

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMUNICAÇÕES**

LUCAS RAFAEL DE AGUIAR SILVA

SISTEMA DETECTOR E LOCALIZADOR DE CAÇADOR

**RIO DE JANEIRO
2023**

LUCAS RAFAEL DE AGUIAR SILVA

SISTEMA DETECTOR E LOCALIZADOR DE CAÇADOR

Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Comunicações do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Comunicações.

Orientador: Prof. José Antonio Apolinário Junior,
D.Sc.

Rio de Janeiro
2023

LUCAS RAFAEL DE AGUIAR SILVA

Sistema detector e localizador de caçador

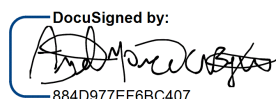
Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Comunicações do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Comunicações.

Orientador: Prof. José Antonio Apolinário Junior.

Aprovada em 09 de Outubro de 2023, pela seguinte banca examinadora:



Prof. José Antonio Apolinário Junior - D.Sc. - IME - Presidente

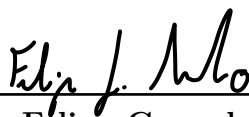
DocuSigned by:

884D977EF6BC407...

Cel R/1 Angelo Marcio Cardoso Ribeiro Borzino - D.Sc. - CTEx



Prof. Felipe Aurelio Caetano de Bastos - D.Sc. - IME

Maj Luiz Renault Leite Rodrigues - M.C. - IMBEL/FMCE



Cap Felipe Gonçalves Serrenho - M.C. - IME

Rio de Janeiro

2023

*Este trabalho é dedicado a todos que um dia passaram por minha vida e,
por menores que sejam, deixaram fragmentos em minha memória.*

AGRADECIMENTOS

O agradecimento principal vai para Prof. José Antonio Apolinário Junior, meu orientador, que me auxiliou durante toda a trajetória do meu projeto, tanto com ideias quanto com correções. Agradeço também aos meus amigos, que sempre me permitiram comunicar minhas dificuldades e dúvidas sobre o projeto, além de oferecerem ajuda e palavras de incentivo que não me permitiram desistir. Agradeço ainda à minha família, que mesmo longe, me deram todo o apoio necessário para eu me desenvolver e encarar dificuldades ao longo de toda a minha vida. E esses agradecimentos se estendem a cada uma das pessoas que passaram pela minha vida e deixaram algum aprendizado: esse trabalho não se concluiria sem a sua ajuda.

RESUMO

A detecção de sinais sonoros impulsivos e a classificação adequada desses sinais como tiros é uma peça chave para a estimação da direção na qual um caçador realizou o disparo, procedimento relevante em termos de segurança em âmbito militar. Em situação de combate, esse processamento de sinais apresenta maior complexidade, tendo em vista a necessidade de execução de algoritmo em tempo real, além da presença de ruído ambiente desconhecido. Este documento aborda as situações de emprego e armamentos dos caçadores, o estado da arte dos métodos de detecção e classificação dos sinais envolvendo o treinamento desses métodos, o emprego em sinais reais e a comparação entre os resultados obtidos por eles com o intuito de elencar o método ou o conjunto de métodos mais adequados para o Projeto Caçador.

Palavras-chave: Detecção de sinal de tiro. Caçador. Estimação da direção de chegada.

ABSTRACT

The detection of impulsive sound signals and the appropriate classification of these signals as gunshots is a key part of estimating the direction in which a sniper fired the shot, a procedure that is relevant in terms of military security. In combat situations, this signal processing presents greater complexity, given its need to execute algorithms in real time, in addition to the presence of unknown ambient noise. This document addresses the employment situations and weapons of snipers, the state of the art of signal detection and classification methods involving the training of these methods, their use in real signals and the comparison between the results obtained by them with the aim of listing the method or set of methods most suitable for the Sniper Project.

Keywords: Detection of a gunshot signal. Sniper. Estimation of direction of arrival.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema de estimação da direção de disparos. . .	14
Figura 2 – Constituição da Turma de Caçadores em uma unidade de infantaria. . .	22
Figura 3 – Fuzil de Precisão IMBEL AGLC .308.	24
Figura 4 – Detalhes técnicos do AGLC .308.	24
Figura 5 – Fuzil Imbel 7,62 M964 MD1 - Fal.	25
Figura 6 – Carabina IMBEL 5,56 IA2.	26
Figura 7 – Detalhes técnicos do IA2.	27
Figura 8 – Forma de Onda e Espectrograma das componentes SW e MB do sinal de tiro.	32
Figura 9 – Efeito Mach.	32
Figura 10 – Coordenadas esféricas em um arranjo de microfones.	34
Figura 11 – Geometria Típica de um Disparo.	34
Figura 12 – Geometria com perda de MB.	35
Figura 13 – Geometria com perda de SW.	36
Figura 14 – Matriz de Confusão 2x2.	37
Figura 15 – Exemplo de ROC.	38
Figura 16 – Sinal MB e os seus coeficientes LPC	39
Figura 17 – Banco de filtros Mel	40
Figura 18 – Arranjos de microfones.	42
Figura 19 – CIOpEsp 2010.	44
Figura 20 – CAEx 2011.	44
Figura 21 – CAEx 2014.	45
Figura 22 – CIAMPA.	46
Figura 23 – Algoritmo base de Detecção e Classificação.	48
Figura 24 – Fluxograma para definição do limiar do Método da Correlação Cruzada. . .	49
Figura 25 – Fluxograma de Detecção do Método da Análise Espectral de Energia. .	50
Figura 26 – Fluxograma de Classificação do Método da Análise Espectral de Energia	52
Figura 27 – Geometria Limite	52
Figura 28 – Fluxograma do Método da Correlação Cruzada.	53
Figura 29 – Exemplo de gráfico auxiliar para a determinação do ponto de operação	54
Figura 30 – Treinamento da classificação do Método da Análise da RSR.	55
Figura 31 – Estrutura da Rede Neural.	56
Figura 32 – Histograma - Correlação Cruzada	57
Figura 33 – ROC de detecção - Correlação Cruzada	58
Figura 34 – Dispersão dos dados de entrada	58
Figura 35 – Matrizes de Confusão de Validação e de Teste	59

Figura 36 – Matrizes de Confusão de Validação e de Teste simplificadas	59
Figura 37 – ROC - Correlação Cruzada	59
Figura 38 – Análise Espectral da Energia - Histograma	60
Figura 39 – Análise Espectral da Energia - ROC	60
Figura 40 – Análise RSR - Gráfico de Probabilidades	61
Figura 41 – Análise RSR - Dispersão dos dados de entrada	61
Figura 42 – Análise RSR - Matrizes de Confusão	61
Figura 43 – Análise RSR - Matrizes de Confusão simplificadas	62
Figura 44 – Análise RSR - Importância dos parâmetros	62
Figura 45 – Análise RSR - Matrizes de Confusão - 18 parâmetros	63
Figura 46 – Análise RSR - Matrizes de Confusão simplificadas - 18 parâmetros . . .	63
Figura 47 – ROC - Análise RSR	64
Figura 48 – Redes Neurais - Matrizes de Treinamento	64
Figura 49 – Redes Neurais - Matrizes de Treinamento Simplificadas	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais fuzis estrangeiros empregados por caçadores	27
Tabela 2 – Detalhes Técnicos do LODS-2000	30
Tabela 3 – Distribuição de SW e de MB	43
Tabela 4 – Quantidade de janelas de cada tipo no treinamento e no teste	43
Tabela 5 – Composição do vetor de entrada	49
Tabela 6 – Tempo de Processamento	65
Tabela 7 – Resultados Brutos	65
Tabela 8 – Erros Brutos	66
Tabela 9 – Desempenho Geral (Métrica Proposta)	66
Tabela 10 – Taxa de Erro	67
Tabela 11 – Coeficiente F1 Score	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
SW	Onda de Choque, do inglês <i>Shock Wave</i>
MB	Explosão do Cano, do inglês <i>Muzzle Blast</i>
AGLC	Athos Gabriel Lacerda de Carvalho
AMAN	Academia Militar das Agulhas Negras
EME	Estado Maior do Exército
SIEsp	Seção de Instrução Especial
AM	Anti-Material
AP	Anti-Pessoal
MOA	Minuto de Ângulo
IMBEL	Indústria de Material Bélico do Brasil
MSE	Erro Médio Quadrático
CAEx	Centro de Avaliações do Exército
CIOpEsp	Centro de Instrução de Operações Especiais
CIAMPA	Centro de Instrução Almirante Milcíades Portela Alves
BSA	Consciência Situacional Boomerang, do inglês <i>Boomerang's Situational Awareness</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global
STFT	Transformada de Fourier de Tempo Curto
DFT	Transformada discreta de Fourier
LODS	Sistema de detecção óptica a laser
ROC	Características Operacionais do Receptor
LPC	Codificação Preditiva Linear
MFCC	Coefficiente Cepstrum de Frequência Mel

SVM Máquina de Vetores de Suporte

RSR Razão Sinal-Ruído

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	O CAÇADOR	17
2.1	HISTÓRICO SOBRE OS CAÇADORES	17
2.1.1	CONTEXTO MUNDIAL	17
2.1.2	ORIGEM NO BRASIL	20
2.2	EMPREGO DOS CAÇADORES	21
2.2.1	MISSÃO	21
2.2.2	ORGANIZAÇÃO	21
2.3	ARMAMENTO	23
2.3.1	FUZIL DE PRECISÃO IMBEL AGLC .308	23
2.3.2	METRALHADORA .50 M2 BROWNING	25
2.3.3	FUZIL IMBEL 7,62 M964 MD1 - FAL	25
2.3.4	CARABINA IMBEL 5,56 IA2	26
2.3.5	PRINCIPAIS ARMAS ESTRANGEIRAS	26
2.4	MEDIDAS CONTRA CAÇADORES	27
2.4.1	METRAVIB DEFENSE: PILAR V	28
2.4.2	RAYTHEON: BOOMERANG	29
2.4.3	UA.RPA: LODS-2000	29
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	31
3.1	COMPONENTES CARACTERÍSTICAS DE UM DISPARO	31
3.1.1	ONDA DE CHOQUE	31
3.1.2	EXPLOSÃO DA ESPOLETA	33
3.2	GEOMETRIA DE UM DISPARO	33
3.2.1	CONFIGURAÇÃO TÍPICA	34
3.2.2	PRESENÇA DE OBSTÁCULOS - PERDA DE MB	35
3.2.3	ARRANJO DE MICROFONES ATRÁS DO ATIRADOR - PERDA DE SW	35
3.3	PRINCÍPIOS GERAIS DA DETECÇÃO	36
3.3.1	HISTOGRAMAS	36
3.3.2	MATRIZ DE CONFUSÃO	37
3.3.3	CURVA ROC	38
3.4	CONSIDERAÇÕES GERAIS DE CLASSIFICAÇÃO	38
3.4.1	COEFICIENTES LPC	38
3.4.2	COEFICIENTES MFCC	40

3.4.3	SVM KERNEL	41
4	METODOLOGIA	42
4.1	ARRANJOS DE MICROFONES	42
4.2	BASES DE SINAIS	42
4.2.1	CIOPESP 2010	44
4.2.2	CAEX 2011	44
4.2.3	CAEX 2014	45
4.2.4	CIAMPA 2010	45
4.2.5	RUÍDO AMBIENTE	46
4.2.6	OUTROS SINAIS IMPULSIVOS	46
4.3	PREPARAÇÃO DA BASE DE SINAIS	46
4.3.1	REAMOSTRAGEM	46
4.3.2	NORMALIZAÇÃO E JANELAMENTO	47
4.3.3	FILTRO DE MEDIANA	47
4.4	MÉTODOS	48
4.4.1	MÉTODO DA CORRELAÇÃO CRUZADA	48
4.4.2	MÉTODO DA ANÁLISE ESPECTRAL DA ENERGIA	50
4.4.3	MÉTODO DA RAZÃO SINAL-RUÍDO	52
4.4.4	MÉTODO USANDO REDES NEURAIS	55
5	RESULTADOS	57
5.1	TREINAMENTO	57
5.1.1	MÉTODO DA CORRELAÇÃO CRUZADA	57
5.1.2	MÉTODO DA ANÁLISE ESPECTRAL DE ENERGIA	58
5.1.3	MÉTODO DA RAZÃO SINAL RUÍDO	60
5.1.4	MÉTODO USANDO REDES NEURAIS	63
5.2	COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS	63
5.2.1	TEMPO DE PROCESSAMENTO	65
5.2.2	QUADROS COMPARATIVO	65
5.2.3	DESEMPENHO	66
6	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A – ALGORITMO DA REDE NEURAL	73

1 INTRODUÇÃO

Os conflitos armados modernos apresentam caráter tecnológico e híbrido (isto é, a guerra ocorre tanto em termos físicos quanto cibernéticos e informacionais). A guerra da Ucrânia, por exemplo, constitui um conflito armado entre a Rússia e a Ucrânia que possui grande repercussão devido ao elevado uso de tecnologias bélicas na guerra [1]. Drones, guerra cibernética, blindados modernos, táticas não convencionais constituem o dia a dia desse conflito, dotando os combatentes de ambos os lados de meios para neutralizar seus inimigos. Equipamentos de grande porte como blindados e obuseiros lançam projéteis que rasgam o céu e destroem o campo de batalha. No entanto, um dos perigos que os soldados de qualquer um dos lados está sempre sujeito é bem mais silencioso: atiradores de precisão [1].

Também conhecidos como atiradores de elite, o trabalho deles é adentrar ambientes de combate e se esconder, seja por dissimulação ou por camuflagem, até o momento do disparo e eliminação de um alvo importante. Após o cumprimento da missão, o atirador de elite troca sua posição enquanto a tropa inimiga se encontra desorientada em relação à direção que se encontrava o atirador. Com isso, o perigo continua iminente para os soldados [2].

Tecnologias de detecção de disparos são ferramentas que já são utilizadas para perícia de crimes, visto que a polícia forense utiliza áudios de atentados para o processamento e detecção da posição do atirador e auxílio na investigação [3]. A Figura 1 apresenta o arcabouço de um sistema genérico de obtenção da Direção de Chegada do disparo. Esse processamento é feito em ambiente controlado, visto que a geolocalização do ambiente no qual o tiro ocorreu é conhecida, o ganho referente ao microfone pode ser aferido, além de que todo o áudio analisado é conhecido e o instante do disparo pode ser recortado visualmente a partir do áudio. Voltando-se para situações de emprego em combate armado, o processamento é feito em tempo real e sem o prévio conhecimento do terreno, o que incute novos desafios para o emprego adequado dessa tecnologia [4].

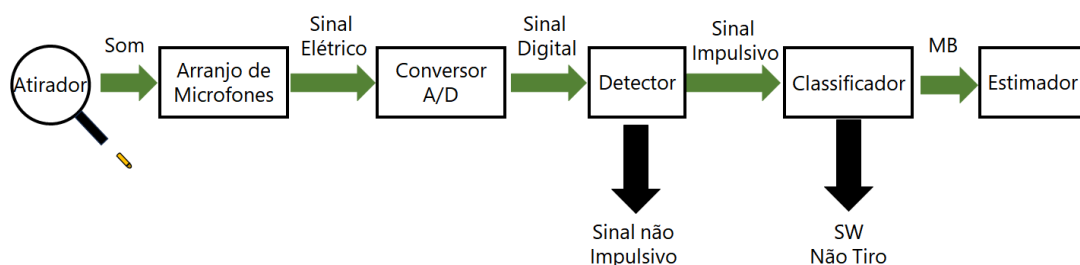


Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema de estimação da direção de disparos.

Esse trabalho tem por objetivo analisar métodos de processamento digital de sinais para a detecção de sinais impulsivos e verificar se esses sinais foram provenientes do disparo de armas de precisão, etapas evidenciadas na Figura 1 pelos blocos Detector e Classificador. Para isso, foram implementadas e avaliadas neste trabalho quatro técnicas: correlação cruzada empregada em [5], análise espectral da energia do tiro proposta em [6], análise em duas etapas envolvendo a relação sinal-ruído e o emprego da RBF SVM Kernel para classificação proposta em [4] e análise mediante a aplicação de redes neurais [7]. Além de fazer uma comparação entre os métodos citados anteriormente, este trabalho também propôs algumas modificações nos algoritmos para aprimorar o desempenho geral.

Disparos de armas de fogos são percebidos como eventos acústicos impulsivos com elevado conteúdo espectral. Desse modo, assim como outros eventos impulsivos, ocorrem picos no sinal captado por um microfone ao ocorrer um disparo. O evento de disparo de uma arma de precisão cujas munições, após ignição, superam a velocidade do som possui dois eventos sonoros: Onda de Choque (ou Shock Wave, SW) e o Explosão da Espoleta (ou Muzzle Blast, MB). O caminho do projétil supersônico ao longo de sua trajetória ocasiona deformações de pressão mecânica transmitidas até o microfone, sendo denominado esse evento acústico de SW. Já o evento acústico decorrente das ondas sonoras emitidas pelo funcionamento do rifle, como a rápida expansão do gás quente por ocasião da saída da munição do cano após a ignição da espoleta, é denominado MB [6].

Como o deslocamento do SW se inicia por um movimento ultrassônico, o primeiro sinal recebido em um microfone por ocasião do disparo usualmente é o SW. Seu formato geral é a forma de um "N", possuindo eventualmente uma repetição desse sinal logo após a sua ocorrência pela possibilidade de reflexão no solo. O MB chega usualmente após o SW e possui a característica de ser menos intenso em termos de energia. É importante ressaltar que tanto o SW quanto o MB estão intimamente relacionados à geometria do cenário onde ocorre o disparo, visto que barreiras físicas podem diminuir a intensidade, causar multipercursos ou até eliminar esses sinais [6].

Em termos de degradação do sinal, o SW sofre menor interferência do canal no qual se encontra, tendo em vista que ele inicia sua trajetória num ponto mais próximo do receptor em visada direta. Desse modo, o valor apresentado pelo seu pico é maior do que o valor apresentado pelo MB, considerando que ambos estão suficientemente distantes do microfone. Por esse motivo, a detecção do SW é mais simples do que a detecção do MB. Porém, somente a detecção do SW não é suficiente para a determinação da direção de onde partiu o tiro, porque a análise do MB fornece os principais parâmetros que serão utilizados para essa computação [4].

É importante notar também que o meio no qual tanto o arranjo de microfones quanto o atirador estão inseridos é relevante para a estimação da Direção de Chegada (DOA). A presença de obstáculos entre o atirador e o arranjo de microfones (por exemplo,

uma floresta densa) pode provocar a ocorrência de multipercursos, fenômeno no qual a onda se propaga para os microfones por vários caminhos devido a reflexões. O ruído ambiente do local pode dificultar o discernimento entre a ocorrência de um tiro e um barulho que se destaque entre os demais no ambiente [8].

Outro fator que aumenta a dificuldade de detecção de tiro é a recepção com a falta de uma das ondas características do tiro. Fora o caso trivial no qual existe um grande obstáculo entre o atirador e o microfone por meio do qual as ondas são refletidas e não chegam no microfone, existem dois casos: ausência de SW e ausência de MB. O primeiro caso ocorre quando o arranjo de microfones se encontra fora do ângulo de visada das ondas de choque geradas pelo projétil, que não atingem o microfone. O segundo caso é exemplificado quando existe um objeto entre o atirador e o arranjo de microfones, porém a trajetória do tiro permite que as frentes de onda de choque do tiro alcancem o arranjo. Existe perda de informação em ambas as situações, porém perder o MB é mais crítico, pois ele é mais importante para a computação da direção do atirador [8].

2 O CAÇADOR

O termo Caçador corresponde ao modo como o Exército Brasileiro denomina os seus atiradores de elite ou franco-atiradores, combatentes que aplicam armamentos de precisão de longo alcance, técnicas e táticas furtivas e específicas para a eliminação de objetivos. No contexto do Exército Brasileiro, o emprego, equipamento, missões, táticas e efeitos desejados estão descritos no Manual IP-21-2, conhecido como Manual do Caçador. Mais do que isso, a denominação de um combatente por esse termo se encontra atrelada à realização de um curso específico, na qual é incutida a ideia de eliminação certa, "Um tiro, uma morte" [2].

Os caçadores também possuem aplicação no reconhecimento de áreas e obtenção de informações relevantes acerca de movimentações inimigas, além da detecção de oportunidades e falhas na percepção e proteção do alvo. Nesse quesito, os ideais dos caçadores se assemelham ao seu equivalente civil no que tange à obtenção de padrões de comportamento e busca por uma falha na percepção do animal para o abate em tiro único. A origem do termo caçador remonta às atividades de caça feitas pelos ingleses durante a Colonização Inglesa da Índia, na qual colonos ingleses praticavam a caça esportiva de uma ave denominada "Snipe" (conhecido no Brasil como Maçarico), logrando a denominação "Sniper" (termo inglês de caçador) e respeito de seus pares quem obtinha êxito nessa caça [3].

