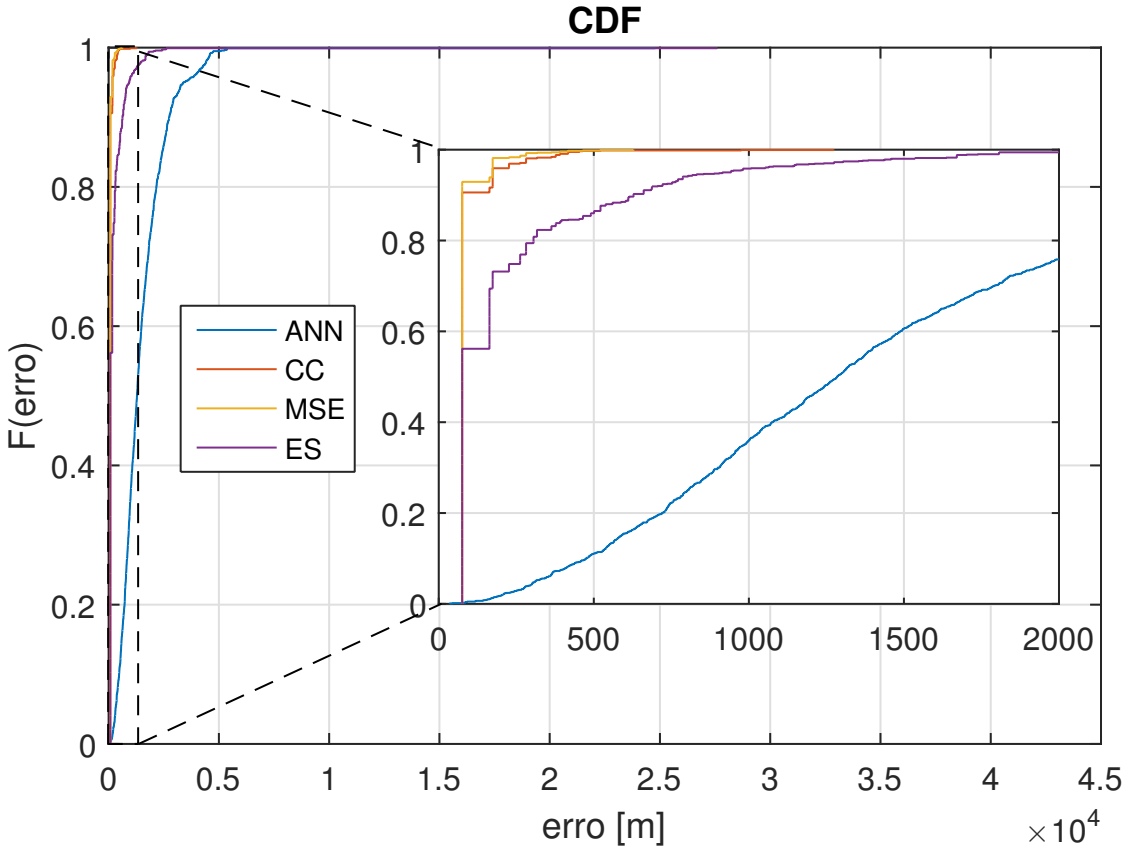


Figura 41 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 3, com 6 estações, operando no canal 48 UHF com orientação inicial de 0°NV.

5.2.4.2 Desempenho das redes SFN 1 e SFN 2

Quando se empregam duas SFNs simultaneamente, a SFN 1 e a SFN 2, obtêm-se a CDF apresentada na Figura 42, cujo erro mínimo é mantido acima de 90% dos registros em MSE, de 55% dos registros em CC, 43% dos registros em E e tem seu pior desempenho pela ANN.