O respeito pelos franco-atiradores suplanta a esfera militar, atingindo também o imaginário popular. A força da expressão "caçador" possui um tom turbulento e ferrenho, assegurando excitação e medo nos filmes e representações desses soldados na mídia e artes [3]. Não é incomum os caçadores receberem nomes específicos e terem seus feitos elevados a lendas em guerras, por exemplo a atiradora soviética Lyudmila Pavlichenko, uma franco-atiradora Ucraniana que provocou o terror nas tropas alemãs durante a Segunda Guerra Mundial pela eliminação de 309 soldados inimigos, recebeu o nome de "Lady Death" (em tradução direta, a "Senhora Morte"). Sua fama fez com que as tropas alemãs usassem megafones no campo de batalha tentando recrutar a atiradora ucraniana [9].

2.1 Histórico sobre os caçadores

2.1.1 Contexto Mundial

De acordo com Gondim [10], é extremamente desafiador determinar um período específico ou evento que tenha levado ao surgimento dos franco-atiradores. Desde a antiguidade, as habilidades de caça à distância desenvolvidas pelos seres humanos desempenharam um papel crucial na obtenção de alimentos e também eram aplicadas em conflitos com

tribos ou grupos adversários. Embora o alcance dessas armas fosse significativamente inferior aos armamentos utilizados nas guerras modernas, pedras, lanças e estilingues eram ferramentas que, com a precisão resultante de um treinamento exaustivo ou necessidade, causavam danos e baixas nos alvos [10].

O primeiro registro escrito do uso de franco-atiradores em guerras remonta à Roma Antiga, quando eram empregados os escorpiões - grandes bestas capazes de disparar flechas com precisão a mais de 300 pés (equivalente a 91,44 metros). O uso de ferramentas semelhantes, como arcos, bestas e catapultas, persistiu durante a Idade Média, embora não houvesse uma ênfase significativa na eliminação precisa de inimigos em longas distâncias. Os conflitos dessa época baseavam-se principalmente em táticas de combate corpo a corpo. A estratégia de reduzir o poder de combate inimigo à distância foi desenvolvida à medida que o seu emprego começou a ter um impacto significativo na estratégia militar. Um exemplo notável disso ocorreu na Guerra dos Cem Anos, em que o exército inglês precisou compensar a diferença numérica em relação ao exército francês através do treinamento especializado de arqueiros de longa distância, que causavam medo, confusão e baixas nas tropas inimigas [10].

O primeiro emprego dos franco-atiradores com fuzis de longo alcance em guerra de ampla dimensão foi na Guerra de Independência dos Estados Unidos da América, na qual a quantidade reduzida de combatentes americanos requereu a criação e o emprego de um grupo de caçadores de pele veteranos que estavam acostumados ao uso de rifles de precisão para a caça, que ficaram conhecidos como "Sharpshooters". Segundo Gondim [10], a precisão dos rifles Brown Bess utilizados pelo exército britânico era de 80 jardas (aproximadamente 73,15 metros), enquanto a precisão dos rifles Kentucky empregados pelos atiradores de elite americanos era de 300 jardas (aproximadamente 274,32 metros). Essa grande diferença de alcance preciso entre os dois rifles aliada ao emprego de táticas de guerrilha pelos combatentes americanos foram alguns dos motivos militares do êxito americano nesse combate, além de ser o pilar de sustentação da mística dos atiradores de elite, tendo em vista que, segundo Lelis [3], a simples existência da unidade de elite provocava o pânico nas tropas inimigas porque eles não eram vistos, somente o sibilar do tiro e a morte eram conhecidos. Mais do que isso, a aparente invisibilidade desses soldados conferiu a eles termos pejorativos, tendo em vista que os britânicos consideravam essas táticas indignas e covardes [3].

A importância dos atiradores de longa distância já estava lançada na mente dos projetistas técnicos e táticos militares, o que resultou no desenvolvimento tanto de tecnologias mais eficientes como os fuzis raiados e os projéteis cônicos quanto de táticas e de treinamentos específicos que aumentavam a distância útil desses atiradores, dificultando sua identificação. Duas tecnologias que retrataram esse avanço foram a luneta, amplamente empregada nos fuzis de precisão, e pólvora que libera pouca fumaça, o que contribuiu para

melhorar a camuflagem dos franco-atiradores [11].

A Primeira Guerra Mundial foi um conflito caracterizado pela estagnação do confronto em trincheiras, onde os exércitos ficavam posicionados em uma curta distância do inimigo, incapazes de invadir suas trincheiras devido ao alto número de baixas que isso acarretaria. Nesse contexto, além das doenças, fome e condições mentais adversas que afetavam os soldados britânicos e franceses, o exército alemão investiu significativamente no treinamento de unidades especializadas de atiradores de elite, que causaram um grande número de baixas no lado da Tríplice Entente, gerando um sentimento de medo [10]. Os americanos e britânicos foram então compelidos a seguir o exemplo alemão e criar suas próprias unidades de atiradores, a fim de igualar seu potencial destrutivo. Da mesma forma, os soviéticos estabeleceram várias escolas e cursos de atiradores após reconhecerem o impacto que um único indivíduo poderia ter no campo de batalha, como evidenciado por Simo Häyhä, um caçador finlandês que abateu mais de 500 soldados russos durante a Invasão Soviética da Guerra de Inverno [10].

Durante a Segunda Guerra Mundial, inicialmente subestimou-se o potencial dos atiradores frente aos desenvolvimentos bélicos e táticos que envolviam explosões e rápida destruição do campo de batalha. No entanto, vários confrontos mostraram que os atiradores de elite ainda tinham o efeito desejado de causar confusão nas fileiras inimigas [10]. Durante esse conflito, duas escolas de caçadores destacaram-se: a escola russa, focada em táticas e camuflagem, aproveitando-se às vezes de incursões noturnas para eliminar oficiais de alta patente, e a escola alemã, focada em técnicas de neutralização de alvos importantes junto às tropas. A atuação soviética nessa área foi notável, com diversos atiradores de elite soviéticos presentes na lista dos caçadores mais letais da Segunda Guerra Mundial [11].

O emprego dos caçadores em ambos os lados dos conflitos se tornou recorrente após a Segunda Guerra Mundial. A Guerra da Coréia, A Guerra da Chechênia, a Guerra nas Maldivas, A Guerra no Afeganistão e a Guerra no Vietnã são os principais exemplos onde o emprego dos franco-atiradores alterou o curso do conflito, em especial pelo uso favorável do terreno para a camuflagem [11]. Os vietnamitas, por exemplo, se embrenhavam em altas árvores e se camuflavam nesses ambientes por meses dotados com pouca quantidade de suprimentos e munições, e ainda logravam êxito em eliminar tropas americanas. O estilo furtivo dos vietnamitas forçou os americanos a tanto desenvolverem suas próprias escolas de atiradores de elite quanto a desenvolverem técnicas contra a atuação dos caçadores inimigos, como a identificação de árvores nas quais as aves locais não pousavam por causa da presença de um soldado inimigo [10].

Os conflitos modernos como a Guerra do Iraque, a Guerra do Afeganistão e a Guerra da Ucrânia continuam a contar com os atiradores de elite na eliminação de alvos. São nesse contexto que franco-atiradores como Chris Kyle, o sniper americano, e Kurt, um caçador ucraniano, elevam seus nomes e místicas por cumprir objetivos e detonar a

moral dos inimigos. Porém, a presença dos atiradores suplantou o aspecto de conflitos armados e atingiu também o meio urbano, tanto pela presença de unidades especializadas de franco-atiradores em órgãos de renome, como a SWAT, SAS, GIGN e Força Delta, quanto pela ascensão de grupos terroristas. Missões que envolvem neutralização de alvos com cronologia e precisão se propagaram nas forças táticas ao redor do mundo, como foi visualizado no sequestro de um ônibus escolar francês pelo grupo terrorista Dijibouti, no qual a GIGN alocou um caçador para cada terrorista presente na situação e, após a falha na negociação e ordem de fogo, esses atiradores neutralizaram de modo rápido e simultâneo os seus alvos [3].

2.1.2 Origem no Brasil

Tendo em vista a tendência mundial de valorização do emprego de caçadores em conflitos, o Exército Brasileiro decidiu treinar caçadores para aumentar o seu poder dissuasório. O início das pesquisas acerca desse tema remota ao ano de 1973, no qual a primeira instrução sobre o tema caçador foi ministrada na Seção de Instrução Especial (SIEsp) da Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN). Em 1998, o Estado Maior do Exército (EME) realizou uma alteração da estrutura organizacional dos batalhões de infantaria, adicionando uma turma de caçadores. Concomitante a essa mudança, a AMAN foi incumbida de realizar as pesquisas e documentar as diretrizes que iriam compor o primeiro documento a tratar especificadamente sobre os atiradores de elite, o Manual IP 21-2 - o Caçador [12].

As diretrizes fornecidas pelo Manual IP 21-2 serviram de base para o 1º estágio de Caçador, ministrado e aplicado por instrutores da AMAN em 2001. Os resultados obtidos durante esse curso foram insipientes devido à falta de conhecimento acerca das táticas e técnicas empregas pelos franco-atiradores modernos. Para reverter esse quadro, o 1º Tenente de Artilharia Guilherme Guimarães Ferreira foi selecionado para ir realizar o curso de caçadores na Escola de Caçadores do Exército dos Estados Unidos da América, por meio do qual retornou estabelecendo as bases necessárias para tornar íntegro o curso de caçador no Brasil, remodelando o Manual do Caçador e elaborando o primeiro programa padrão para a formação de caçadores [12].

O projeto "Caçador da AMAN", termo que foi utilizado para representar os estudos sobre os subsídios necessários para a formação de caçadores, trouxe para o Exército Brasileiro o desenvolvimento do primeiro armamento de precisão, o AGLC (Athos Gabriel Lacerda de Carvalho), além do desenvolvimento de uma massa crítica de caçadores pelos Comandos Militares de Região do Brasil. Apesar do sucesso das pesquisas, o EME não homologou o Estágio de Caçador e o curso de Caçador do Siopeps, de tal modo que o treinamento dos franco-atiradores continua como uma iniciativa da Sessão de Tiro da AMAN para o aperfeiçoamento do combatente, porém sem o realce necessário que é

visualizado em outras escolas de formação ao longo do mundo [12].

2.2 Emprego dos caçadores

2.2.1 Missão

O Manual IP-21-2 é conciso no que tange às missões dos caçadores do exército brasileiro: eliminar alvos inimigos, eliminar atiradores de elite inimigos, tornar indisponíveis meios materiais ou meios de transporte e, sempre que possível, fazer o reconhecimento da área e da força inimiga e comunicar esses informes para os seus aliados. Nesse ínterim, cabe ressaltar as funções de abate e reconhecimento dotados desses especialistas, pautadas nas habilidades de camuflagem e precisão na mira [2].

É importante ressaltar que os caçadores não são utilizados somente como recursos antipessoais, porém também como recursos de danificação de materiais, sendo eles classificados de acordo com o armamento empregado. Caçadores Antipessoal (AP) possuem a missão de neutralização de alvos humanos, tais como soldados responsáveis pela comunicação, chefes de comando e controle e comandante de fração inimigos. Caçadores AntiMaterial (AM) são utilizados para tornar indisponível meios materiais inimigos, como antenas, sensores, equipamentos de guerra eletrônica, equipamentos de comunicações e lançadores de mísseis [2].

Com relação aos efeitos desejados com o emprego dos atiradores de elite, o Manual IP-21-2 estabelece como primordiais causar baixas nas linhas inimigas, diminuir a velocidade de movimentação, baixar a moral da tropa inimiga, instalar o medo e dificultar a reação inimiga no que tange à busca pela neutralização do caçador. A aplicação eficaz de um franco-atirador dificulta à tropa oponente realizar táticas complexas, fator que potencializa aos aliados explorar as fraquezas instauradas no inimigo para aproveitamentos táticos [2]. Segundo Lellis, "A simples presença de um sniper pode imobilizar unidades inteiras em frentes de batalha importantes por tempo indeterminado, conforme foi comprovado nos conflitos travados pela posse da capital da Chechênia, Grozny. Nesses conflitos um único franco-atirador, e muitos eram mulheres, detinha as forças inimigas por longos períodos, interrompendo o avanço geral das tropas russas" [3].

2.2.2 Organização

O Manual IP-21-2 introduziu modificações no Quadro de Efetivos e no Quadro de Organização das Unidades de Infantaria, resultando na organização dos caçadores em duas equipes, sendo cada equipe composta por dois caçadores. A Figura 2 ilustra o organograma que descreve a estrutura da turma de caçadores em uma unidade de infantaria [13].

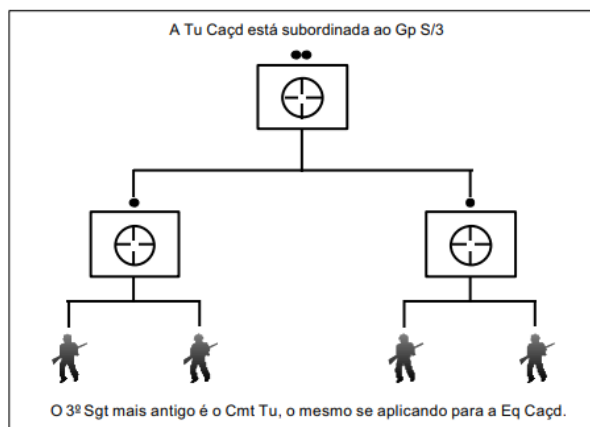


Figura 2 – Constituição da Turma de Caçadores em uma unidade de infantaria [2].

A doutrina do Exército Brasileiro prescreve que cabe ao comando da unidade todas as decisões táticas relativas à turma de caçadores, em especial quanto ao emprego como reconhecimento, ação direta sobre uma subunidade ou reforço [13]. Cabe ainda ressaltar que, eventualmente, os caçadores podem ser empregados de modo isolados ou em duplas para missões de infiltração das linhas inimigas. A atuação em dupla é comum para a alternância entre os postos de observação da movimentação inimiga com o objetivo de diminuir a sobrecarga sobre o atirador [2].

A seleção do pessoal que será permitido a participar do curso de caçador é criteriosa, tendo em vista a necessidade de atributos técnicos, físicos e cognitivos para sustentar as missões extenuantes a que esses fuzileiros podem ser submetidos. Mais do que isso, o conhecimento das técnicas empregadas pelos caçadores pode constituir um perigo nas mãos de pessoas com tendência aos crimes, conforme foi visualizado pelo assassinato do 35º Presidente dos Estados Unidos da América, John F. Kennedy, pelo veterano da marinha dos Estados Unidos Lee Harvey Oswald [10]. Tendo isso em vista, o Manual IP-21-2 coloca como requisitos vitais para a seleção de um candidato a caçador [2]:

- ser do sexo masculino;
- antecedentes familiares sem observações negativas;
- convivência familiar exemplar;
- ausência de alterações disciplinares;
- condições mentais saudáveis;
- equilíbrio emocional;
- resistência à fadiga;

- paciência, inteligência, criatividade e bom preparo físico;
- visão 20/20 ou que possa ser corrigida por óculos;
- motivação para a função e ausência de vícios; e
- resultados excelentes nas sessões de tiro com fuzil.

2.3 Armamento

O equipamento empregado pelos caçadores deve buscar lhe dar condições de suportar condições adversas em caso de longos períodos de camuflagem aguardando a oportunidade de disparo aparecer e fornecer os requisitos técnicos necessários para um tiro de precisão. Desse modo, o equipamento deve conter sistemas ópticos, munição, fardamento leve e cômodo, que possibilitem a atuação descentralizada do caçador, fornecendo-lhe maior versatilidade. O fuzil deve ser adequado para a missão do caçador, podendo o armamento ser do tipo AP ou AM. Em ambos os casos, a precisão deve permitir no máximo a variação de 1 minuto de ângulo (MOA), isto é, uma variação de 2,5 cm a cada 100m [13].

No Brasil, o fuzil de precisão adotado pelo EB como armamento que melhor atende às necessidades dos caçadores brasileiros é o AGLC. Esse equipamento foi consagrado pelos instruídos do curso de caçador devido à sua alta precisão e performance. Porém, a produção nacional do AGLC não supre a demanda de fuzil de precisão tanto para o curso de caçador quanto para o emprego deles na Força Terrestre, o que leva à necessidade de adaptar outros armamentos com luneta de pontaria para o cumprimento do objetivo dos caçadores, embora com menor eficiência [12].

Nesse documento, serão analisados os armamentos AGLC, Fuzil Imbel 7,62 M964A1 MD1, Carabina IMBEL 5,56 IA2 e a Metralhadora .50 M2 Browning, como equipamentos que podem ser empregados por caçadores brasileiros. Serão fornecidas também algumas características técnicas dos principais fuzis de precisão utilizados por caçadores de exércitos estrangeiros.

2.3.1 Fuzil de Precisão IMBEL AGLC .308

Conforme foi visualizado no histórico, o Fuzil de Precisão IMBEL AGLC .308 é uma arma de alta precisão desenvolvida pela Indústria de Material Bélico do Brasil (IMBEL) como resultado dos esforços dos membros do Projeto Caçador brasileiro. O nome AGLC é a sigla do nome "Athos Gabriel Lacerda de Carvalho", Cel Infantaria que criou o fuzil e o batizou com o seu próprio nome [12].

Quanto ao funcionamento, o Fuzil de Precisão IMBEL AGLC .308, representado na Figura 3, é baseado na arquitetura básica dos fuzis e mosquetões de ação Mauser,



Figura 3 – Fuzil de Precisão IMBEL AGLC .308 [14].

um modelo alemão, que utiliza o sistema de operação por ferrolho rotativo. A cada disparo, o ferrolho é impulsionado para trás pelo recuo gerado pela combustão da pólvora. Esse movimento de recuo permite a extração e ejeção do estojo deflagrado, bem como o carregamento de um novo cartucho no mecanismo de disparo [2].

Quanto ao tipo	Portátil
Calibre	7.62 x 51 mm
Funcionamento	repetição, ação Mauser
Carregador	4 tiros, interno
Peso	4.7 kg, descarregada e sem acessórios
Comprimento	1200 mm
Cano	Raiado à direita, passo 304.8 mm (12"), comprimento 609 mm (24")
Vo	820 m/s
Velocidade prática de tiro	5 tiros/minuto
Precisão	< 1 MOA (*)
Acessórios	Lunetas diurna e noturna, bipé, bandoleira, coronha
(*) MOA: do inglês, <i>minute of angle</i> , ou 1/60°, equivale aproximadamente ao ângulo que cobre 2,9 cm a distância de 100 metros, ou 5,8 cm a 200 m e assim sucessivamente	

Figura 4 – Detalhes técnicos do AGLC .308 [14].

A Figura 4 mostra os detalhes técnicos do AGLC .308 retirados do manual desse armamento. Dentre esses detalhes, é importante ressaltar para esse projeto a velocidade inicial do projétil e a precisão dessa arma. Segundo o manual disponibilizado pela IMBEL, o AGLC .308 possui uma velocidade inicial do projétil que pode chegar a valores superiores a 800 metros por segundo, fornecendo-lhe caráter supersônico. Essa velocidade inicial elevada contribui para a estabilidade do projétil em voo e diminui as chances de reação do alvo devido ao baixo intervalo de tempo de trajetória da munição [14].

Com relação à precisão, o AGLC segue o estabelecido no Manual do Caçador, fornecendo uma precisão menor que 1 MOA, característica fundamental para operações de precisão e tiro de longo alcance. O alcance efetivo do fuzil AGLC, segundo o manual, é de 800 metros, enquanto o seu alcance máximo é de 1000 metros, dependendo da habilidade do caçador e da luneta empregada. O AGLC é ergonômico, o que possibilita ao atirador permanece um longo intervalo de tempo na mesma posição sem ser acometido por desconforto [14].

2.3.2 Metralhadora .50 M2 Browning

A Metralhadora .50 M2 Browning, utilizada pelo Exército Brasileiro, é uma arma de fogo robusta cujos projéteis podem atingir a velocidade inicial de aproximadamente 930 metros por segundo, conferindo-lhe uma notável capacidade de penetração, poder de impacto e características supersônicas. A sua munição permite seu emprego como armamento tanto AP quanto AM, podendo ser empregada para abater objetivos de comunicação inimiga, como antenas e centrais de comando. Além disso, seu alcance efetivo é de cerca de 1800 metros, permitindo o engajamento de alvos a longas distâncias com alta efetividade, desde que o atirador utilize lunetas para auxiliar a sua mira [15].

A sua criação foi motivada pela necessidade do exército americano de uma arma capaz de perfurar blindagens mais pesadas durante a Primeira Guerra Mundial. Seu uso se mostrou eficiente na Segunda Guerra Mundial, na qual essa metralhadora era utilizada para alvejar e neutralizar aviões e blindados leves. O Brasil recebeu um número elevado de Browning .50 após o término da Segunda Guerra Mundial, sendo empregado até os dias atuais [15].

2.3.3 Fuzil Imbel 7,62 M964 MD1 - Fal



Figura 5 – Fuzil Imbel 7,62 M964 MD1 - Fal [16].

O fuzil Imbel 7,62 M964 MD1, conhecido como Fal, é uma arma de fogo amplamente utilizada pela força terrestre brasileira, sendo o armamento portátil principal dos combatentes brasileiros. Esse fuzil foi projetado para combates a média distância, porém o uso de tripé de apoio aliado à adição de equipamentos táticos típicos de caçadores (como a luneta), conforme a Figura 5, possibilitam o seu emprego para atingir alvos a longas distâncias [16]. Nos cursos de caçadores brasileiros, esse equipamento é utilizado durante as instruções caso exista escassez do AGLC [12].

No que diz respeito ao funcionamento, este fuzil opera no sistema de funcionamento por recuo de gás com ferrolho rotativo. Isso significa que, a cada disparo, uma pequena porção dos gases resultantes da combustão da pólvora é redirecionada para um cilindro, impulsionando o ferrolho para trás e permitindo a extração e ejeção do estojo deflagrado. Em

seguida, o ferrolho retorna à sua posição inicial pela ação de molas, e concomitantemente a arma é alimentada com uma nova munição [16].

Com relação aos aspectos técnicos, é importante ressaltar que a velocidade inicial do projétil nessa arma é de 840 metros por segundo, o que configura uma velocidade supersônica. Ademais, o seu alcance máximo, com o uso de luneta, é de cerca de 800 metros, sendo adequado para o emprego por caçadores, embora com eficiência menor que o AGLC [16].

2.3.4 Carabina IMBEL 5,56 IA2



Figura 6 – Carabina IMBEL 5,56 IA2 [17].

Desenvolvido pela IMBEL com o objetivo suprir as demandas da Força Terrestre por um equipamento mais versátil e leve para o combatente, esse fuzil representado pela Figura 6 se apresenta como um substituto para o FAL. Sendo de fabricação totalmente nacional, este armamento possui calibre de 5,56 mm, peso menor que o FAL e um punho ergonômico durante o manuseio, fatores que fornecem conforto ao combatente e são úteis em missões que requeiram a permanência em posição de disparo por longos períodos de tempo, como as missões dos caçadores. Destaca-se ainda pela sua grande capacidade de munição no carregador, comportando até 30 munições, e pela sua versatilidade ao permitir a acoplagem de diversos acessórios, como faca, lanterna, apontador laser, lunetas de visada rápida, lunetas de visão noturna, lunetas de precisão e lançador de granadas [18].

Analisando os aspectos técnicos apresentados na Figura 7, a velocidade inicial do projétil ao ser expelido pelo IA2 é de cerca de 780 metros por segundo, conferindo a essa munição caráter supersônico. O alcance útil no qual esse fuzil é empregado é de 300 metros, porém o seu alcance máximo, obtido por meio de utilização de equipamentos adicionais para aumento da precisão, é de 1800 metros [17].

2.3.5 Principais armas estrangeiras

Os armamentos mais utilizados por caçadores estrangeiros são: Barrett M82, Fuzil de precisão Galil, HK PSG-1, M24 Sniper Weapon System, Dragunov (SVD-63) e Walther WA 2000 [3]. A Tabela 1 apresenta as principais características de cada um desses fuzis.

Características do Fz Ass 5,56 IA2	
Munição	5,56 x 45mm
Peso sem carregador e sem acessórios	3,38kg
Peso do carregador vazio:	
Alumínio	0,12kg
Aço	0,25kg
Peso do carregador completo (30 tiros):	
Alumínio	0,50kg
Aço	0,63kg
Comp. coronha aberta	0,85m
Comp. coronha rebatida	0,60m
Comp. Cano	0,35m
Vida do cano	> 10.000 tiros
Raiamento	6 raia passo 254 mm (10") à direita
Velocidade de boca (Vo)	780 m/s (SS109)
Energia cinética de boca (Ec boca)	1015J
Energia cinética à 300m (Ec 300m)	410J
Cadência	730 a 890 tpm
Alcance máximo	1800m
Alcance de utilização	300m
Funcionamento	Repetição, Semiautomático, Automático.

Figura 7 – Detalhes técnicos do IA2 [17].

Tabela 1 – Principais fuzis estrangeiros empregados por caçadores

Fuzis	Origem	Velocidade de saída	Calibre	Alcance Efetivo	Ação
Barrett M82	EUA	850 m/s	.50 BMG	1800 m	Semi-automática
Galil	Israel	800 m/s	7,62 x 51 mm NATO	500 m	Automática
HK PSG-1	Alemanha	868 m/s	7,62 x 51 mm NATO	1000 m	Contra-golpe retardado com roletes
M24	EUA	790 m/s	7,62 x 51 mm NATO	800 m	Ferrolho
Dragunov (SVD-63)	União Soviética	830 m/s	7,62 x 54R	800 m	Semi-automática
Walther WA 2000	Alemanha	910 m/s	7,62 x 51 mm NATO	700 m	Semi-automática

Conforme foi discutido anteriormente neste documento, os principais exércitos do mundo possuem escolas, armamentos e preparação específicas para a formação de caçadores. Todos os fuzis apresentados na Tabela 1 apresentam características particulares de calibre, alcance efetivo e ação. Todos possuem velocidade supersônica na saída do projétil da boca do cano.

2.4 Medidas Contra Caçadores

Conforme visualizado no histórico sobre os caçadores, os exércitos desenvolveram várias estratégias para reduzir o impacto da ação de caçadores inimigos na tropa e determinar a posição do atirador, aprimorando assim as táticas defensivas. Uma das técnicas mais conhecidas de medidas contra franco-atiradores consistia na utilização de

um capacete colocado em um apoio (por exemplo um graveto) para simular a cabeça de um soldado, de modo que o tiro do atirador de elite não matasse um aliado, revela-se a sua posição do caçador inimigo e desperdice munição inimiga [19]. Na Guerra do Vietnã, os caçadores inimigos utilizavam árvores altas para engajar os soldados americanos, de tal modo que o exército americano teve que desenvolver uma tática de observação da balística dos projéteis inimigos e do fluxo de pássaros na região (observando que os pássaros não pousavam em algumas árvores) para determinar a posição do inimigo. Na Guerra do Iraque, os soldados iraquianos usavam escudos vivos de civis para impedir que os caçadores americanos atirassem neles [11].

As táticas de defesa também foram uma preocupação para o Exército Brasileiro durante a sua elaboração e aprimoramento do Projeto Caçador. O melhor método de reação contra um caçador é a aplicação de outro caçador, visto que o conhecimento das táticas de caçadores auxilia o caçador a saber os pontos prováveis nos quais o caçador inimigo deve estar posicionado [19]. O Manual IP-21-2 estabelece que os caçadores recebam, durante o curso, um rigoroso programa de capacitação contra franco-atiradores, de tal modo a poder comunicar aos soldados da unidade de infantaria a qual pertence os métodos de identificação e neutralização do oponente [2].

Além disso, os exércitos em geral estão investindo no uso de equipamentos tecnológicos para a detecção e neutralização dos caçadores. Sistemas avançados de sensoriamento e vigilância, como sensores acústicos, óticos, infravermelhos ou radares, são utilizados para identificar a presença e localização dos atiradores inimigos. Esses sistemas são complementados por tecnologias de contramedidas, como dispositivos de interferência eletrônica, que dificultam as comunicações e a mira dos caçadores [2]. Serão abordados a seguir os sistemas Metravib PILAR V, Boomerang e LODS-2000, soluções comerciais que já são empregadas para a localização de franco-atiradores.

2.4.1 Metravib Defense: PILAR V

Esse sistema, de origem francesa, é utilizado para a detecção, classificação e estimação da localização de atiradores com armamentos de calibre leve. Composto por um ou dois arranjos de quatro microfones em formato tetraédrico, um processador de sinais e um laptop, esse sistema é compacto e tem a capacidade de atuação em tempo real [20].

O processamento é realizado em duas etapas. A primeira etapa envolve o processamento dos sinais obtidos pelos microfones, detecção de eventuais sinais impulsivos e a sua classificação como SW ou MB (ou o eventual descarte de sinais impulsivos não provenientes de tiros). A segunda etapa engloba a estimação da direção do caçador inimigo pela análise da diferença de tempo de chegada do SW e do MB, além da análise balística, de erros de estimação, de eventos impulsivos perdidos e de informação redundante [20].

2.4.2 Raytheon: Boomerang

Boomerang, de origem norte americana, é uma família de sistemas de localização de atiradores inimigos com mais de 12.000 sistemas em operação que possui modelos para veículos (Boomerang III), para tropas desmotorizadas (Boomerang Warrior-X) e para instalações ou terrenos (pela conexão de vários sistemas Boomerang III numa rede). O processo de operação do Boomerang é semelhante ao do PILAR, envolvendo as etapas de detecção, classificação e estimação da direção na qual o atirador inimigo se encontra por meio de um arranjo de microfones [21].

Segundo o manual desse equipamento, a taxa de detecção de disparos desse sistema é superior à 95%, com operacionalidade em todos os tipos de terreno sem necessidade de ajuste pelo usuário, sem falsos alarmes decorrentes de sons não balísticos e tempo de processamento inferior a um segundo. Além disso, esse sistema é capaz de fornecer alerta de áudio e visual da localização do atirador inimigo e ajuste da estimação baseado no movimento do portador [21].

Os sistemas Boomerang de proteção veicular são capazes de fornecer informações do disparo inimigo no terreno, no mar ou no ar, estando o veículo estacionado ou em movimento. O sistema opera até velocidades de 95 km/h e sua instalação é rápida e não necessita de ferramentas extras. Os Boomerang de proteção individuais são sistemas leves e portáteis que apresentam resultados visuais ao soldado do azimuth, elevação, distância e indicação da localização do atirador inimigo no GPS. Os Boomerang de perímetro constituem um arranjo de vários sistemas Boomerang no terreno conectados ao software BSA (Boomerang Situational Awareness), que cruza todos os dados e fornece alerta visuais e audíveis para seus usuários [21].

2.4.3 UA.RPA: LODS-2000

LODS-2000 é um sistema ucraniano dotado de vários sensores óticos em uma estrutura modular e flexível. Esse sistema não é acústico: ele combina as tecnologias de emissão e recepção de pulsos de laser, identificação de informações termais e óticas para maximizar a capacidade de detecção do atirador inimigo, eventualmente sendo capaz de realizá-la antes do disparo ocorrer [22]. A Tabela 2 apresenta alguns detalhes técnicos desse equipamento.

Tabela 2 – Detalhes Técnicos do LODS-2000

Parâmetro	Valor
Distância mínima para detecção	100 m
Distância máxima para detecção	1500 m
Acurácia (distância)	3 m
Ângulo de observação horizontal	180°
Ângulo de observação vertical	30°
Posição Global	GPS
Intervalo de operabilidade de temperatura	-30° C a 50° C
Peso Total	52 kg

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O disparo de uma arma de fogo é um procedimento complexo que requer várias etapas de preparação e análise antes de sua execução. Isso inclui a verificação do equipamento e das condições ambientais, conforme mencionado no capítulo anterior. O entendimento dos principais mecanismos e resquícios de um disparo é fundamental para identificar os melhores métodos de detecção de futuros disparos e de determinação da posição do franco-atirador inimigo [23]. Nesse capítulo, serão discutidos os principais componentes característicos do sinal acústico de um disparo de arma de fogo, a disposição geométrica na qual ocorrem esses eventos e seus elementos, e as ferramentas estatísticas que serão aplicadas nesse documento.

3.1 Componentes características de um disparo

O disparo de uma arma de fogo pode ser analisado como um evento impulsivo que possui uma identidade: ele apresenta diversas particularidades ondulatórias que identificam a sua origem. As principais assinaturas do tiro são o SW, o MB, o Muzzle Flash ("Flashes de Disparo", em tradução livre"), a configuração termal, o formato de vórtice devido à distorção do ar decorrente do efeito Mach (a ser evidenciado posteriormente) e uma possível reflexão do SW [23]. No contexto do Projeto Caçador, a obtenção da trajetória é realizada por meio dos resíduos acústicos, utilizando somente o SW e o MB, os quais estão ressaltados na Figura 8.

3.1.1 Onda de Choque

Conforme foi ressaltado no capítulo anterior, os disparos analisados neste documento possuem caráter supersônico em suas configurações iniciais: a velocidade do projétil durante parte do deslocamento é superior à velocidade do som. O projétil emite ondas sonoras de pressão devido à deformação do ar em cada ponto de sua trajetória, configurando um conjunto linear de fontes de ondas sonoras no qual o início da transmissão está dependente do instante que o projétil alcança o ponto determinado. Desse modo, as esferas formadas pelas frentes de onda de todas essas fontes vão formar um cone denominado Cone de Mach, conforme mostrado na Figura 9 [24].

O SW constitui uma parte das frentes de onda que caracterizam o Cone de Mach, sendo a onda acústica gerada pelo ponto da trajetória da munição cujo segmento de reta que liga esse ponto de despreendimento com o arranjo de microfones é perpendicular às geratrizes do cone de Mach. Nesse ínterim, o sentido de propagação do SW é perpendicular

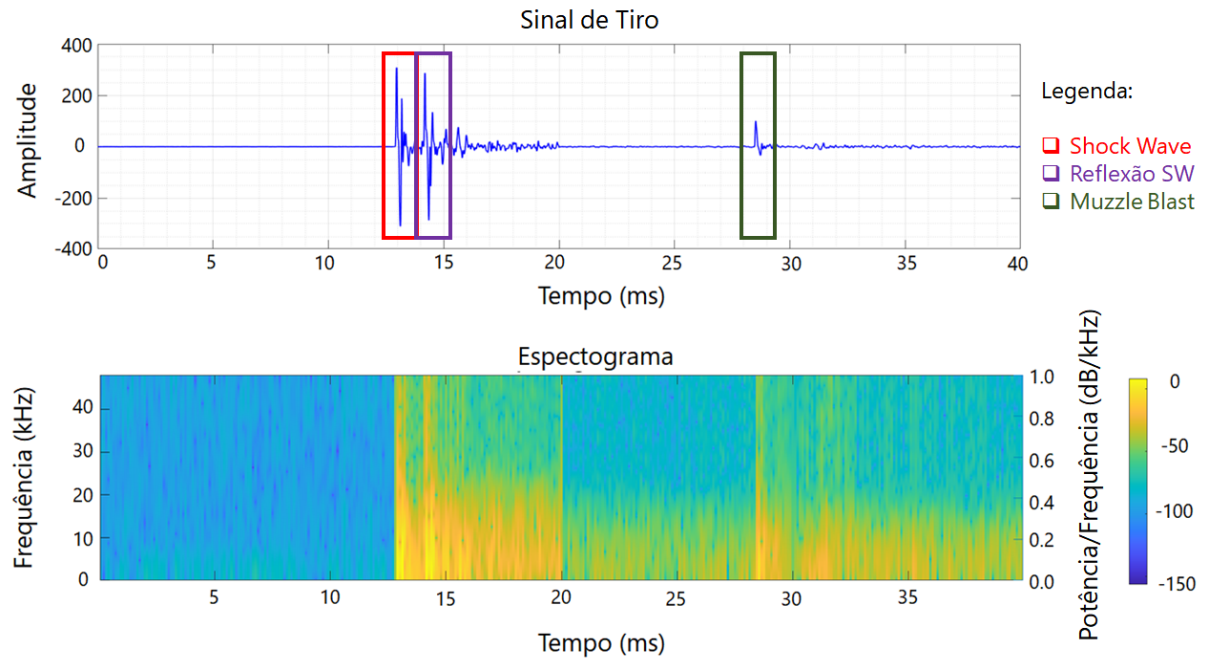


Figura 8 – Forma de Onda e Espectrograma das componentes SW e MB do sinal de tiro.

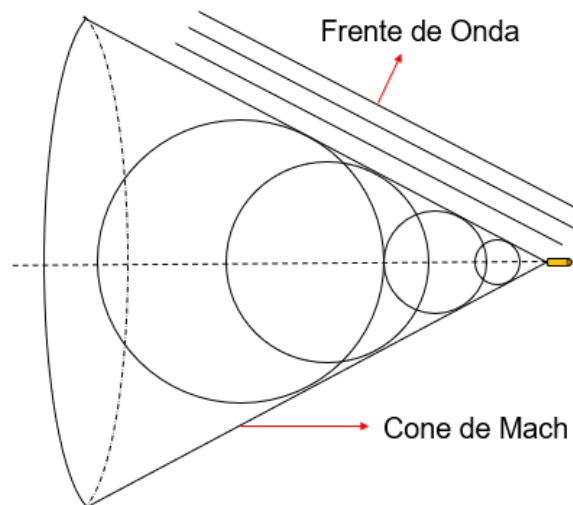


Figura 9 – Efeito Mach.

ao cone de Mach [24].

O SW possui uma elevada intensidade em via direta, notado pelos microfones como um evento impulsivo com formato de N devido ao comportamento não linear do ar que altera a configuração de pressão da frente de onda durante sua formação. Ademais, a reflexão do SW em uma superfície pode ser notada pelos microfones como um evento impulsivo, dependendo do tipo de superfície, aspectos de absorção, reflexão, refração e multipercursos. Assim, além do primeiro impulso em formato de N, é possível ter um segundo impulso com o mesmo formato e uma cauda gerada pelas reflexões [25].

As informações que podem ser obtidas a partir do SW são a assinatura acústica, a sua duração e as suas componentes energéticas. A presença de um impulso pode ser observada tanto pela amplitude da forma de onda como pelo pico de densidade de energia em frequência obtida ao construir o espectrograma do sinal. A duração média do SW fica entre 0,3 ms e 0,5 ms [25].

3.1.2 Explosão da Espoleta

O MB é o fenômeno acústico gerado em armas convencionais pela rápida expansão dos gases quentes decorrente da saída da munição com alta velocidade do cano após a ignição da espoleta. Essa perturbação mecânica em forma de onda possui duração média que varia de 3 ms a 5 ms, se propaga no ar com a velocidade do som naquele ambiente e o seu formato é de um pico, seguido por uma cauda gerada por reflexões de multipercursos [26].

A intensidade sonora do MB é máxima no sentido do deslocamento da munição após a ignição e saída da arma, e sofre depreciação para ângulos fora desse eixo. Apesar dessa característica de direcionalidade, o MB é capaz de ser detectado atrás do atirador, característica que não ocorre para o SW. É crucial destacar que a presença de obstáculos no percurso do som pode provocar perda do MB ou atenuação da intensidade sonora recebida pelo conjunto de microfones [24].

Uma estratégia eficaz empregada por caçadores para mitigar a detecção do MB envolve a utilização de dispositivos silenciadores. Esses silenciadores têm a capacidade de reduzir substancialmente a intensidade sonora gerada pelo MB, tornando mais desafiante a detecção desse sinal impulsivo [24].

3.2 Geometria de um disparo

A obtenção da DOA do atirador necessita de um equacionamento geométrico do ambiente no qual o disparo ocorreu, tendo em vista que a alteração dos eixos pode causar ineficiência e confusão nos algoritmos de obtenção da DOA. Desse modo, é importante conhecer as possíveis configurações geoespaciais de disparo e as situações de ausência de uma ou mais identidades acústicas do tiro [27]. A análise da geometria é realizada em coordenadas esféricas, nas quais a origem dos eixos se encontra no centro do arranjo de microfones, conforme representado na Figura 10.

As coordenadas desse sistema de eixos, em relação ao arranjo de microfones, possuem a seguinte configuração: o azimuth corresponde ao ângulo formado entre a direção do ponto analisado e a direção de um dos microfones horizontais (isto é, um dos microfones do arranjo estará colinear ao eixo x da representação da Figura 10), e a elevação é o ângulo formado com relação ao plano do chão (sendo este paralelo ao plano xy da Figura 10). Como

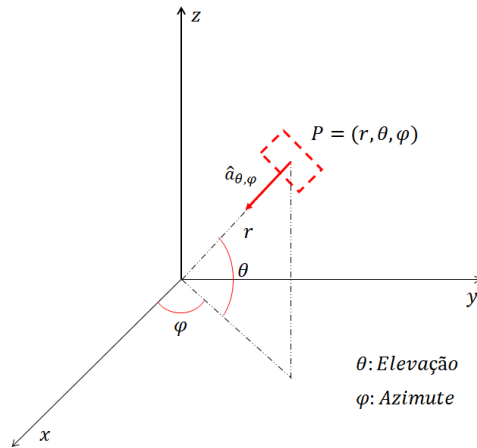


Figura 10 – Coordenadas esféricas em um arranjo de microfones. O vetor $\hat{a}_{\theta, \varphi}$ é unitário e na direção de propagação da onda sonora. O θ é a elevação e φ é o azimute.

os tiros de franco-atiradores possuem uma elevada distância, a elevação possui valores próximos a zero, de tal modo que a análise da geometria será feita por representações 2D, com adequada expansão para o 3D sem alterações notáveis [27].

3.2.1 Configuração típica

A configuração típica prescreve o ambiente limpo, sem obstáculos que possam vir a gerar multipercursos ou obstrução. O arranjo de microfones localizado dentro da linha de visada do atirador terá informação do SW [27]. A Figura 11 apresenta a configuração típica de um disparo sem perda de SW ou de MB.