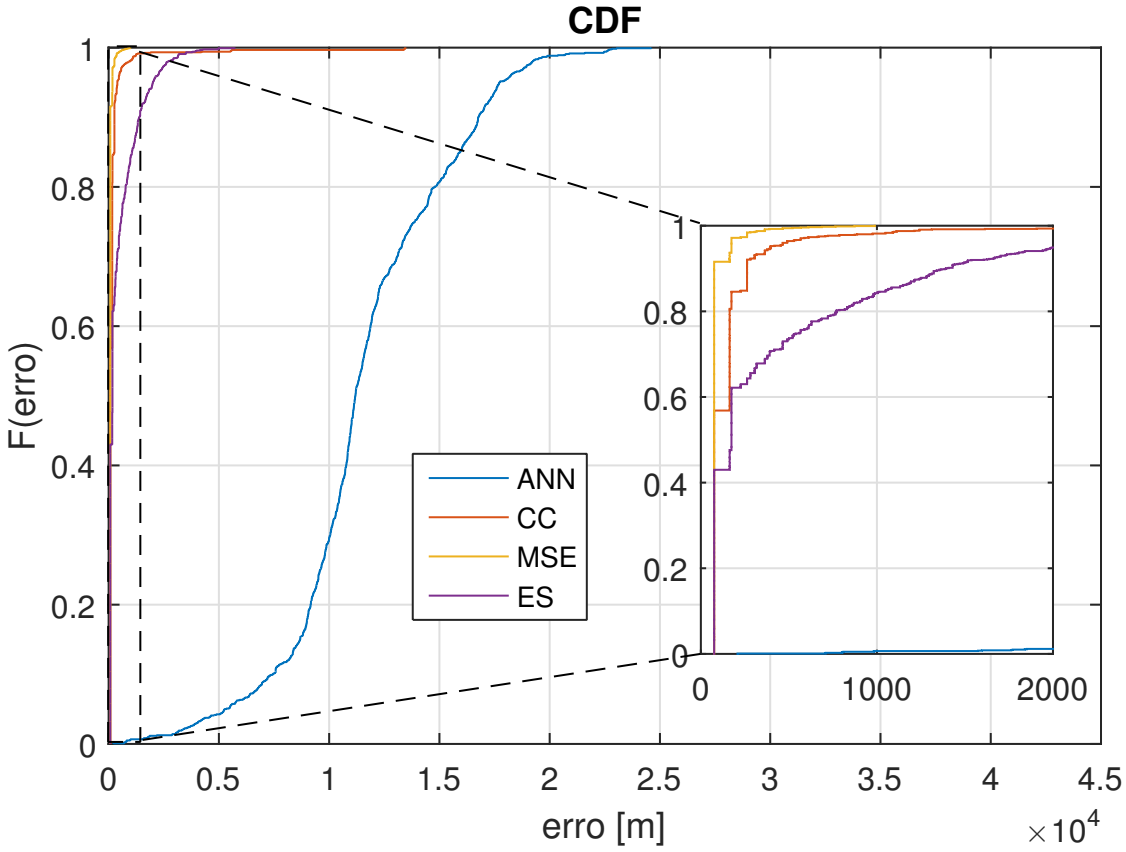


Figura 42 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 1, operando no canal 48 e SFN 2, no canal 29 UHF, ambas com 3 estações cada e orientações NV.

Na Tabela 8 observamos os desempenhos obtidos por cada medida de similaridade em todos os cenários avaliados, onde os valores apresentados correspondem ao erro médio e o erro percentual obtido ao se processar 95% e 99% dos registros. Onde nota-se que o melhor desempenhos foi o obtido através da rede SFN 3, operando com 6 transmissores.

Tabela 8 Comparação de Desempenho dos Resultados.

Cenário	MSE			CC			E			ANN		
	Erro	% (m)		Erro	% (m)		Erro	% (m)		Erro	% (m)	
	médio (m)	95	99	médio (m)	95	99	médio (m)	95	99	médio (m)	95	99
SFN 1	115,7	305,6	873,6	322,9	928,9	5.261,1	584,6	2.381,2	4.258,8	1.529,5	3.343,3	4.599,8
SFN 1 sem NV	13.114,4	28.238,9	33.189,1	322,9	928,9	5.261,1	14.960,7	36.274,8	40.636,7	17.493,9	26.597,0	38.740,2
SFN 1 com DC	919,3	2.054,6	2.860,0	786,9	1.909,2	5.523,8	19.635,4	38.795,3	40.951,3	1.610,5	3.389,7	4.825,8
SFN 3	85,3	173,8	281,5	91,9	173,8	390,9	264,3	928,7	1.772,7	1.511,9	3.400,1	4.590,1
SFN 1 e 2	89,6	173,8	363,3	213,2	395,6	1.241,8	477,4	2.008,3	3.174,6	12.383,7	18.596,1	20.414,9

5.3 Avaliação do Bairro do Maracanã

Na região do bairro do maracanã foram gerados 36.942 pontos para composição do CDB, simulando a configuração de melhor desempenho no Rio de Janeiro, SFN 3, e com a mesma quantidade de amostras avaliadas, 1.200.