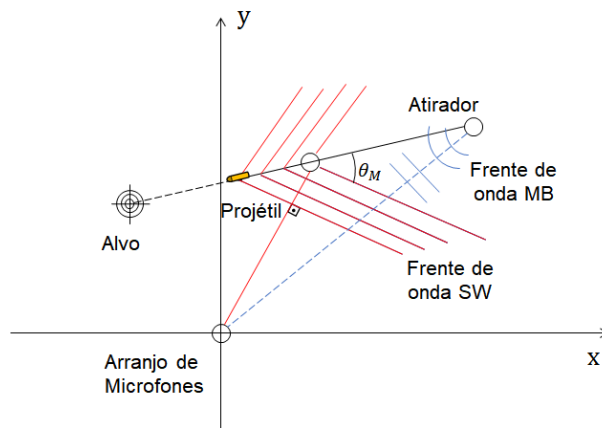


Figura 11 – Geometria Típica de um Disparo.

É importante ressaltar que, dada a elevada distância entre o atirador e o arranjo de microfones, um sinal MB possui linha de visada mais intensa que suas possíveis reflexões. Por outro lado, o SW apresenta multipercursos de tal modo que a primeira reflexão possa ser quase tão intensa quanto a linha de visada, dependendo das superfícies nas quais

ocorrem os fenômenos ondulatórios. Outra característica que salta aos olhos do observador é o fato do SW quase sempre chega antes do MB, tendo em vista que o SW parte de um ponto mais próximo do arranjo de microfones, com a parte anterior do deslocamento sendo feito a uma velocidade supersônica [24].

3.2.2 Presença de Obstáculos - Perda de MB

Como o MB possui maior intensidade em linha de visada direta, a presença de obstáculos entre o atirador e o arranjo de microfones ocasiona a perda dessa identidade acústica. É importante ressaltar que o SW ainda pode ser detectado pelo arranjo, porém a presença de obstáculos também pode ocasionar perda de SW caso o obstáculo bloqueie tanto a linha de visada direta quanto as reflexões da frente de onda proveniente do cone de Mach. Um exemplo de situação na qual ocorre perda de MB se encontra evidenciada na Figura 12. Nessa figura, um obstáculo impede a propagação do MB em direção ao arranjo de microfones.

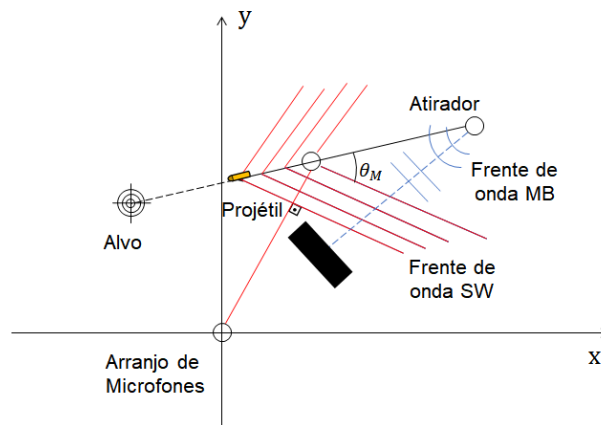


Figura 12 – Geometria com perda de MB.

O processamento da direção da qual o tiro partiu não é possível nesse caso tendo em vista a perda do MB. No entanto, a presença do SW atesta a ocorrência de um disparo supersônico, indicando a presença de franco-atirador inimigo e essa informação pode ser útil para aumentar a precaução da tropa e buscar abrigo.

3.2.3 Arranjo de Microfones atrás do atirador - Perda de SW

Conforme já mencionado, o SW está atrelado à formação do Cone de Mach e possui sentido perpendicular a esse lugar geométrico. Desse modo, existem regiões e situações nas quais o SW não é detectado pelo arranjo de microfones; por exemplo, caso o arranjo de microfones esteja na retaguarda do atirador). A Figura 13 retrata um caso no qual somente o MB é notado pelo arranjo de microfones.

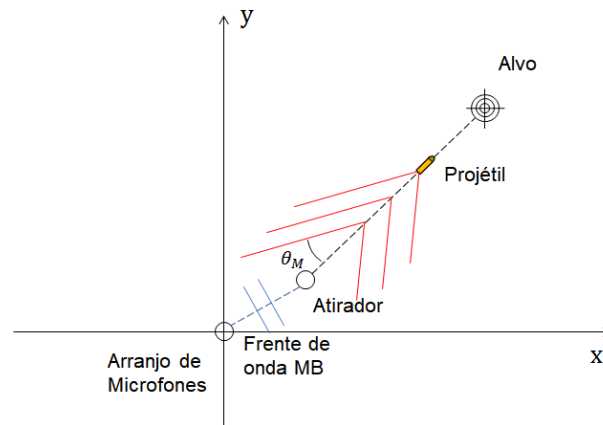


Figura 13 – Geometria com perda de SW.

Nessa situação, caso a detecção e a classificação sejam realizadas com êxito, é possível estimar a direção de chegada do disparo de arma de fogo do franco-atirador inimigo. Armamentos cujos disparos não possuem velocidade supersônica também recaem nesse caso.

3.3 Princípios Gerais da Detecção

Conforme foi apresentado na Figura 1, a ideia do Projeto Caçador está baseada principalmente em três operações: detecção, classificação e estimação da direção de chegada.

A detecção constitui uma área importante na estatística que lida com a identificação de eventos desejados em um conjunto de dados, isto é, a determinação da ocorrência de eventos a posteriori com o seu respectivo valor a priori. Eventos chamados A priori são aqueles cujas probabilidades são conhecidas ou estimadas antes da análise dos dados, já os eventos A posteriori são determinados após a análise dos dados utilizando técnicas estatísticas ou de limiar para inferir a sua ocorrência ou não. Existem diversas ferramentas estatísticas que auxiliam na escolha do limiar, as utilizadas nesse trabalho são: histogramas, matriz de confusão e a curva ROC [28].

3.3.1 Histogramas

Histogramas são representações gráficas utilizadas para exibir a distribuição de frequência de um conjunto de dados, de tal modo a apresentar a frequência de ocorrência de cada valor ou intervalo de valores. No eixo horizontal se encontra presente o intervalo dos dados, também chamados de classes, enquanto no eixo vertical, se encontra presente a contagem ou frequência de ocorrências em cada classe. Essa visualização fornece uma visão clara das tendências, padrões e dispersão dos dados, permitindo identificar valores centrais, desvios e possíveis pontos fora da curva [29].

Para o contexto da detecção, os histogramas são utilizados de modo comparativo, no qual dois ou mais histogramas de medidas diferentes (por exemplo, um histograma com verdadeiro a posteriori e outro com falso a posteriori) são colocados na mesma escala horizontal e, a partir da análise de probabilidade e de função erro, um limiar de emprego é escolhido [5].

3.3.2 Matriz de Confusão

A aplicação do limiar escolhido em uma base de treinamento na qual os valores a priori são conhecidos resulta em quatro possibilidades de eventos de acordo com o resultado a posteriori: verdadeiros positivos (TP), falsos positivos (FP), verdadeiros negativos (TN) e falsos negativos (FN). A Matriz de Confusão, esquematizada na Figura 14, é um recurso matemático utilizado para dispor os resultados dos coeficientes calculados e facilitar a visualização do resultado, de tal modo que o melhor resultado possível ocorre se todos os elementos se concentrarem na diagonal principal da matriz [28].

		Condição de Verdade	
		Condição Presente	Condição Ausente
Resultado do Teste	Positivo	TP	FP
	Negativo	FN	TN

Figura 14 – Matriz de Confusão 2×2 .

Alguns coeficientes são gerados a partir da matriz de confusão para auxiliar na análise do desempenho do método. No contexto desse trabalho, foram utilizados os coeficientes TPR (Taxa de Verdadeiros Positivos) e FPR (Taxa de Falsos Positivos), descritos respectivamente em (3.1) e (3.2).

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.1)$$

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \quad (3.2)$$

A TPR representa a proporção de casos positivos corretamente identificados pelo modelo em relação ao total de casos positivos reais, outrossim FPR representa a proporção de casos negativos erroneamente classificados como positivos em relação ao total de casos negativos reais. Um conjunto TPR e FPR constitui um ponto na curva ROC [28].

3.3.3 Curva ROC

A curva ROC é uma representação gráfica do desempenho de um modelo de detecção à medida que o limiar de classificação é variado. Desse modo, esse gráfico, exemplificado na Figura 16, mostra a relação entre TPR (no eixo das ordenadas) e FPR (no eixo das abscissas) em diferentes pontos de corte, permitindo a escolha do melhor equilíbrio entre sensibilidade e requisitos operacionais. Quanto mais o gráfico da ROC se aproximar do ponto $(FPR, TPR) = (0,1)$, melhor é o desempenho geral do método de detecção [28].

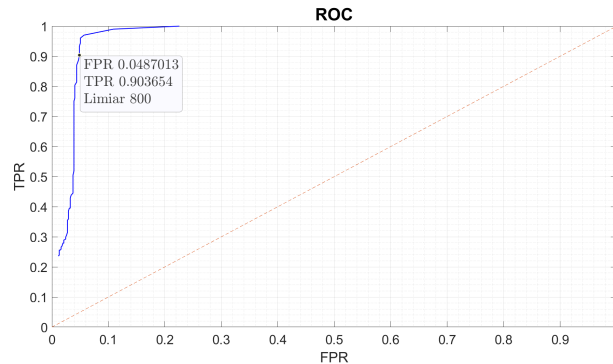


Figura 15 – Exemplo de ROC.

3.4 Considerações Gerais de Classificação

A Teoria da Classificação representa um campo na estatística e na análise de dados que se concentra na organização e categorização de dados em grupos distintos com base em características semelhantes. Ela desempenha um papel essencial em diversas disciplinas, desde a biologia até a ciência da computação, permitindo a criação de modelos e sistemas de organização de informações que facilitam a compreensão e o uso eficaz dos dados [30].

Técnicas modernas de classificação de sinais acústicos ocorrem por meio de algoritmos de aprendizado de máquina ou de redes neurais que analisam parâmetros extraídos do sinal, como a correlação cruzada, os coeficientes LPC, os coeficientes MFCC e a razão sinal ruído [4]. Nesta sessão, serão abordados os métodos de extração dos coeficientes LPC e MFCC, além de introduzir o algoritmo de classificação SVM Kernel.

3.4.1 Coeficientes LPC

Os coeficientes LPC constituem uma técnica empregada em processamento de sinais e análise de fala por meio da modelagem de um sinal com o intuito de minimizar o erro de predição linear entre as amostras e suas amostras passadas. Esse método é aplicado em sinais com características estacionárias ou localmente estacionárias (por exemplo, sinal de fala com intervalo de duração pequeno) onde é possível explorar as dependências lineares entre os valores passados e presentes para representar o sinal de modo compacto [31].

A determinação dos coeficientes LPC ocorre por meio da minimização do erro médio quadrático entre o sinal original e o sinal predito, cujos coeficientes foram calculados para tornar o sinal predito o mais próximo possível do sinal original [31]. Sendo x_n o sinal original e $\hat{x}_n = \sum_{k=1}^p a_k x_{n-k}$ o sinal predito, definimos o erro de predição como $e_n = x_n - \hat{x}_n$ e buscamos os coeficientes a_k que minimizem o erro médio quadrático (MSE, mean squared error) definido por $E[e_n^2]$.

Definindo a função de autocorrelação da sequência x_n como $r_x(l) = E[x_n x_{n-l}]$ e utilizando a sua estimativa descrita na Equação (3.3) na minimização do MSE, chegamos às equações de Yule Walker, cuja solução segue o algoritmo de Levinson-Durbin de recursividade. A Equação (3.4) representa a solução obtida por esse algoritmo [32].

$$r_x(l) = \sum_{n=1}^{\infty} x_n x_{n-l} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x(0) & r_x(1) & \dots & r_x(p-1) \\ r_x(1) & r_x(0) & \dots & r_x(p-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_x(p-1) & r_x(p-2) & \dots & r_x(0) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -r_x(1) \\ -r_x(2) \\ \dots \\ -r_x(p) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

O gráfico da Figura 16 mostra os coeficientes LPC de um sinal de MB. Nele o valor correspondente ao coeficiente LPC reduz com o aumento da ordem, se tornando praticamente zero em ordens superiores. Isso indica que os primeiros coeficientes LPC são detentores de maior informação para o sistema.

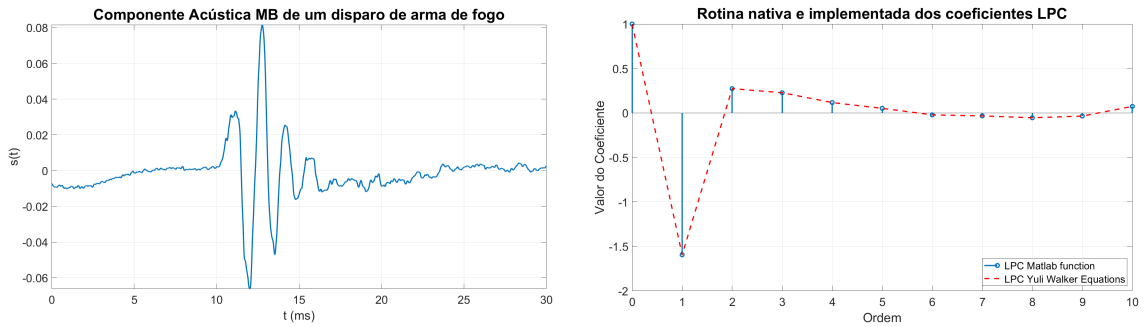


Figura 16 – Sinal MB e os seus coeficientes LPC pela função do Matlab® e por uma rotina própria implementada.

Dentre as diversas aplicações dos coeficientes LPC, se encontram a compressão de áudio, o cancelamento de eco, a codificação de voz e o reconhecimento de fala. Ao decompor um sinal de fala em seus coeficientes LPC, é possível obter uma representação mais compacta e informativa, facilitando a transmissão, armazenamento e análise. No contexto de reconhecimento de fala, os coeficientes LPC são usados para capturar as

propriedades acústicas do sinal, permitindo a identificação de padrões fonéticos e a distinção entre diferentes fonemas [31].

Com relação a esse trabalho, o SW e o MB possuem, assim como a fala, propriedades acústicas e padrões ondulatórios e energéticos que podem ser discriminados por meio dos coeficientes LPC.

3.4.2 Coeficientes MFCC

Os coeficientes MFCC são resultantes de uma representação logarítmica e cepstral do sinal, na qual a análise é realizada no domínio do espectro do sinal. Essa técnica foi originalmente inspirada pelo sistema auditivo humano, que é mais sensível a variações de frequência em escalas mais baixas e em frequências melódicas, em vez de uma escala linear de Hertz. Dentre as principais aplicações dessa técnica, se encontram o reconhecimento de fala, processamento de fala, identificação de fonemas, palavras e até mesmo estados emocionais [31].

O processo de extração dos coeficientes MFCC se inicia pelo janelamento do sinal original $x[n]$ com a função $w[n]$, usualmente uma janela de Hamming. A STFT discreta é obtida desse conjunto, resultando na Equação (3.5), onde $w_k = \frac{2\pi}{N}k$ com N sendo o comprimento da DFT [33].

$$X(n, w_k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m]w[n-m]e^{-jw_k m} \quad (3.5)$$

A magnitude de $X(n, w_k)$ é calibrada por uma série de filtros cujas respostas em frequência e larguras de banda casam com os filtros de banda auditiva crítica, que seguem a escala Mel (escala que simula o sistema auditivo humano), na qual as frequências centrais e os limites da banda são lineares para baixas frequências (abaixo de 1 kHz) e logarítmicas para frequências superiores a 1 kHz [33]. A Figura 17 retrata um banco de filtros na escala Mel.

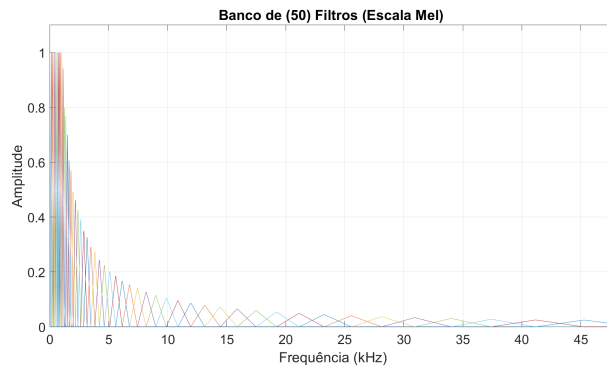


Figura 17 – Banco de filtros Mel.

A energia na STFT calibrada com a resposta em frequência de cada filtro da escala mel é computada conforme (3.6), onde $V_l(w_k)$ é a resposta em frequência do l^o filtro mel. L_l e U_l denotam, respectivamente, os índices de frequência inferior e superior sobre os quais cada filtro da escala mel é diferente de zero. A_l tem a função de normalizar os filtros consoantes as larguras de banda variáveis, de modo a fornecer energia igual para cada subdivisão. O coeficiente cepstral mel é calculado conforme a Equação (3.7) [33].

$$E_{mel}(n, l) = \frac{1}{A_l} \sum_{k=L_l}^{U_l} |V_l(w_k)Y(n, w_k)|^2, \quad \text{onde} \quad A_l = \sum_{k=L_l}^{U_l} |V_l(w_k)|^2 \quad (3.6)$$

$$C_{mel}(n, m) = \frac{1}{R} \sum_{l=0}^{R-1} \log(E_{mel}(n, l)) \cos\left(\frac{2\pi lm}{R}\right) \quad (3.7)$$

No contexto desse projeto, os coeficientes MFCC foram aplicados paralelamente aos coeficientes LPC em uma rede neural ou SVM para realizar a detecção e classificação dos sinais de tiro.

3.4.3 SVM Kernel

O SVM é um algoritmo de aprendizado de máquina utilizado para a classificação e regressão de dados por mecanismos lineares. Para lidar com dados que não são linearmente separáveis em seu espaço original, é necessário utilizar a extensão SVM Kernel, na qual se aplica funções de kernel para realizar transformações implícitas em espaço de maior complexidade ao invés de elevar a dimensionalidade do espaço [34].

Os kernels são funções que medem a similaridade entre dois pontos de dados no espaço original, constituindo exemplos comuns o kernel linear (utiliza o produto interno entre os vetores de entrada), o kernel polinomial (aplica uma transformação polinomial aos dados) e o kernel radial (mapeia os pontos em um espaço de dimensão infinita). O SVM utiliza uma função de decisão em sua otimização expressa em termos dos produtos internos dos vetores de suporte no espaço de alta dimensionalidade, onde esses vetores são os pontos de dados mais próximos da fronteira de decisão [34].

A escolha do kernel depende da natureza dos dados e de requisitos operacionais do algoritmo de classificação. Embora o SVM Kernel seja uma ferramenta poderosa para lidar com problemas de classificação complexos, o overfitting, o underfitting e a elevada complexidade computacional podem se tornar entraves para a sua aplicação. No contexto do projeto, foi optado pelo uso do kernel radial em busca de um desempenho elevado, tendo em vista que o tempo de execução dessa opção não se mostrou elevado nas simulações [4].

4 METODOLOGIA

A detecção e classificação de sinais impulsivos, como SW ou MB, envolve várias etapas iniciais, desde a obtenção dos sinais de áudio até o treinamento de algoritmos responsáveis por atingir automaticamente o objetivo deste trabalho. Neste capítulo, serão indicados os arranjos de microfones utilizados, a geometria das bases de disparos, a preparação da base de sinais e os métodos descritos em cada um dos artigos analisados, destacando as ideias dos autores e as adaptações implementadas. O software utilizado para o processamento e simulação dos dados foi o Matlab®.

4.1 Arranjos de Microfones

Os microfones usados para captar os sinais de disparo possuem duas configurações específicas: um arranjo com 4 microfones e outro com 7 microfones. A Figura 18 ilustra essas duas arquiteturas. Os microfones empregados foram da marca Behringer, modelo ECM8000 [35].

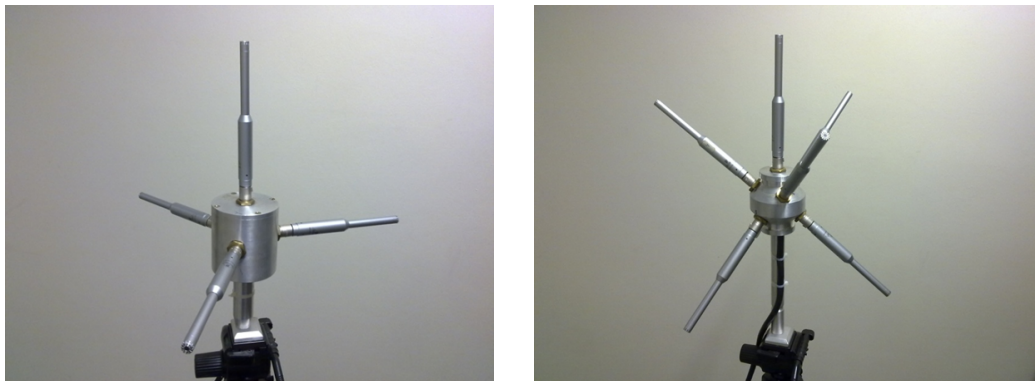


Figura 18 – Arranjos de microfones.

4.2 Bases de Sinais

Como mencionado anteriormente, os componentes fundamentais de um campo de tiro para gravação e detecção de sinais impulsivos de disparo são o atirador, o alvo e o arranjo de microfones. As bases de disparo foram organizadas de modo a garantir que os sinais gravados possuísem o mínimo possível de influência negativa do ambiente. A Tabela 3 mostra como foi feita a distribuição de SW e de MB para os sinais de treinamento e de teste. Cada uma das bases será apresentada separadamente nessa sessão, sendo que

foi utilizado somente um microfone de cada um dos arranjos que serão elucidados para a construção dos dados da Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição de SW e de MB

Base	Armamento	Sinal de Treinamento	Sinal de Teste
CAEx 2011	AGLC	300 m - 7 SW/ 7 MB	300 m - 3 SW/ 3 MB
		400 m - 7 SW/ 7 MB	400 m - 3 SW/ 3 MB
		500 m - 7 SW/ 7 MB	500 m - 3 SW/ 3 MB
		700 m - 7 SW/ 7 MB	700 m - 3 SW/ 3 MB
CAEx 2011	FAL	300 m - 6 SW/ 6 MB	300 m - 4 SW/ 4 MB
		400 m - 7 SW/ 7 MB	400 m - 3 SW/ 3 MB
		500 m - 7 SW/ 7 MB	500 m - 3 SW/ 3 MB
CAEx 2011	IA2	300 m - 7 SW/ 7 MB	300 m - 3 SW/ 3 MB
		400 m - 7 SW/ 7 MB	400 m - 3 SW/ 3 MB
		500 m - 7 SW/ 7 MB	500 m - 3 SW/ 3 MB
CAEx 2011	M2 Browning	300 m - 5 SW/ 5 MB	300 m - 3 SW/ 3 MB
		400 m - 5 SW/ 4 MB	400 m - 3 SW/ 3 MB
		500 m - 6 SW/ 5 MB	500 m - 3 SW/ 3 MB
CIOpEsp 2010	AGLC	S2 - 5 SW/5 MB	S2 - 3 SW/ 3 MB
CIOpEsp 2010	PSG1	S1 - 3 SW/ 3 MB	S1 - 2 SW/ 2 MB
CAEx 2014	AGLC	540 m - 14 SW/ 14 MB	540 m - 4 SW/ 4 MB
		860 m - 16 SW/ 16 MB	860 m - 4 SW/ 4 MB
		1062 m - 13 SW/ 13 MB	1062 m - 4 SW/4 MB
CIAMPA 2010	FAL	31 m - 5 SW/ 0 MB	31 m - 2 SW/ 2 MB
		56 m - 8 SW/ 0 MB	56 m - 3 SW/ 3 MB
		73 m - 10 SW/ 10 MB	73 m - 4 SW/ 4 MB

A Tabela 4 apresenta a quantidade de SW, MB e Não Tiro empregados no treinamento e no teste. A quantidade das classes no treinamento é semelhante, tendo o uso de algoritmos de aprendizado de máquina podem ficar enviesados caso uma das classes possua um número de amostras discrepante. No teste, a quantidade de janelas de Não Tiro supera bastante as outras classes, porque foram empregados áudios sem recorte de janelas específicas. Desse modo, a discrepância aumentar a verossimilhança da simulação, visto que no campo de batalha prepondera o silêncio antes dos disparos de caçadores.

Tabela 4 – Quantidade de janelas de cada tipo no treinamento e no teste

Tipo de Janela	Treinamento	Teste
SW	159	60
MB	144	60
Não Tiro	313	36476

4.2.1 CIOpEsp 2010

Nessa base, um arranjo de 7 microfones foi disposto no campo em seis posições distintas para captar os disparos realizados por atiradores em cinco posições diferentes, sendo que o alvo sempre se manteve fixo. Os sinais obtidos foram amostrados a uma frequência de 96 kHz. A Figura 19 retrata as disposições do arranjo e dos atiradores nessa base. Os armamentos empregados nessa base foram o AGLC e o PSG1. O ruído ambiente não interferiu na aferição dos resultados, sendo composto pelo vento e eventuais assobios de passarinho.

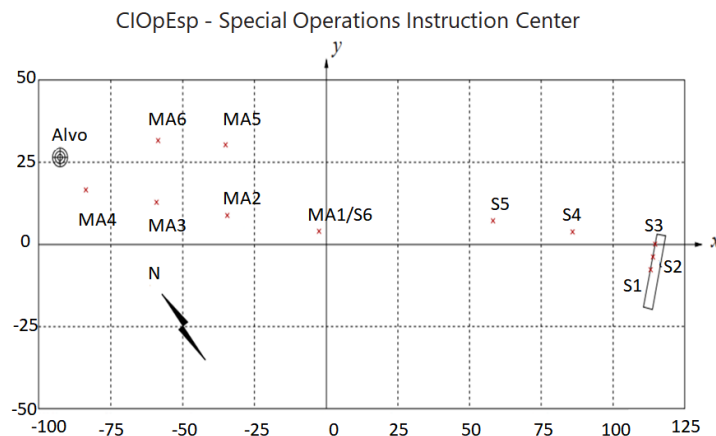


Figura 19 – CIOpEsp 2010. Escala em metros. MA é o arranjo de microfones e S1 é o atirador na posição 1.

4.2.2 CAEx 2011

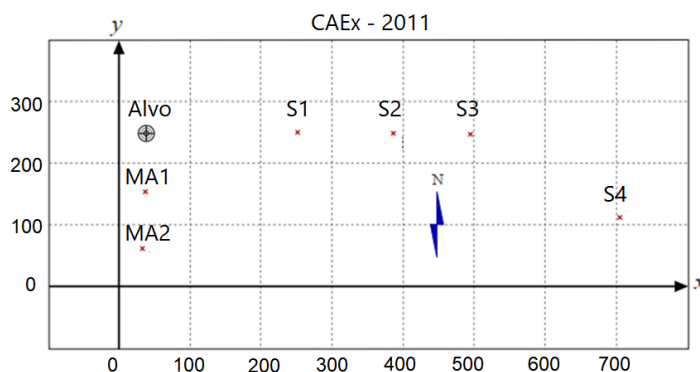


Figura 20 – CAEx 2011. Escala em metros.

Nessa base, foi usado um arranjo de sete microfones em duas posições para a gravação dos disparos, além de serem utilizadas 4 posições de disparo. Os armamentos utilizados nesse campo foram o AGLC, o FAL, o M2 Browning e o IA2. Os sinais obtidos foram amostrados a uma frequência de 96 kHz. A Figura 20 representa a disposição dos

elementos nesse campo. O ruído ambiente nessa base de tiros não interferiu na aferição dos MB, exceto em alguns breves momentos da gravação nos quais teve a captação de voz humana e de uma sirene de ambulância.

4.2.3 CAEx 2014

Nessa base, foi utilizada somente uma posição para o arranjo de sete microfones, enquanto tiveram três posições de atiradores dotados de AGLC. A Figura 21 representa essa configuração. Os sinais obtidos foram amostrados a uma frequência de 96 kHz.

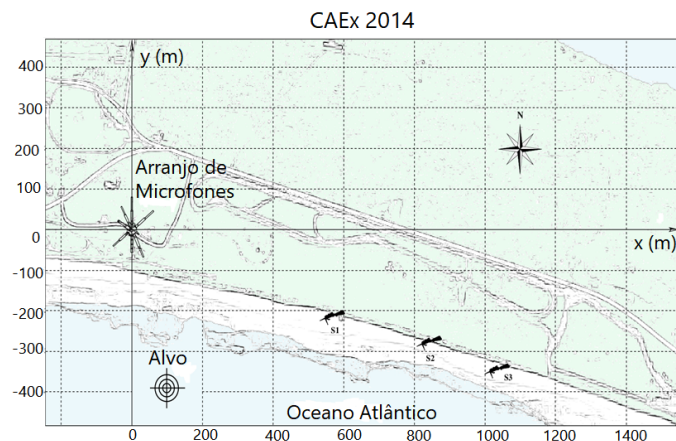


Figura 21 – CAEx 2014. Escala em metros.

O ruído nessa base (composto predominantemente pelo vento, pelo barulho proveniente do mar e por eventuais vozes humanas se comunicando) foi intenso e a RSR nesse caso estava inferior em relação às outras bases porque a distância entre o atirador e o arranjo de microfones era maior. Nessa condições, mesmo a aplicação do filtro de mediana não conseguiu reduzir a influência do ruído de modo efetivo, tornando a detecção do MB um desafio.

4.2.4 CIAMPA 2010

Nessa base, foi utilizado um arranjo linear de oito microfones distante de 31 m, 56 m ou 73 m em relação à trajetória do disparo. O armamento empregado foi o FAL. Os sinais dos disparos foram amostrados a uma frequência de 44,1 kHz. A configuração geométrica dessa base é apresentada na Figura 22. O ruído (predominantemente composto por ruído estático devido à gravação) não prejudicou a detecção do MB no sinal gravado. Porém, as distâncias relativamente pequenas em relação às outras bases levaram à incapacidade de identificação do MB para $D = 31m$ e para $D = 56m$, porque o sinal de MB ficou muito próximo à cauda do SW.

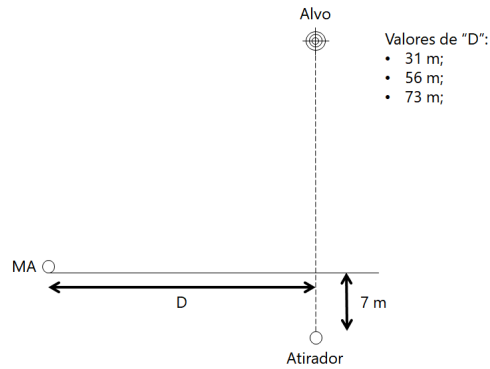


Figura 22 – CIAMPA.

4.2.5 Ruído Ambiente

A seleção da base de dados com ruído ambiente para o treinamento foi composta de 258 janelas sem sinais impulsivos. Para essa seleção, foram escolhidas 160 janelas da base CAEx 2011, 58 janelas da base CAEx 2014, 30 janelas da base CIOPEsp e 30 janelas da base CIAMPA. Para o teste, os sinais de áudio foram utilizados na íntegra, de modo a simular os grandes intervalos de tempo sem disparos, resultando em um elevado número de janelas sem SW ou MB.

4.2.6 Outros sinais impulsivos

Além dos sinais obtidos nos estandes de tiro citados anteriormente, foram utilizados sinais de voz (14 janelas), palmas (19 janelas) e balão estourando (22 janelas) gravados no Laboratório de Processamento Digital de Sinais do IME [5] para a composição da base de sinais, totalizando 55 janelas.. Os sinais citados nesta seção foram amostrados a uma frequência de 44,1 kHz.

4.3 Preparação da base de sinais

Antes de iniciar o treinamento dos métodos de detecção e classificação, foi necessária uma etapa de preparação dos sinais por meio de procedimentos específicos de padronização dos sinais. Foram realizados quatro processos que serão detalhados a seguir: reamostragem, janelamento, normalização e aplicação do filtro de mediana.

4.3.1 Reamostragem

Conforme mencionado nas bases de sinais, alguns deles possuem frequências de amostragem diferentes, de tal modo que a utilização dos sinais no mesmo processamento requer a alteração do número de amostras de uma das bases. Para este projeto, foi escolhida a frequência de amostragem de 96 kHz, tanto devido à capacidade do hardware empregado

quanto à necessidade de uma adequada caracterização do sinal que será enviado para o bloco de estimação da direção de chegada. O procedimento de reamostragem foi realizado por uma função *resample* do Matlab®.

4.3.2 Normalização e Janelamento

Tendo em vista que os sinais foram gravados em locais diferentes, vários fatores, como a potência do sinal recebido pelos microfones, a presença dos multipercursos gerando distorções no sinal, a presença de diferentes intensidades de sons ambientes e ruídos, a presença de outros sinais intensos (como ruídos estáticos, sirenes de ambulância, entre outros) e as diferentes necessidades de ganho do microfone em cada cenário, fizeram com que os sinais ficassem sem um padrão único em termos de amplitude da forma de onda. Para corrigir isso, realizou-se a normalização da variância: foram utilizadas funções do Matlab® para subtrair o sinal de sua média e dividir o resultado pela variância dele.

O processamento proposto neste trabalho é para utilização em tempo real, o que implica o desconhecimento do sinal que será recebido. Para simular esse tipo de processamento no Matlab®, o sinal amostrado foi recortado em janelas de 20 ms com sobreposição de 10 ms entre janelas adjacentes, de modo que cada janela represente a chegada de um novo sinal.

4.3.3 Filtro de Mediana

As janelas do sinal possuem tanto o sinal de tiro quanto ruído. O SW e o MB são eventos impulsivos, de tal modo que a forma de onda se modifica abruptamente imediatamente após o microfone ter recebido um desses sinais. No entanto, o ruído pode eventualmente ser intenso e reduzir o tamanho relativo do pico gerado pelo sinal impulsivo. Desse modo, reduzir a intensidade do ruído constitui um modo de aprimorar os resultados de detecção e classificação do sinal.

Um modo de realizar a filtragem do ruído é o filtro de mediana [27], cuja aplicação resulta em construir um novo sinal por meio de um determinado número de amostras anteriores e sucessoras à amostra analisada. Seja x_n o sinal original. O primeiro passo do algoritmo do filtro de mediana corresponde a selecionar Δ (ordem) amostras superiores e Δ amostras inferiores de termo de x_n e computar a mediana desses termos, conforme a Equação (4.1).

$$x_{mediana}(k) = mediana([x(k - \Delta)x(k - \Delta + 1)...x(k)...x(k + \Delta - 1)x(k + \Delta)]) \quad (4.1)$$

$$x_{final} = x_n - x_{mediana} \quad (4.2)$$

O segundo passo desse algoritmo constitui subtrair o sinal original do sinal obtido em (4.1). Como o ruído possui um comportamento não impulsivo, a subtração representada em (4.2) irá amenizar o ruído, tal que os picos devido aos sinais impulsivos serão ressaltados. Para este projeto, foi utilizado um filtro de mediana de ordem 150.

4.4 Métodos

O treinamento foi realizado para quatro algoritmos: o Método da Correlação Cruzada [5], o Método da Análise Espectral de Energia [6], o Método da Razão Sinal-Ruído [4] e um método usando Redes Neurais [7]. O fluxograma da Figura 23 representa o passo a passo geral seguido por esse documento, no qual o sinal é separado em um sinal de treinamento e um sinal de teste. No sinal de treinamento, é aplicado tanto um método de determinação do limiar de detecção para gerar um limiar quanto um método de obtenção de uma função de classificação que atuará como um critério para realizar o mapeamento em SW, MB ou Não Tiro de novos dados. O limiar e a função de classificação obtidos no treinamento foram posteriormente aplicados no sinal de teste para avaliar o desempenho do método.

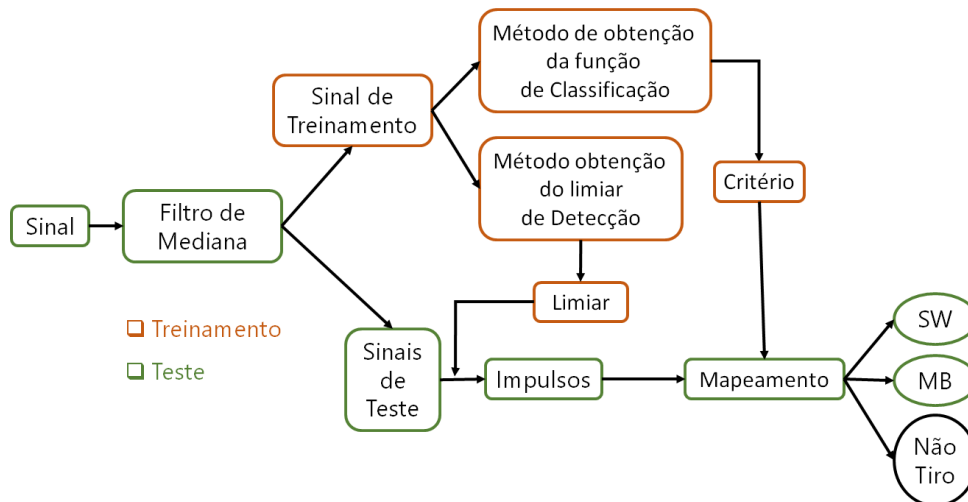


Figura 23 – Algoritmo base de Detecção e Classificação.

O vetor de características (*features*) que será utilizado na classificação dos métodos da Correlação Cruzada, Análise da Razão Sinal-Ruído e Redes Neurais possui a configuração da Tabela 5. Cada método utiliza um número diferente de parâmetros, que será descrito individualmente.

4.4.1 Método da Correlação Cruzada

A Correlação Cruzada é uma operação matemática utilizada na análise de sinais e processamento de dados que visa quantificar a relação entre duas séries temporais ou

Tabela 5 – Composição do vetor de entrada

Parâmetro	Índice
Correlação Cruzada com modelo AGLC - SW/MB	1/2
Correlação Cruzada com modelo FAL - SW/MB	3/4
Correlação Cruzada com modelo M2 Browning - SW/MB	5/6
Correlação Cruzada com modelo IA2 - SW/MB	7/8
Coeficientes LPC (20 ao todo)	9 - 28
Coeficientes MFCC (26 ao todo)	29 - 54
Energia do Sinal Normalizado (Z)	55

conjuntos de dados, identificando similaridades e padrões ocultos (correlações) entre eles. Matematicamente, a correlação cruzada é calculada pela convolução de uma série temporal (ou conjunto de dados) com a versão invertida no tempo de outra série temporal. A saída desse processo é um novo conjunto de dados chamado de função de correlação cruzada, que destaca as regiões (lags ou retardos) nas quais as duas entradas apresentam picos de correlação.

O método proposto por [5] consiste em fazer a correlação cruzada de janelas segmentadas de um sinal (contendo 20 ms de duração e sobreposição de 8 ms com as janelas adjacentes) com um modelo de tiro, de tal modo que a presença de um pico de sinal na função de correlação cruzada acima de um limiar de detecção indicaria que houve um tiro na janela analisada. A Figura 24 esboça o passo a passo proposto por [5] para a detecção do sinal.

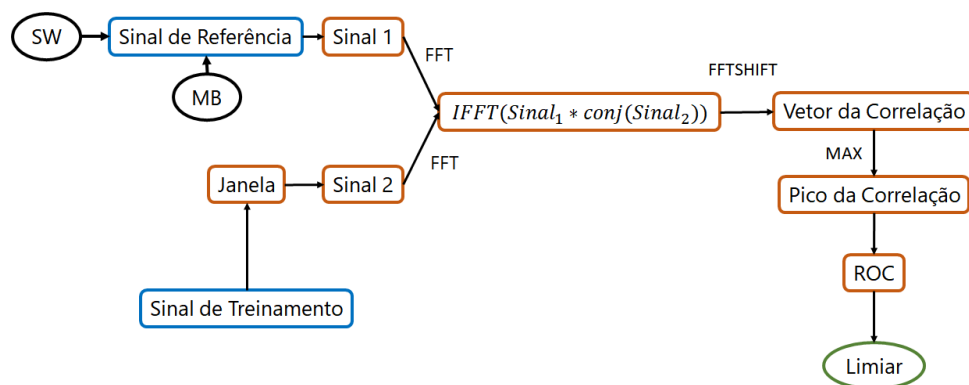


Figura 24 – Fluxograma para definição do limiar do Método da Correlação Cruzada.

Para o contexto desse projeto, o método descrito não menciona se o modelo utilizado foi um SW ou MB. Além disso, ele só é eficiente na detecção de sinais impulsivos, sem realizar de modo próprio a separação entre SW, MB e outros sinais impulsivos.

Para adequar o modelo às necessidades desse trabalho, foi utilizado o modelo de SW do AGLC proveniente da base CAEx 2011 para realizar a detecção de janelas com sinais impulsivos. Além disso, foi utilizado o algoritmo de SVM Kernel com 8 parâmetros

(correlação cruzada com SW e MB de cada armamento) de entrada para realizar a classificação do tipo de sinal.

A obtenção do limiar de detecção ocorreu por meio da construção do histograma do pico de correlação cruzada do modelo com cada uma das janelas do sinal de treinamento. A partir dos valores de referência do histograma, variou-se o candidato a limiar de detecção em uma faixa e a ROC foi construída, permitindo escolher o limiar de detecção a partir de um critério operacional. Para este documento, esse critério foi que a $TPR > 90\%$.

No treinamento da classificação, os parâmetros de entrada utilizados nesses dois algoritmos foram a correlação cruzada da janela com os modelos de SW e de MB dos seguintes armamentos: AGLC, M2 Browning, FAL e IA2. No Matlab[®], foi utilizado o *Classification Learner*, programa que executa o treinamento do SVM Kernel e gera uma função de classificação. Para fornecer os parâmetros base para o treinamento, foi montada uma matriz cujas oito primeiras colunas apresentam os parâmetros base descritos anteriormente e a 9ª coluna apresenta o tipo de janela, seguindo a classificação 1, 2 e 3 para, respectivamente, SW, MB e Não Tiro.

Utilizando o *Classification Learner*, foi gerada uma dispersão de pontos nas 8 dimensões dos parâmetros. Realizou-se o treinamento e validação dos dados pelo algoritmo de SVM Kernel, gerando matrizes de confusão que serão apresentadas no próximo capítulo. O programa gerou uma função de classificação cuja entrada são vetores 1×8 contendo os parâmetros de correlação cruzada e a saída é 1, 2 ou 3, seguindo o critério de classificação de cada janela.