5.3.1 Aplicação da Rede de melhor desempenho - SFN 3

Os resultados vistos na Figura 43 traçam um gráfico com erros inferiores aos obtidos na análise do município do Rio de Janeiro, devido a redução da área avaliada e a sua discretização. As curvas de CC e MSE aparecem sobrepostas, no quadro de *zoom*, canto inferior direito, observa-se que estas duas medidas de similaridade mantiveram o desempenho mínimo de 7,55 m em 100% dos registros, e E e ANN aumentaram seus erros de forma similar.

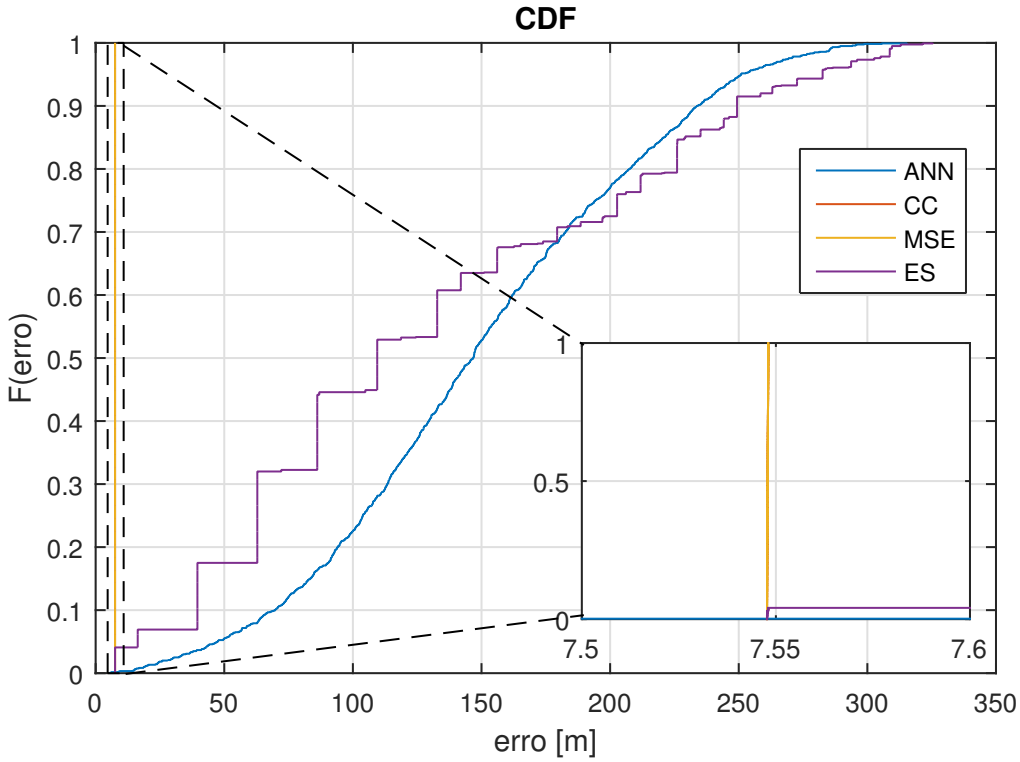


Figura 43 - CDF do erro de localização usando a Rede SFN 3, com 6 estações, operando no canal 48 UHF com orientação inicial de 0°NV.

5.3.2 Visualização das Posições Estimadas

Após o processamento dos dados da região do Maracanã, foi selecionada aleatoriamente uma das posições para a verificação das estimativas obtidas através das medidas de similaridades e exibidas na Figura 44. Na legenda P significa posição e conforme esperado, as posições mais próximas à posição correta são as do MSE e CC. Apesar de apresentarem o mesmo erro em distância, uma vez que os espaçamentos entre os pontos do CDB são fixos, variando a distância estabelecida para o d_e, estas estimativas não estão co-localizadas.