4.4.2 Método da Análise Espectral da Energia

O algoritmo especificado nessa sessão foi proposto em [6], no qual o processo é dividido em duas etapas: detecção de sinal impulsivo por limiar da função de detecção de impulso e classificação como SW, MB ou sinal inválido (não tiro) por meio da análise da energia em bandas espectrais de frequência e da diferença temporal entre a janela atual e a janela anterior.

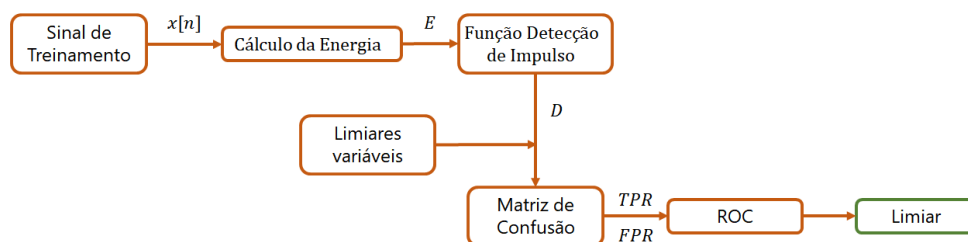


Figura 25 – Fluxograma de Detecção do Método da Análise Espectral de Energia.

A detecção de um sinal impulsivo nesse artigo, devido ao baixo custo computacional e fácil implementação, é realizada pelo método da detecção de transiente introduzido

por [36]. Assim, conforme representado na Figura 25, é obtida a energia associada ao sinal $x[n]$ por meio da extração da sua Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) e da soma da energia total da janela nas componentes frequenciais escolhidas no conjunto K , formando a Equação (4.3) [6].

$$E_{Janela} = \sum_{k \in K} \|STFT_x^w(n, k)\|^2 \quad (4.3)$$

A função detecção de impulso é calculada por meio da Equação (4.4). Ela equivale ao cálculo da derivada de E_{janela} em relação aos valores das nas janelas posterior e anterior, conforme a Equação (4.4). Os picos de D_{Janela} correspondem às maiores probabilidades de ocorrência de impulsos. A Equação (4.4) foi implementada, no Matlab®, por meio de um filtro não casual, necessitando de uma amostra de janela futura para a análise (na prática, isso implica em um atraso de 20 ms no processamento da janela atual). A separação entre sinais impulsivos e sinais não impulsivos foi realizada pelo estabelecimento de um limiar (por intermédio da análise do histograma e da ROC) tal que, se $D > Limiar$, o sinal em questão é considerado impulsivo [6].

$$D_{Janela} = \frac{E_{(Janela+1)} - E_{(Janela-1)}}{3} \quad (4.4)$$

A classificação realizada por [6] segue o fluxograma da Figura 26. O limiar de detecção obtido na etapa anterior é utilizado para separar os sinais que contém impulsos. Duas verificações são realizadas: se o tempo entre o pico de um impulso e o pico anterior é superior a um tempo máximo, e se a energia cujas componentes frequências são superiores à 1600 Hz (E_{High}) é superior à energia com componentes frequenciais inferiores à 1600 Hz (E_{Low}). Existem três resultados possíveis da classificação: SW, MB ou Não Tiro. Esse método parte do pressuposto que os MB sempre são antecidos de SW, de modo que a perda de SW leva à falha na classificação do MB associado [6].

A análise da tolerância temporal é baseada na geometria do meio e do tipo de armamento. Tratando-se do AGLC, a Figura 27 trata o caso limite no qual a diferença de tempo entre o SW e o MB é máxima.

A distância entre o arranjo de microfones e o atirador na situação da Figura 27 é d . O tempo para a chegada do SW será praticamente o tempo de deslocamento do projétil e o tempo de chegada do MB corresponde ao tempo de deslocamento da onda sonora no meio. Desse modo, (4.5) retrata a diferença temporal máxima entre o SW e o MB.

$$\Delta t = \frac{d}{v_{MB}} - \frac{d}{v_{SW}} = d \left(\frac{1}{v_{MB}} - \frac{1}{v_{SW}} \right) \quad (4.5)$$

O alcance efetivo do AGLC é de 800 metros, a velocidade do som a 25°C é de aproximadamente 377 m/s e a velocidade máxima do projétil desse armamento é de 820 m/s.

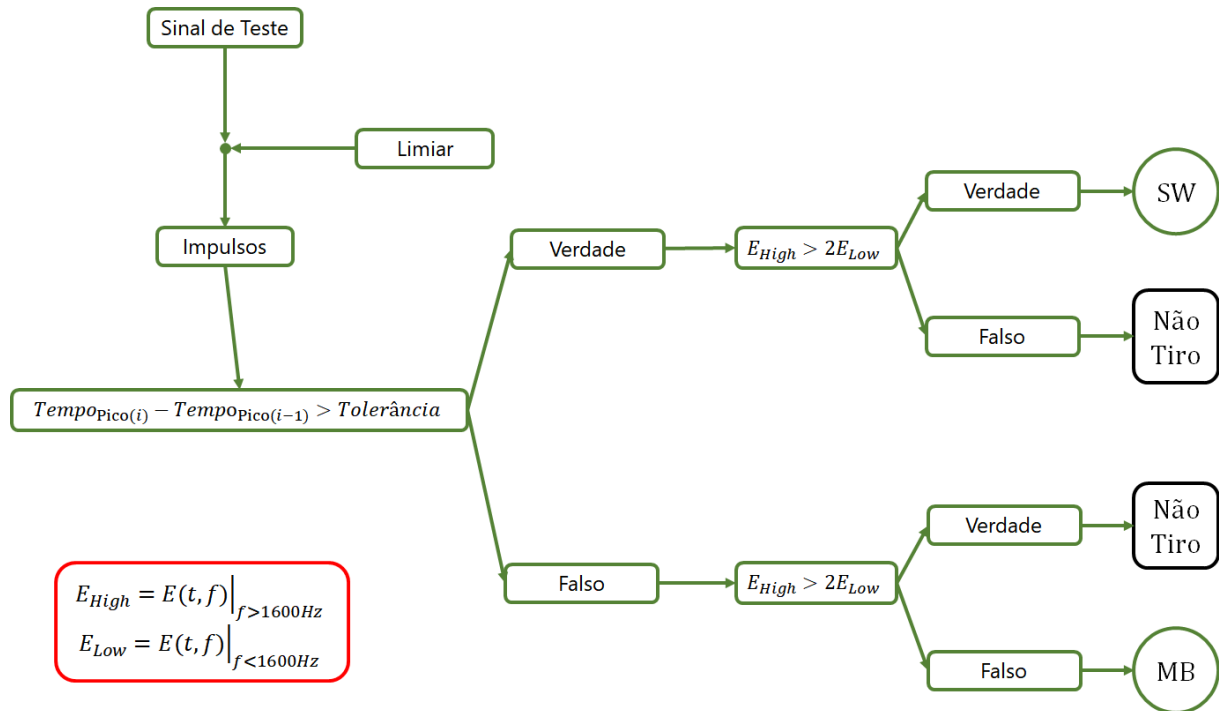


Figura 26 – Fluxograma de Classificação do Método da Análise Espectral de Energia.

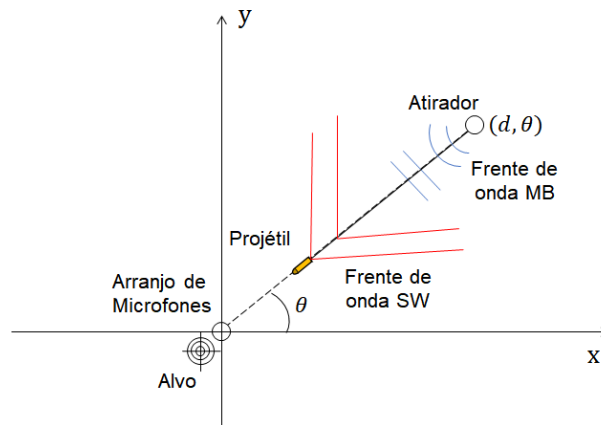


Figura 27 – Geometria com SW e MB praticamente coincidentes.

A aplicação desses valores em (4.5) forneceu uma diferença temporal de aproximadamente 1,40 s, sendo esse valor a máxima diferença temporal entre SW e MB permitida para o AGLC. Como esse parâmetro depende da distância d e o AGLC possui o maior alcance efetivo, então esse valor é menor para os outros armamentos brasileiros.

4.4.3 Método da Razão Sinal-Ruído

Nesse método, o processo também é dividido em duas etapas, contemplando uma etapa de detecção do sinal por meio da análise do parâmetro denominado energia do sinal

normalizada (Z) a ser delimitado posteriormente e uma etapa de classificação por meio de SVM Kernel, cujos parâmetros de entrada foram a correlação cruzada com modelos de SW e MB de cada um dos armamentos e os coeficientes LPC [4].

O fluxograma da Figura 28 representa o treinamento do limiar de detecção desse método, cujas entradas são o sinal de treinamento e os parâmetros W e T . O parâmetro W corresponde à largura de banda média do sinal quando ocorre SW ou MB, obtida por meio da análise da frequência de queda de 3 dB da potência do sinal. O parâmetro T é o número de amostras de cada janela, isto é, 1920 amostras (que correspondem a 20 ms para a frequência de amostragem utilizada). O produto de W com T resulta no parâmetro a .

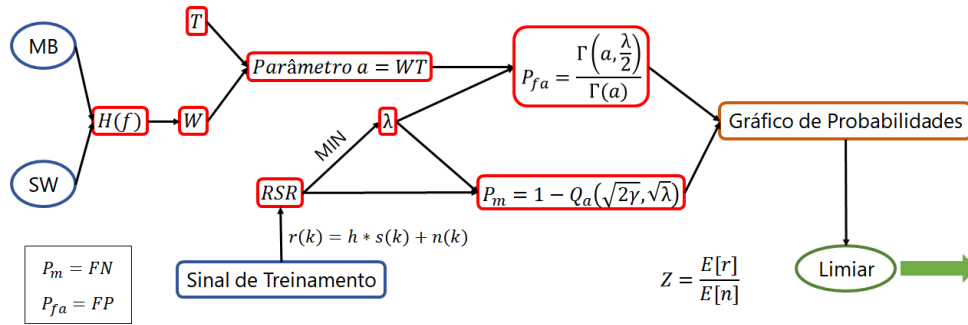


Figura 28 – Fluxograma do Método da Correlação Cruzada.

O sinal da janela analisada é descrito por (4.6), onde $h = 1$ caso exista um impulso no período analisado, $h = 0$ caso não exista um impulso e $n(t)$ representa o ruído ambiente modelado como um ruído gaussiano branco.

$$x(t) = hs(t) + n(t) \quad (4.6)$$

O parâmetro energia do sinal normalizada é definida em [4] por (4.7), onde o ruído é considerado praticamente estático entre janelas adjacentes devido ao baixo intervalo de tempo e que o sinal e o ruído são variáveis estatisticamente independentes entre si [37].

$$Z = \frac{E_{SinalRecebido}}{E_{Ruído}} = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_n^2} \quad (4.7)$$

Nas mesmas condições de cálculo do parâmetro Z , a razão sinal-ruído de cada uma das janelas de treinamento que possuem SW ou MB foi calculada, conforme a Equação (4.8). Desse modo, o menor valor de RSR de uma janela contendo SW ou MB foi obtido e empregado no fluxograma [4].

$$RSR = \frac{\sigma_x^2 - \sigma_n^2}{\sigma_n^2} \quad (4.8)$$

O parâmetro $a = WT$ foi utilizado para calcular a probabilidade de perda de impulso na detecção (P_m) por meio da Equação (4.9), na qual a função Q_a é a função

Marcum Q Generalizada, descrita na Equação (4.10), I_m é a função de Bessel modificada do primeiro tipo de ordem $m - 1$, Γ é a função gamma, γ é a função gamma incompleta inferior e λ é o decisor [4]. Para a simulação, foi utilizada a rotina própria do Matlab® para o desenvolvimento da função Q_a . A RSR mínima, junto ao parâmetro a foram empregados para o cálculo da probabilidade de falso alarme (P_{fa}) conforme Equação (4.11).

$$P_m = FN = 1 - Q_a(\sqrt{2 \times RSR}, \sqrt{\lambda}) \quad (4.9)$$

$$Q_a(b, c) = \frac{1}{(b)^{a-1}} \int_c^\infty x^a \exp\left(-\frac{x^2 + b^2}{2}\right) I_m(bx) dx \quad (4.10)$$

$$P_{fa} = FP = 1 - \frac{\gamma(a, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(a)} \quad (4.11)$$

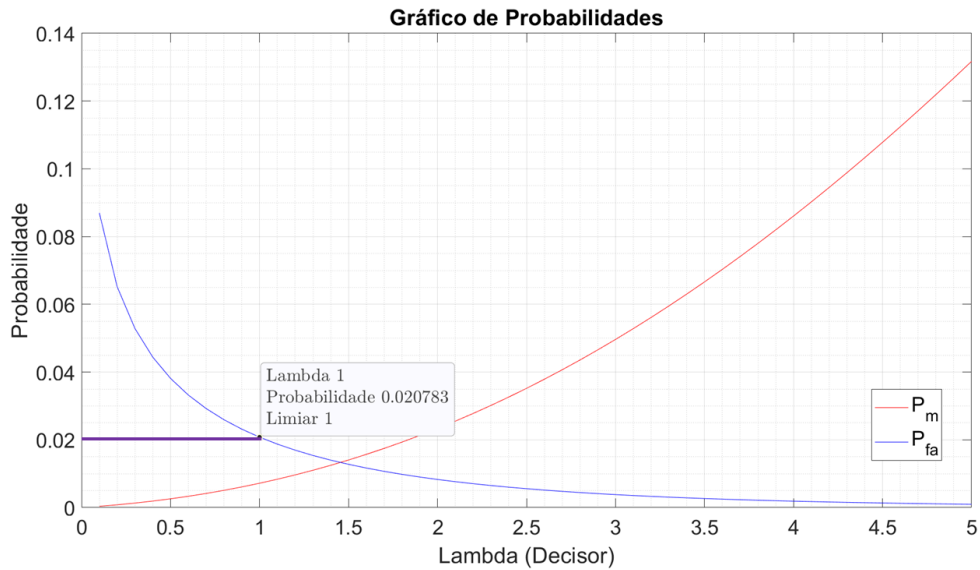


Figura 29 – Exemplo de gráfico auxiliar para a determinação do ponto de operação.

O gráfico de P_m no eixo das ordenadas e P_{fa} no eixo das abscissas foi construído, tal que se notou as tendências inversas de crescimento das duas funções. O limiar de detecção (λ) foi obtido por meio da escolha de um ponto de operação cujos valores das duas probabilidades são adequadas para os requisitos operacionais do sistema. Nas simulações desse documento, o requisito aderido corresponde à $P_{fa} < 2\%$. A Figura 29 mostra um exemplo de gráfico $P_{fa} \times P_m$ gerado com $a = 0.0365$, $W = 3500$ e $RSR_{MIN} = 5$.

O fluxograma da Figura 30 ilustra o passo a passo da obtenção do critério de classificação proposto por [4]. Foram obtidos os coeficientes LPC e os picos de correlação cruzada com cada um dos modelos (SW e MB) de cada armamento para cada uma das janelas do sinal de treinamento. O aplicativo *Classification Learner* foi empregado para treinar o SVM Kernel e gerar a função que teve o papel de realizar a classificação. A

entrada dessa função é um vetor de 28 parâmetros, enquanto a sua saída é o vetor 1, 2 ou 3 segundo o tipo de janela.

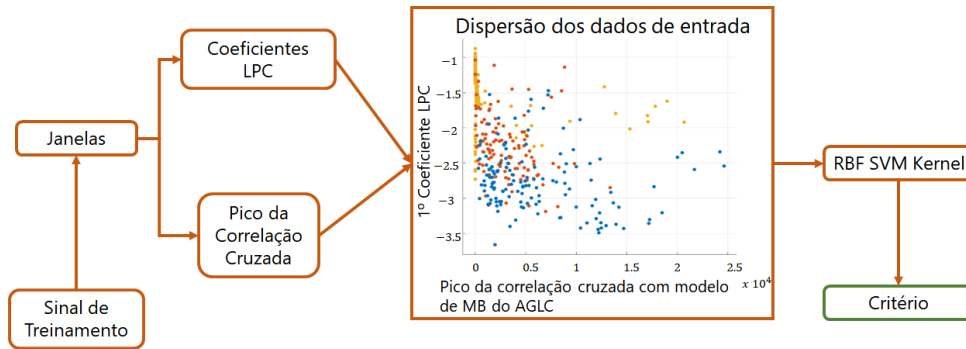


Figura 30 – Treinamento da classificação do Método da Análise da RSR.

Com relação à aplicação desse algoritmo, a etapa de detecção prescreve a obtenção do parâmetro energia do sinal normalizada de cada janela do sinal de teste por meio da Equação (4.7). Se $Z > \lambda$, considera-se que essa janela passou pelo crivo da etapa de detecção, isto é, existe algum impulso em seu conteúdo.

As janelas em que o algoritmo detecta a presença de um sinal impulsivo passam para a etapa de classificação, na qual os parâmetros de correlação cruzada e os coeficientes LPC são empregados como entrada na função de classificação. O resultado dessa função delimitou o tipo de janela.

4.4.4 Método Usando Redes Neurais

Esse método, descrito em [7], não apresentava uma separação clara entre os blocos de detecção e separação, de modo que se avaliou a necessidade de propor um sistema de detecção para aprimorar os resultados desse método. Desse modo, esse método passou a constituir uma variante do método proposto em [4] na qual são utilizadas redes neurais para fazer a classificação. O treinamento da detecção é idêntico ao método descrito na sessão anterior. A obtenção do critério de classificação envolve a utilização do aplicativo *nprtool* (Neural Net Pattern Recognition, toolbox do Matlab®) para construir uma rede neural *feedforward* com duas camadas (a Camada Escondida dotada da função de transferência simétrica sigmoid e a Camada de Saída dotada da função de transferência competitiva leve).

Para obter o critério de classificação, as correlações cruzadas do SW e do MB de cada armamento, os coeficientes LPC, os coeficientes MFCC e o parâmetro Z de cada janela do sinal de treinamento são obtidos e concatenados para obter a matriz $Entrada_{Janelas \times 55}$, onde cada linha representa uma janela do treinamento de modo que o número total de linhas representa a quantidade de janelas empregadas no treinamento (neste documento, foram utilizadas 616 janelas). A classificação de cada uma das janelas de treinamento é

colocada na matriz $Saída_{Janelas \times 3}$, na qual a representação do SW é feita pelo vetor $[1 \ 0 \ 0]$, do MB é $[0 \ 1 \ 0]$ e de uma janela sem tiro é $[0 \ 0 \ 1]$.

O comando *nprtool* inicializa o aplicativo do Matlab[®] que foi utilizado para construir a rede neural. Nesse programa, as matrizes $Entrada_{Janelas \times 55}$ e $Saída_{Janelas \times 3}$ foram utilizadas como parâmetros, tal que o aplicativo gerou a rede neural esquematizada na Figura 31.

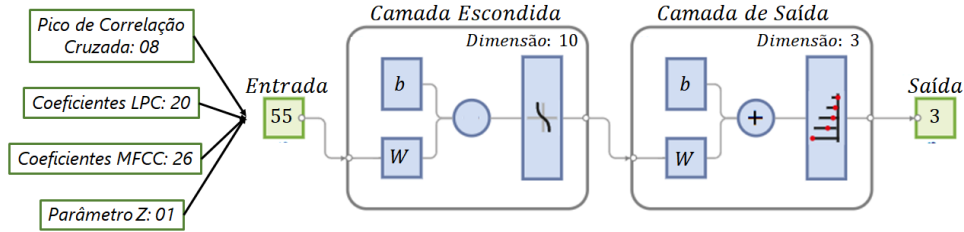


Figura 31 – Estrutura da Rede Neural.

Para o treinamento, foi utilizado o padrão de 15% das amostras para a validação e outros 15% para o teste. Nesse ínterim, o aplicativo gerou as matrizes de confusão que serão apresentadas no próximo capítulo. Para aprimorar o resultado, o treinamento foi repetido diversas vezes, tendo em vista que o Matlab[®] sorteia de modo diferente os dados que compõem o conjunto de treinamento, cujos resultados são diferentes. Desse modo, o resultado com o menor MSE foi escolhido.

O critério de classificação perpassa a utilização da função *myNeuralNetwork* gerada pelo *Classification Learner* que recebe um vetor de entrada contendo 55 parâmetros e retorna um vetor de 3 colunas com o resultado mais provável para cada coluna da saída. O valor mais próximo a 1 corresponde ao tipo de janela mais provável, sendo que a escolha pela coluna 1 implica em ocorrência de SW, pela coluna 2 indica a ocorrência de MB e pela coluna 3 implica em não tiro. O Apêndice A apresenta o algoritmo de funcionamento da função *myNeuralNetwork*.

5 RESULTADOS

Os resultados do treinamento e da aplicação teste em sinais de cada um dos métodos serão apresentados neste capítulo, seguidos da análise do melhor método segundo os critérios de desempenho proveniente das matrizes de confusão.

5.1 Treinamento

Os sinais de treinamento foram usados em cada um dos procedimentos de treinamento citados no capítulo anterior para compor o limiar de detecção e o critério de classificação.

5.1.1 Método da Correlação Cruzada

O treinamento da detecção desse método envolveu a obtenção do histograma dos picos de correlação cruzada de cada uma das janelas do sinal de treinamento com o modelo de SW de AGLC da base CAEx 2011, representado na Figura 32. Notou-se pela análise do histograma que a intercessão dos picos de tiros e não tiros ocorria por volta do valor de pico 2500. Portanto, foi construída a ROC da Figura 33 variando o limiar de 100 à 10000.

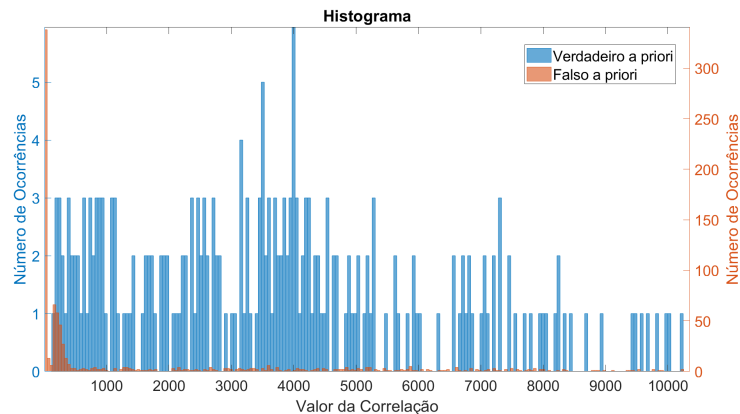


Figura 32 – Histograma - Correlação Cruzada.

Desse modo, seguindo o critério $TPR > 0.9$, o limiar de detecção escolhido foi $Limiar = 1000$.

O treinamento da classificação resultou na dispersão dos dados de entrada em oito dimensões. Por exemplo, a Figura 34 representa a visualização de duas dessas dimensões. Nota-se que existe intercessão entre SW, MB e não tiro, sendo difícil a separação por um critério linear.

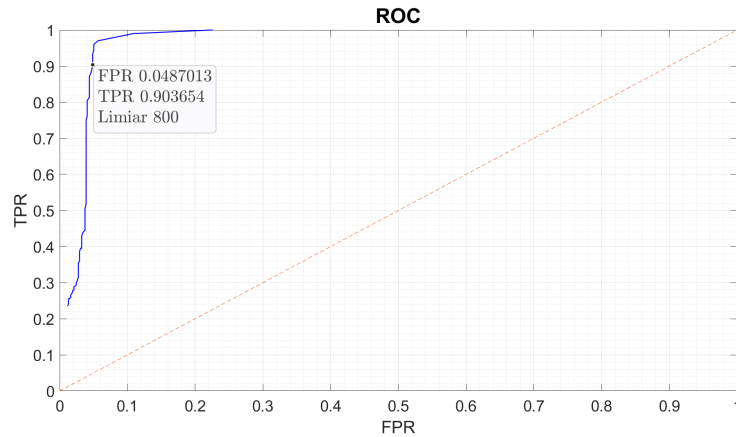


Figura 33 – ROC da detecção - Correlação Cruzada.

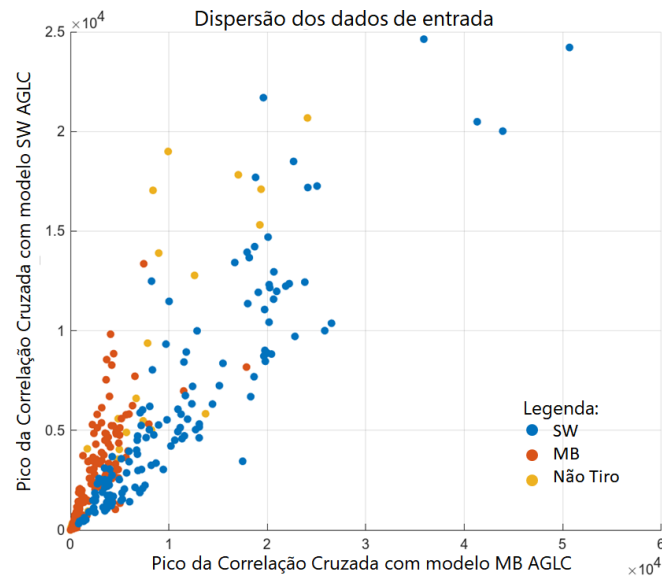


Figura 34 – Dispersão dos dados de entrada.

A aplicação do *Classification Learner* resultou nas matrizes de confusão das Figuras 35 e 36, geradas pela aplicação do algoritmo SVM Kernel do Matlab®, que apresentou o melhor resultado em termos percentuais de acerto.

A Figura 37 apresenta a ROC utilizada pelo algoritmo de SVM para fazer a decisão do ponto de operação.

Desse modo, utilizou-se o *Classification Learner* para gerar a função que atuou como critério de classificação.

5.1.2 Método da Análise Espectral de Energia

A Figura 38 apresenta o histograma da função de detecção de impulso de cada janela do sinal de treinamento.

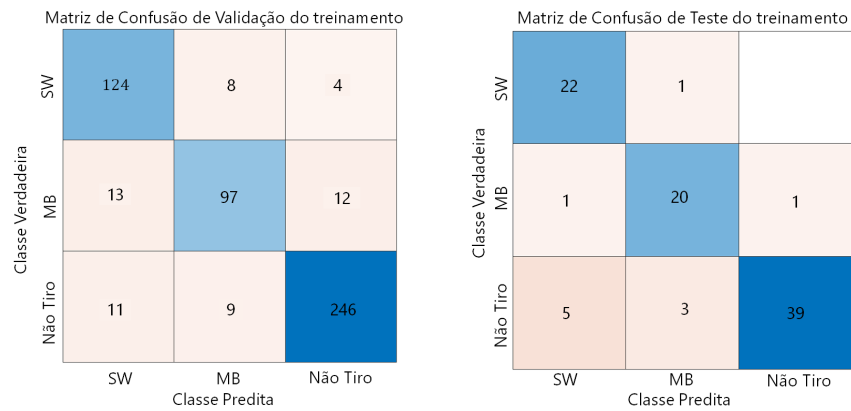


Figura 35 – Matrizes de Confusão de Validação e de Teste.

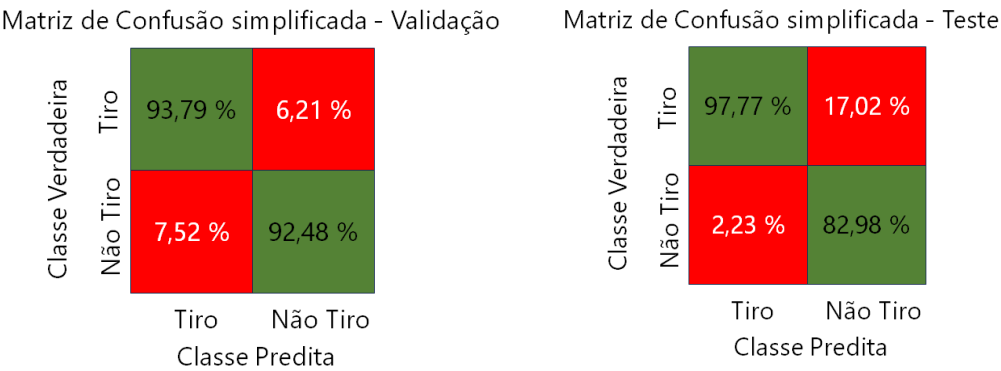


Figura 36 – Matrizes de Confusão de Validação e de Teste simplificadas.

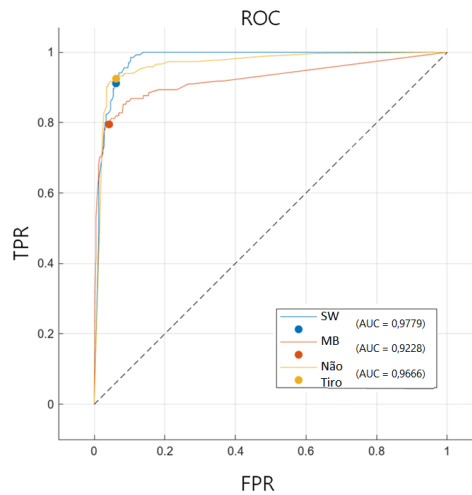


Figura 37 – ROC - Correlação Cruzada.

A intercessão entre os máximos da função de detecção de impulso de janelas de tiro e não tiro foi de aproximadamente 1500. Desse modo, foi utilizada a faixa de 1000 à 20000 para a construção da ROC, mostrada na Figura 39.

A análise da ROC segundo o critério operacional $TPR > 0.9$ resultou na escolha

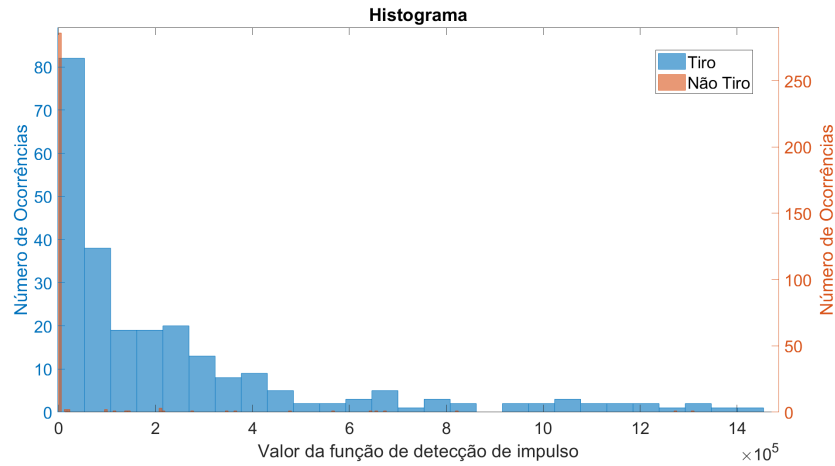


Figura 38 – Análise Espectral da Energia - Histograma.

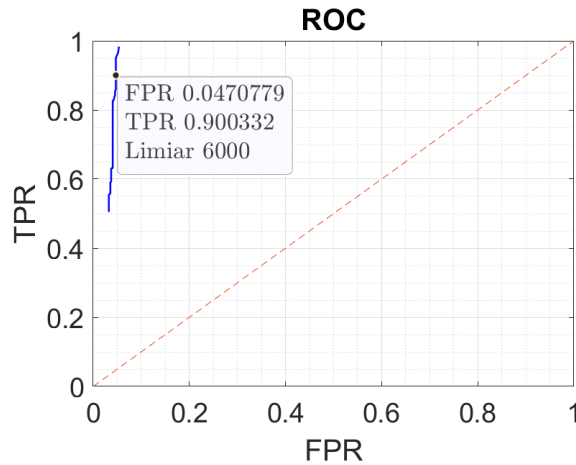


Figura 39 – Análise Espectral da Energia - ROC.

do limiar de detecção de 6000.

5.1.3 Método da Razão Sinal Ruído

A Figura 40 apresenta o gráfico de P_m com relação à P_{fa} para a escolha do limiar de detecção desse método.

Seguindo o critério $P_m < 2\%$ foi selecionado o limiar $\lambda = 1$.

No treinamento da classificação, foram empregadas os 28 parâmetros (8 picos de correlação cruzada e 20 coeficientes LPC) como dados de entrada no *Classification Learner*. A Figura 41 apresenta um gráfico de dispersão do 1º coeficiente LPC com relação à correlação cruzada com o SW do modelo de AGLC.

As matrizes de confusão geradas pelo treinamento desse método estão presentes nas Figuras 42 e 43. O algoritmo de SVM Kernel apresentou o melhor resultado.

O desempenho foi adequado, porém foi necessário verificar se todos os coeficientes

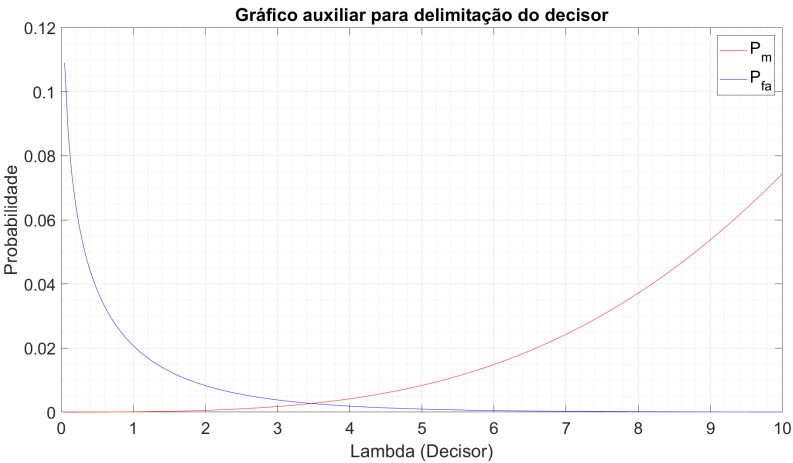


Figura 40 – Análise RSR - Gráfico de Probabilidades.

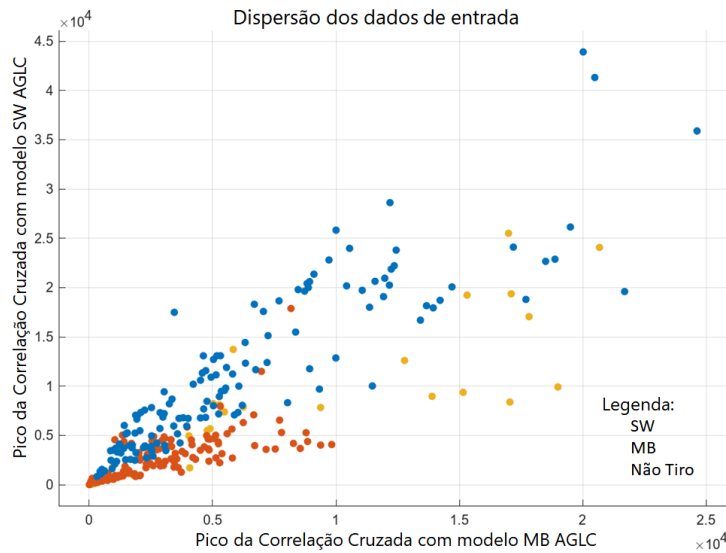


Figura 41 – Análise RSR - Dispersão dos dados de entrada.

Matriz de Confusão de Validação

SW	117	18	
MB	11	106	5
Não Tiro	4	10	253
	SW	MB	Não Tiro

Classe Verdadeira

Classe Predita

Matriz de Confusão de Teste

SW	20	3	1
MB	7	14	1
Não Tiro	2	4	40
	SW	MB	Não Tiro

Classe Verdadeira

Classe Predita

Figura 42 – Análise RSR - Matrizes de Confusão.

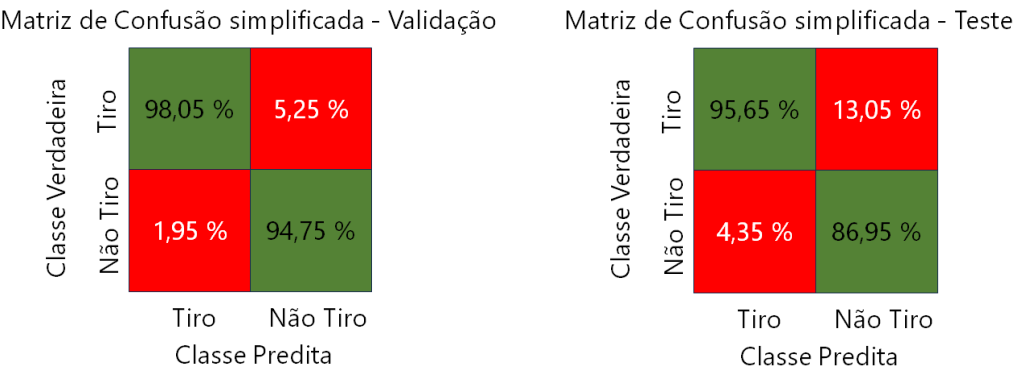


Figura 43 – Análise RSR - Matrizes de Confusão simplificadas.

LPC estavam fornecendo informação relevante para auxiliar na classificação. A Figura 44 apresenta o gráfico de grau de importância do parâmetro (medida obtida pelo teste Qui-Quadrado, no qual se averiga a dependência dos parâmetros em relação à resposta esperada. Quanto maior o resultado do teste, maior o grau de importância do parâmetro [38]). Como os coeficientes LPC de maior ordem fornecem menor grau de informação, foi optado por reduzir a ordem LPC para 10, que possui as maiores concentrações de informação segundo o gráfico da Figura 44.

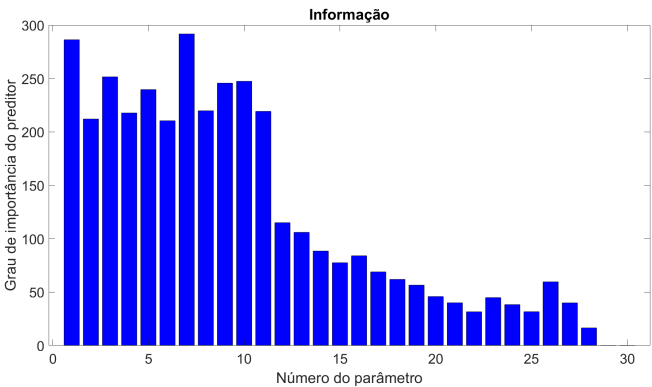


Figura 44 – Análise RSR - Importância dos parâmetros.

As Figuras 45 e 46 apresentam as matrizes de confusão ao utilizar somente 18 parâmetros de entrada. Nota-se que a diferença entre as matrizes não é expressiva, atendendo bem à barganha.

A Figura 47 apresenta a ROC para o método da Razão Sinal Ruído com 18 parâmetros.

Com esse procedimento, foi obtida uma função que serviu como critério para a classificação desse método.

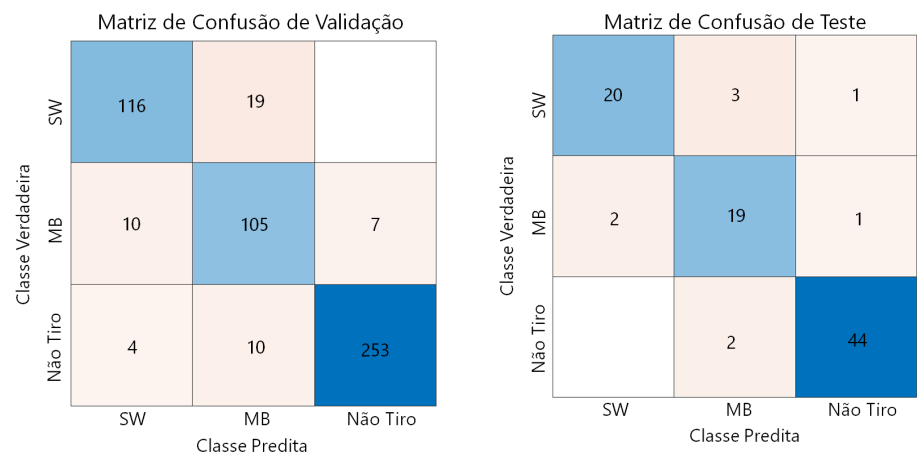


Figura 45 – Análise RSR - Matrizes de Confusão - 18 parâmetros.

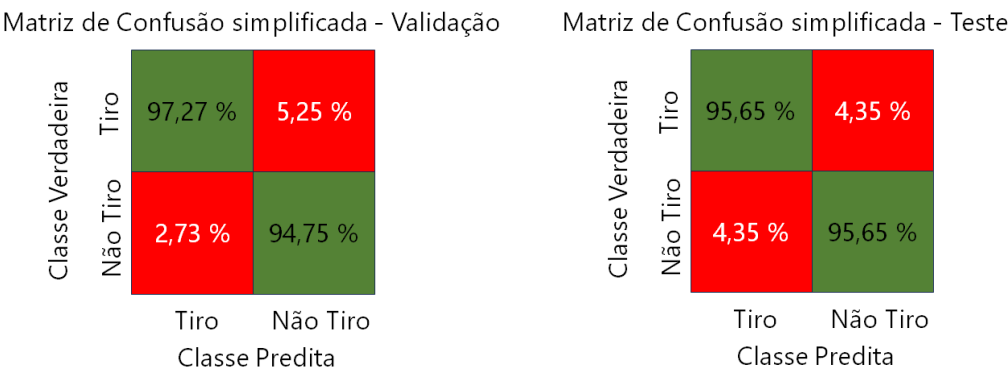


Figura 46 – Análise RSR - Matrizes de Confusão simplificadas - 18 parâmetros.