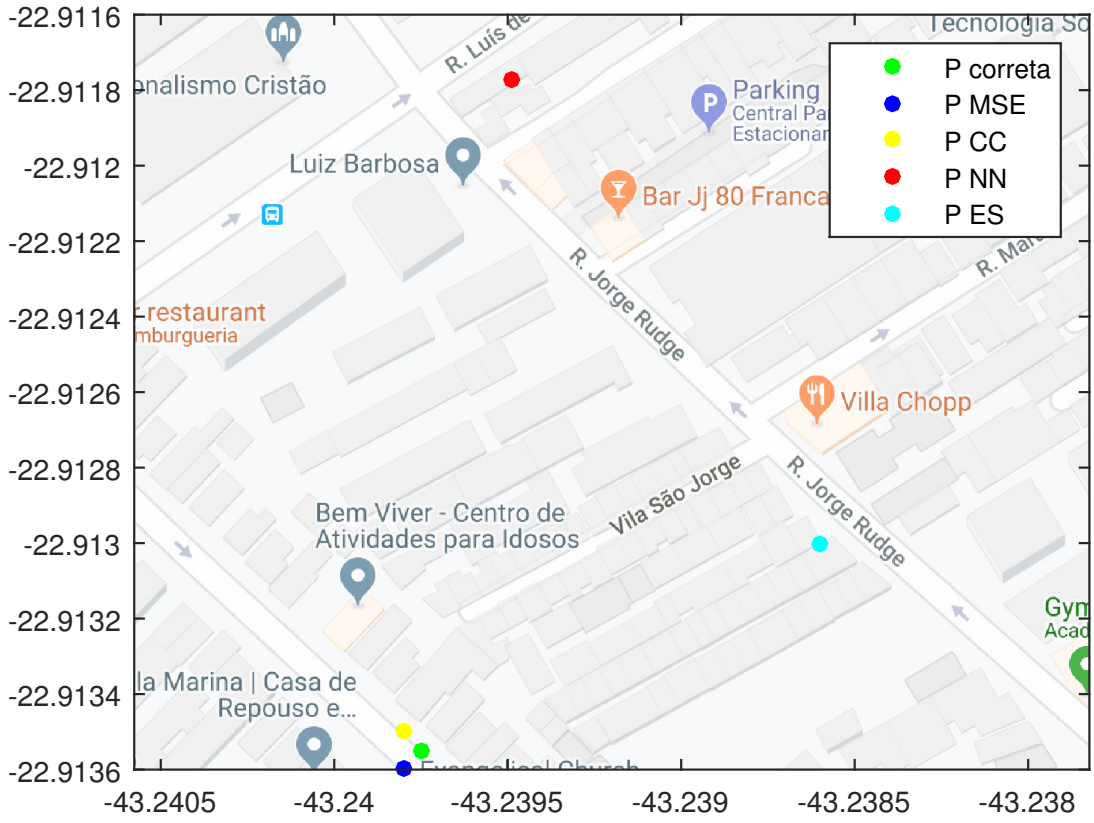


Figura 44 - Posições obtidas nas diferentes medidas de similaridades.

CONCLUSÃO

Este trabalho contribui apresentando uma abordagem para estimar a localização de dispositivos a partir de sinais de SFNs. Propõe-se empregar uma antena receptora diretiva para obter o padrão circular de intensidades do sinal recebido da SFN no ponto.

Os resultados foram gerados através da simulação de redes SFNs operando na cidade do Rio de Janeiro para determinação da localização. Assim, foi possível observar que a aplicação do MSE e CC resultaram nos melhores desempenhos, enquanto as demais medidas de similaridades apresentaram desempenhos inferiores muito similares em cada rede utilizada. Desta forma, os resultados indicam que essa técnica permite estimar a localização de uma tal antena a partir de sinais de SFNs de TV Digital.

Vimos também que empregar a correlação circular como medida de similaridade permite imunidade à perda de referência de NV. Tornando-se uma alternativa ao MSE se o padrão circular contém muitas componentes, devido a seu menor custo computacional em função da quantidade de componentes do padrão. Já o efeito *cross-device* mostrou a capacidade de deterioração do desempenho, onde o resultado da simulação no município do Rio de Janeiro obteve o pior erro atingindo 45 Km. Assim, estratégias têm que ser investigadas para mitigá-lo.

Outro ponto muito relevante foi a mudança de nível de erro em metros, caso da mudança de área do município do Rio de Janeiro para o bairro do Maracanã, quando reduzida a área de avaliação e mantendo-se a amostragem proporcionalmente. Assim, seria possível acrescentar melhoras no desempenho da área do município do Rio de Janeiro utilizando-se mais pontos de amostragem, uma vez que o erro está associado ao espaçamento d_e entre as amostras.

O desempenho da proposta melhora quando a quantidade de transmissores da SFN aumenta, bem como quando empregam-se mais SFNs. Pois para quase 80% das estimativas de localização, obtém-se o erro mínimo, inerente ao método com mais transmissores. E o melhor desempenho entre as configurações de simulação da rede foi obtido através do modo 2, conforme configuração descrita na Tabela 6, utilizando 1 rede (SFN 3), com 6 transmissores. Deste resultado então, gerou-se o modo 4 que faz a avaliação considerando o melhor desempenho obtido no município do Rio de Janeiro para uma região menor e consequentemente com um nível de erro mais baixo.

Para trabalhos futuros, existem diversas possibilidades, tanto na parte de simulação

com outras configurações de SFNs como com a criação de uma maior base de dados para processamento e melhoria do desempenho com um menos valor do d_e. Na questão prática e técnica, elaboração da montagem do protótipo da antena receptora diretiva giratória e verificação de medidas com redes reais comparando com os obtidos via simulação. Além disso, pretende-se avaliar o desempenho de cenários NLOS, o impacto do ruído e do desalinhamento do passo de medição em relação às medidas armazenadas no CDB.

REFERÊNCIAS

[1] CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. *RF positioning: fundamentals, applications, and tools.* : Artech House, 2015.

[2] UTM - Universal Transverse Mercator. `https://www.earthpoint.us/ExcelToKml.aspx`. Acesso em: Fevereiro de 2018.

[3] ITU-R, R. P. 1546-4 method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30–300 mhz. *International Telecommunication Union, Geneva*, 2009.

[4] THOMAS, M. et al. Global navigation space systems: reliance and vulnerabilities. *The Royal Academy of Engineering, London*, 2011.

[5] MOGHTADAIEE, V. et al. System-level considerations for signal-of-opportunity positioning. In: *Int. Symp. GPS/GNSS, Taipei, Taiwan.* 2010.

[6] Kang, Y. et al. A high-accuracy toa-based localization method without time synchronization in a three-dimensional space. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 1, p. 173–182, Jan 2019. ISSN 1551-3203.

[7] SERANT, D. *Advanced Signal Processing Algorithms for GNSS/OFDM Receiver.* Tese (Doutorado) — INPT, 2012.

[8] YOON, S. et al. Acmi: Fm-based indoor localization via autonomous fingerprinting. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, n. 1, p. 1–1, 2016.

[9] GROVES, P. D. *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems.* : Artech house, 2013.

[10] MENDES, C. C. A. et al. Solutions for the path ambiguity problem in dvb-t signal-of-opportunity positioning system. In: IEEE. *Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS), 2012.* 2012. p. 1–5.

[11] CHEN, L. et al. Toa estimation for positioning with dvb-t signals in outdoor static tests. *IEEE Transactions on Broadcasting*, IEEE, v. 61, n. 4, p. 625–638, 2015.

[12] SERANT, D. et al. The digital tv case-positioning using signals-of-opportunity based on ofdm modulation. *Inside GNSS*, v. 6, n. 6, p. pp–54, 2011.

[13] GUERRA, M. et al. Sfn channel measurements in isdb-t broadcast system. In: IEEE. *2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)*. 2011. p. 53–57.

[14] MCTIC. *Implantação da TV digital beneficia cerca de 130 milhões de brasileiros de 1.379 cidades*. `http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/salaImprensa/noticias/arquivos/2018/12/Implantacao_da_TV_digital_beneficia_cerca_de_130_milhoes_de_brasileiros_de_1379_cidades.html`. Acesso em: Fevereiro de 2019.

[15] HUANG, J. Positioning techniques with signal of opportunity: a focus on digital television systems. 2014.

[16] PROAKIS, J.; SALEHI, M.; BAUCH, G. *Contemporary communication systems using MATLAB*. : Nelson Education, 2012.

[17] ABNT, N. 15601: Televisão digital terrestre-sistema de transmissão. *ABNT, Brasil*, 2008.

[18] BROADCASTING, T. T. Arib standard. Citeseer.

[19] YANG, C.; NGUYEN, T.; BLASCH, E. Mobile positioning via fusion of mixed signals of opportunity. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, IEEE, v. 29, n. 4, p. 34–46, 2014.

[20] DO, J.-Y.; RABINOWITZ, M.; ENGE, P. Performance of hybrid positioning system combining gps and television signals. In: CITESEER. *2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium*. 2006. p. 556–564.

[21] RABINOWITZ, M.; SPILKER, J. J. A new positioning system using television synchronization signals. *IEEE Transactions on Broadcasting*, IEEE, v. 51, n. 1, p. 51–61, 2005.

[22] NIKOOKAR, H.; OONINCX, P. An introduction to radio locationing with signals of opportunity. *Journal of Communication, Navigation, Sensing and Services (CONASENSE)*, River Publishers, v. 2016, n. 1, p. 1–10, 2016.

[23] SERANT, D. et al. Testing ofdm-based positioning using the digital tv signals. In: IEEE. *2012 Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 2012. p. 539–543.

[24] POPLETEEV, A. Please stand by: Tv-based indoor localization. In: IEEE. *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. 2017. p. 1–6.

[25] LIM, D. Y. M. Api-208: Section 1. 2013.

[26] TECHNOLOGY, M. I. of. Lecture 16 - linear filtering with the dft. 2006.

[27] STRANG, G.; BORRE, K. *Linear algebra, geodesy, and GPS*. : Siam, 1997.

[28] COHEN, L. *Time-frequency analysis*. : Prentice hall, 1995.

[29] SILVA, I. N. D.; SPATTI, H.; FLAUZINO, R. Redes neurais artificiais, curso prático. *para engenharia e ciências aplicadas/Ivan Nunes da Silva*, 2010.

[30] KAFIZOV, A.; KRESTINSKAYA, O. Cmos-memristive sigmoid activation function. In: IEEE. *2018 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet)*. 2018. p. 225–230.

[31] AWAD, A.; FRUNZKE, T.; DRESSLER, F. Adaptive distance estimation and localization in wsn using rssi measures. In: IEEE. *10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools (DSD 2007)*. 2007. p. 471–478.

[32] OUTEMZABET, S.; NERGUIZIAN, C. Accuracy enhancement of an indoor ann-based fingerprinting location system using kalman filtering. In: IEEE. *2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. 2008. p. 1–5.

[33] HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. : Bookman Editora, 2007.

[34] NETO, W. R.; JR, C. L. N.; GÓES, L. C. Controle adaptativo inverso usando feedback-error-learning. In: *XII Congresso Brasileiro de Automática. Uberlândia*. 1998.

[35] MORENO, J. J. M.; POL, A. P.; GRACIA, P. M. Artificial neural networks applied to forecasting time series. *Psicothema*, v. 23, n. 2, p. 322–329, 2011.

[36] FARHAT, N. H. et al. Optical implementation of the hopfield model. *Applied optics*, Optical Society of America, v. 24, n. 10, p. 1469–1475, 1985.

[37] WIDROW, B.; LEHR, M. A. 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 78, n. 9, p. 1415–1442, 1990.

[38] KOHONEN, T. *Self-organization and associative memory.* : Springer Science & Business Media, 2012.

[39] SANCHEZ, E. C. M. Controle por aprendizado acelerado e neuro-fuzzy de sistemas servo-hidráulicos de alta frequência. *Rio de Janeiro: PUC-Rio*, 2018.

[40] MURUGADOSS, R.; RAMAKRISHNAN, M. Universal approximation using probabilistic neural networks with sigmoid activation functions. In: IEEE. *2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR-2014)*. 2014. p. 1–4.

[41] MATHWORKS, I. T. *Matlab*. `https://www.mathworks.com/`. Acesso em: Junho de 2018.

[42] ANATEL. *Agência Nacional de Telecomunicações - SRD*. `http://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/srd.php`. Acesso em: Janeiro de 2017.

[43] BPN066, E. *Guide on SFN Frequency Planning and Network Impementation with regard to T-DAB and DVB-T.* : July, 2005.

[44] HERRING, K. T. et al. Path-loss characteristics of urban wireless channels. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, IEEE, v. 58, n. 1, p. 171–177, 2010.

[45] USGS. *Earth Explorer*. `https://earthexplorer.usgs.gov/`. Acesso em: Set de 2018.

[46] ANATEL. *Agência Nacional de Telecomunicações*. `http://www.anatel.gov.br/institucional/`. Acesso em: Junho de 2018.

[47] FRAGA ANDERSON F, L. E. M. *Predição do Sinal de TV Digital Utilizando a Recomendação ITU R P.1546 em Conformidade com as Resoluções No 398 e No 583 da ANATEL.* : Setembro, 2014.