5.1.4 Método usando Redes Neurais

Como esse método apresenta o mesmo mecanismo de detecção em relação ao método da RSR, então não foi necessário repetir o treinamento. A classificação foi realizada colocando 55 parâmetros de entrada (8 correlações cruzadas, 20 coeficientes LPC, 26 coeficientes MFCC e a função Z) no aplicativo *Neural Net Pattern Recognition*. As Figuras 48 e 49 apresentam as matrizes de confusão resultantes.

O tempo de processamento para janelas sem sinais impulsivos foi de aproximadamente 0,5 ms, enquanto o tempo para janelas com sinais impulsivos foi de aproximadamente 5 ms. Desse modo, foi possível aplicar esse conjunto de parâmetros sem prejudicar o desempenho do sistema.

5.2 Comparação entre Métodos

Os limiares de detecção e critérios de classificação obtidos foram aplicados no sinal de teste. Os resultados foram analisados segundo a complexidade computacional (visto pelo tempo de processamento médio) e o desempenho das matrizes de confusão.

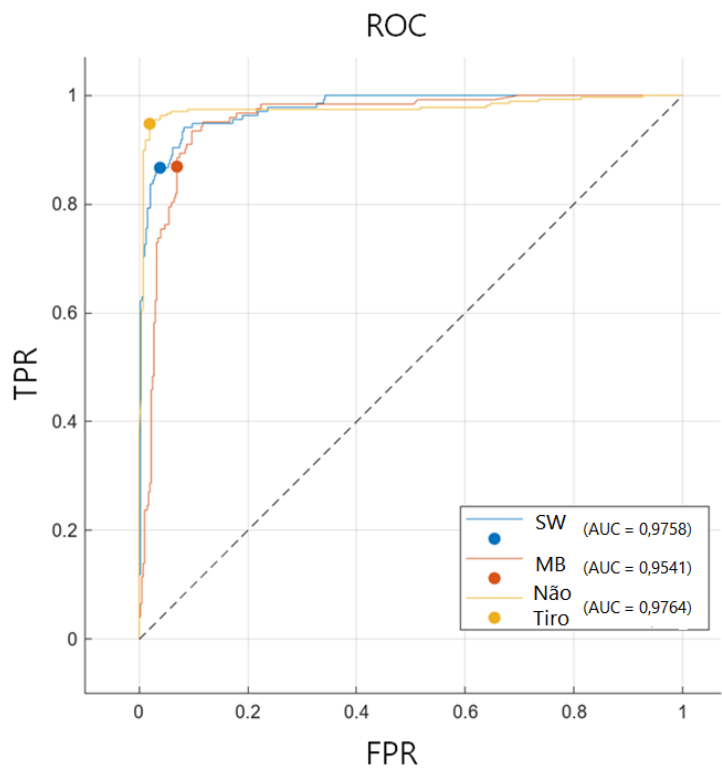


Figura 47 – ROC - Análise RSR.

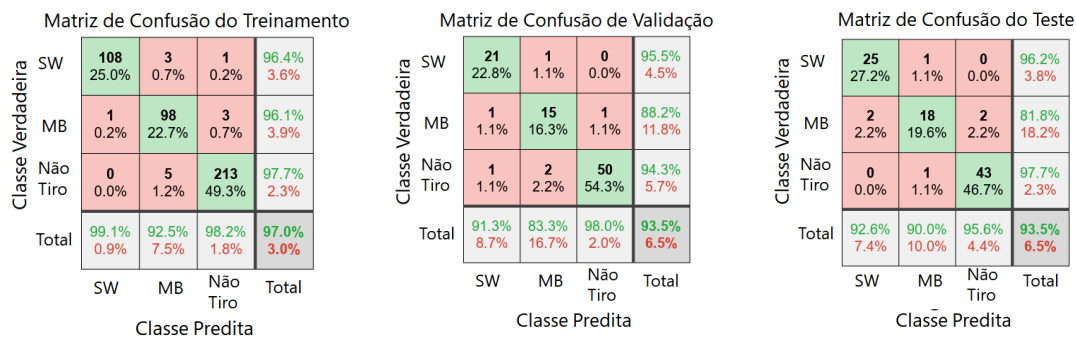


Figura 48 – Redes Neurais - Matrizes de Treinamento.

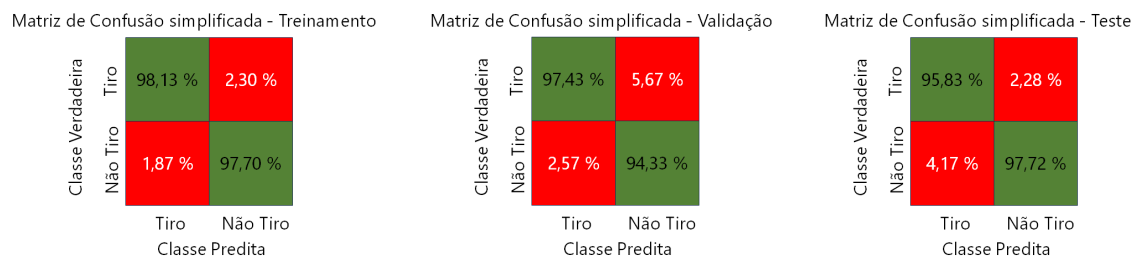


Figura 49 – Redes Neurais - Matrizes de Treinamento Simplificadas.

5.2.1 Tempo de processamento

A Tabela 6 possui informações do tempo de processamento aproximado de cada um dos métodos para janelas sem sinais impulsivos e com sinais impulsivos. O equipamento empregado para fazer as simulações foi um computador com processador Intel® Core™ i5-8250U CPU @1.60GHz 1.80 GHz e uma RAM instalada de 8 GB, sem SSD.

Tabela 6 – Tempo de Processamento

Método	Sem Sinal Impulsivo	Com Sinal Impulsivo
Correlação Cruzada	2,26 ms	6,49 ms
Análise Espectral da Energia	3,65 ms	3,82 ms
Análise da Razão Sinal Ruído	1,13 ms	11,72 ms
Redes Neurais	1,02 ms	4,80 ms

Comparando-se o tempo de processamento entre os métodos, nota-se que em termos somente de detecção (que pode ser visto pelo tempo de processamento sem sinal impulsivo), os métodos da Análise da Razão Sinal-Ruído e Redes Neurais são os mais rápidos, tendo em vista que basta calcular o parâmetro Z e verificar se ele é superior a um limiar (evitando assim ter que computar ou uma correlação cruzada, ou uma STFT). Já em termos de detecção e classificação juntas, o método da Análise Espectral da Energia é o mais rápido (porque ele não requer a obtenção de novos parâmetros depois da detecção), seguido pelo método usando Redes Neurais. Os métodos que aplicam SVM Kernel para a classificação possuíram os maiores tempos de processamento, fruto da complexidade computacional proveniente do emprego de um algoritmo não-linear.

5.2.2 Quadros Comparativo

A Tabela 7 mostra os resultados de SW, MB e não tiro obtidos em relação ao total dos blocos de detecção e classificação juntos. Nessa tabela, não constam os erros de detecção e de classificação.

Tabela 7 – Resultados Brutos

Janela	Quantidade	Correlação Cruzada	Análise Espectral da Energia	Análise RSR	Redes Neurais
SW	60	60	56	53	55
MB	60	17	31	48	54
Não Tiro	36476	36471	36461	36471	36457

Em termos brutos, o método usando redes neurais apresentou o melhor resultado, visto que conseguiu classificar com precisão um maior número de MB. Porém, é necessário analisar também os erros de classificação para se obter uma consciência apurada do resultado. A Tabela 8 apresenta os erros verificados no resultado. Nela, o primeiro termo da coluna Janela representa o valor a priori da janela, enquanto o segundo termo representa

o valor obtido pelo processo de detecção e de classificação. Assim, SW -> MB indica que a janela possui um sinal impulsivo de SW nela, porém foi detectado um sinal impulsivo de MB.

Tabela 8 – Erros Brutos

Janela	Correlação Cruzada	Análise Espectral da Energia	Análise RSR	Redes Neurais
SW -> MB	-	1	7	5
SW -> Não Tiro	-	2	-	-
MB -> SW	-	3	2	1
MB -> Não Tiro	43	26	10	5
Não Tiro -> SW	-	1	1	4
Não Tiro -> MB	5	34	4	15

Os dois métodos (Análise da Razão Sinal Ruído e Redes Neurais) que apresentaram um resultado mais pertinente na Tabela 7 apresentaram alguns erros de classificação na Tabela 8.

5.2.3 Desempenho

A análise dos resultados verificados nas Tabelas 7 e 8 foi feita por três coeficientes. O primeiro coeficiente (métrica proposta neste trabalho) foi pautado na estratégia de colocar pesos na TPR dos resultados de cada método, de modo a aumentar o peso da classificação correta do MB. O peso da perda de SW foi 3 e o peso da perda de MB foi feito igual a 5. O valor do coeficiente foi computado pela média ponderada da TPR_{SW} e da TPR_{MB} . A Tabela 9 apresenta o valor obtido para esse coeficiente de desempenho.

Tabela 9 – Desempenho Geral (Métrica Proposta)

Janela	Correlação Cruzada	Análise Espectral da Energia	Análise RSR	Redes Neurais
TPR_{SW}	1	1	0,933	0,916
TPR_{MB}	0,283	0,516	0,8	0,9
Coeficiente	0,552	0,697	0,849	0,906

Os resultados da Tabela 9 sugeriram que o método usando Redes Neurais apresenta o melhor resultado. Porém, uma deficiência desse coeficiente foi não considerar os erros de falso alarme que prejudicam a confiança no algoritmo. Para averigar isso, foi utilizado o parâmetro taxa de erro, dado pela Equação (10), onde N é o número total de janelas empregadas [28]. A Tabela 10 apresenta os resultados parciais considerando o erro percentual como critério.

$$TaxadeErro = \frac{FN + FP}{N} \quad (5.1)$$

Tabela 10 – Taxa de Erro

Janela	Correlação Cruzada	Análise Espectral da Energia	Análise RSR	Redes Neurais
FN	43	25	17	11
FP	5	35	5	19
Taxa de Erro	0,13 %	0,16 %	0,06 %	0,08 %

Notou-se que método da Análise da Razão Sinal Ruído apresentou um resultado mais adequado na Tabela 10. A diferença é pequena, porém em longos intervalos de tempo a confiança do sistema desse método se apresentou melhor. No entanto, esse resultado não considerou a grande diferença de número entre os termos SW e MB com relação às janelas de não tiro. Para cumprir essa análise, foi computado na Tabela 11 o coeficiente F1 Score, definido pela Equação (5.2) [28].

$$F1_{Score} = \frac{2(TP)}{2(TP) + FP + FN} \quad (5.2)$$

Tabela 11 – Coeficiente F1 Score

Janela	Correlação Cruzada	Análise Espectral da Energia	Análise RSR	Redes Neurais
TP	36818	36806	36844	36836
FN	43	25	17	11
FP	5	35	5	19
F1	99,9348 %	99,9185 %	99,9701 %	99,9592 %

Conforme observado pelos resultados da Tabela 11, o método da Análise da Razão Sinal Ruído apresentou maior robustez a erros de classificação. Porém, a diferença percentual é baixa, de modo que esse parâmetro não seja o mais relevante na escolha do método mais apropriado para o emprego operacional.

Nas condições analisadas, o resultado do método usando Redes Neurais foi considerado o mais adequado, porque ele conseguiu obter um melhor resultado de TPR_{MB} e não apresentou uma discrepância negativa grande em relação aos outros métodos por conta de erros de classificação.

6 CONCLUSÃO

O objetivo primordial desse projeto foi reproduzir e comparar algoritmos de detecção de sinais impulsivos e de classificação em SW, MB ou outros tipos de eventos impulsivos. Nesse sentido, foram elaboradas rotinas no software Matlab® para a simulação das etapas de treinamento e de teste de cada um dos quatro métodos avaliados nesse documento.

Esse trabalho teve como foco aplicações militares em tempo real para atender à demanda do Projeto Caçador do Exército Brasileiro de desenvolvimento de capacidades contra caçadores. Tornar a detecção e classificação procedimentos automáticos irá auxiliar na união dos requisitos de software e de hardware, tornando o produto de estimação da posição do caçador inimigo viável. Desse modo, o soldado terá maior segurança contra a atuação mortífera dos caçadores, visto que eles conseguiram buscar abrigo ou alvejar o franco-atirador com base nas informações da direção na qual o inimigo se encontra.

Para o meio acadêmico, esse trabalho representou uma busca por aprimorar e comparar métodos de processamento de sinais já consagrados nessa área. O método da Correlação Cruzada baseado na proposta da Izabela (2010) não apresentava uma metodologia clara para realizar a distinção entre SW e MB, sendo proposto o uso de RBF SVM Kernel que, ainda assim, se mostrou insuficiente para o discernimento de MB. O método da Análise Espectral da Energia proposto por Mäkinen e Pertilä (2010) não foi suficiente para a classificação, porque depende de características do armamento e da geometria dos dispositivos. O método da Razão Sinal-Ruído enunciado por Ahmed (2013) se mostrou robusto em termos de detecção de sinais impulsivos, porém ainda insipiente para a classificação dos MB. O método usando Redes Neurais (2017) não apresentava uma separação entre as etapas de detecção e de classificação, sendo proposta a utilização do mesmo algoritmo de detecção proposto por Ahmed e a classificação proposta no artigo base deste método, de modo que esse conjunto se mostrou o mais adequado para o propósito deste trabalho, discernindo a maior taxa de MB dentre os quatro métodos.

A classificação entre SW, MB e outros tipos de sinais impulsivos se mostrou complicada, tendo em vista a similaridade entre os parâmetros do SW e do MB, além da presença de ruído intenso ter a capacidade de ofuscar a presença do MB, mesmo com a aplicação do filtro de mediana. A escolha de favorecer a obtenção do MB em relação ao SW, com a presença de eventuais erros, foi importante para aumentar a eficiência do sistema de classificação, evitando a perda de sinais de disparos vindo do caçador.

As redes neurais aplicadas neste trabalho foram do tipo *feed-forward* com duas camadas geradas pelo aplicativo *Classification Learner* do software Matlab®. Tendo isso em vista, uma sugestão de melhoria seria implementar e alterar a rede neural gerada de

modo a favorecer o desenvolvimento do algoritmo. A presente pesquisa também ressaltou a existência de outros métodos que envolvem redes neurais, como as redes neurais do tipo convolucionais e a aplicação de redes neurais para busca de padrões via processamento digital da imagem do espectrograma do sinal, cuja implementação fugiria ao escopo desse trabalho. Implementar esses métodos em Python ou outra linguagem de programação adequada poderia encaminhar para resultados mais rápidos de classificação. Outra sugestão de melhoria constitui elaborar mecanismos de realimentação do treinamento com base na entrada de novos dados, permitindo ao algoritmo a obtenção de um limiar dinâmico.

REFERÊNCIAS

- 1 PALAVENIS, D. The use of emerging disruptive technologies by the Russian Armed Forces in the Ukrainian War. *Air Land Sea Application Center*, 2022. 01 oct. de 2022. Disponível em: <https://www.alsa.mil/Portals/9/Documents/articles/221001_ALSA_Article_Donatas_Palavenis.pdf>.
- 2 EXÉRCITO, E. M. do. *Manual IP-21-2 - O Caçador*. Brasília - DF, 1998. 109 p.
- 3 LELIS, C. I. C. *Sniper Urbano: Uma visão histórica e o emprego no combate moderno*. Brasília, DF: Doutrina Militar Terrestre em revista, 2018. 30 - 37 p.
- 4 AHMED, T.; UPPAL, M.; MUHAMMAD, A. Improving efficiency and reliability of gunshot detection systems. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988. ICASSP-88., 1988 International Conference on*, p. 513–517, 10 2013.
- 5 FREIRE, I.; APOLINÁRIO, J. Gunshot detection in noisy environments. 01 2010.
- 6 MÄKINEN, T.; PERTILÄ, P. Shooter localization and bullet trajectory, caliber, and speed estimation based on detected firing sounds. *Applied Acoustics*, v. 71, p. 902–913, 10 2010.
- 7 HRABINA, M.; SIGMUND, M. Comparison of feature performance in gunshot detection depending on noise degradation. p. 1–4, 04 2017.
- 8 BRUSTAD, B.; FREYTAG, J. C. A survey of audio forensic gunshot investigations. *Journal of the Audio Engineering Society*, july 2005.
- 9 PAVLICHENKO, L. *Lady Death: The Memoirs of Stalin's Sniper*. 1. ed. Newport, Australia: Big Sky Publishing Pty Ltd, 2018. 439 p.
- 10 GONDIM, H. A. S. *A História do Emprego do Caçador*. 23 p. Monografia (Graduação em Curso de Aperfeiçoamento Militar/Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais Médicos) — Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, Rio de Janeiro, 2020.
- 11 SOUZA, G. de O. História Militar: o emprego do caçador. *DCEx*, 2020. 16 mai. de 2020. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/6570>>.
- 12 MERLIM, E. R. *A implantação de um centro de instrução de caçadores no Exército Brasileiro*. Brasília, DF: Doutrina Militar Terrestre em revista, 2018. 62 - 66 p.
- 13 MENDES, A. R. F. *A necessidade da criação da escola de caçadores do Exército Brasileiro*. 67 p. Monografia (Graduação em Curso de Ciências Militares) — Academia Militar das Agulhas Negras, Resende, RJ, 2020.
- 14 IMBEL. *Manual do Usuário - Operação e Manutenção*. Brasília - DF, 2018. 31 p.
- 15 GUERRA, M. da. *Manual de Campanha - Metralhadora .50 M2 - C-23-65*. Guanabara, RJ, 1963. 154 p.
- 16 IMBEL. *Manual de Usuário - FUZIL 7,62 M964A1 - PARAFAL*. Brasília - DF, 2015. 117 p.

- 17 IMBEL. *Manual de Usuário - FUZIL DE ASSALTO 5,56 - IMBEL A2*. Brasília - DF, 2017. 45 p.
- 18 BARBOSA, F. M. *Condição para letalidade de pequenas frações: estudo sobre a eficiência de calibres e armamentos atualmente disponíveis*. 33 p. Monografia (Especialização em Ciências Militares com ênfase em Gestão Organizacional) — Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, RJ, 2017.
- 19 CARVALHO, J. *O Sniper nas Operações de Reconhecimento*. 70 p. Monografia (Graduação em Curso de Ciências Militares) — Academia Militar das Agulhas Negras, Resende - RJ, 2009.
- 20 MAGAND ALAIN DONZIER, F. M. F. *Pilar acoustic gunshot detection localization system: Principles of acoustic localization of small caliber gunshots*. CFA/DAGA, 2004.
- 21 TECHNOLOGIES, R. B. *Boomerang Gunshot Detection*. Virginia, Estados Unidos da América, 2020. 4 p.
- 22 OLEKSANDR, H. *Optical Detection System Anti-Sniper*. Kiev, Ucrânia, 2022.
- 23 KUMAR, S.; SINHA, P.; HEGDE, R. *Sniper localization using passive acoustic measurements over an ad-hoc sensor array*. *21st National Conference on Communications*, 2015.
- 24 MAHER, R. C. *Modeling and signal processing of acoustic gunshot recordings*. p. 257–261, 2006.
- 25 MARKULA, T. *Propagation, measurement and assessment of shooting noise*. 81 p. Monografia (Mestrado em Ciências da Tecnologia) — TEKNILLINEN KORKEAKOULU, Espoo, Finlândia, 2006.
- 26 STANDARDIZATION, I. I. O. for. *ISO 17201-1:2018: Acoustic noise from shooting ranges - part 1*. Geneva, Suíça: International Organization for Standardization, 2018.
- 27 BORZINO, A.; APOLINARIO, J.; CAMPOS, M. *Consistent DOA estimation of heavily noisy gunshot signals using a microphone array*. *IET Radar, Sonar Navigation*, v. 10, 06 2016.
- 28 LARNER, A. *The 2x2 Matrix Contingency, Confusion, and the Metrics of Binary Classification*. 1. ed. Liverpool, UK: Springer Nature Switzerland, 2021. 166 p.
- 29 SCOTT, D. *Histograms: Theory and Practice*. Houston, Texas, EUA: [s.n.], 2008. 47-94 p.
- 30 RICHARDSON, E. C. *Classification. Theoretical and practical*. Amherst, EUA: Charles Scribner's sons, 1901.
- 31 HUANG, X.; ACERO, A.; HON, H.-W. *Spoken Language Processing*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2001.
- 32 KALLAS, M.; HONEINE, P.; RICHARD, C.; CLOVIS, F.; AMOUD, H. *Prediction of time series using Yule-Walker equations with kernels*. 03 2012.
- 33 QUATIERI, T. F. *Discrete-Time Speech Signal Processing: Principles and Practice*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2001.

-
- 34 SULLIVAN, K.; LUKE, S. Evolving kernels for support vector machine classification. p. 1702–1707, 07 2007.
- 35 BEHRINGER. *ECM8000: Ultra-linear Measurement Condenser Microphone*. Alemanha, 2016. 4 p. Disponível em: <<https://www.manua.ls/behringer/ecm8000/manual?p=4>>.
- 36 KLAPURI, A.; DAVY, M. *Signal Processing Methods for Music Transcription*. New York, USA: Springer-Verlag, 2006. 1033-1036 p.
- 37 URKOWITZ, H. Energy detection of unknown deterministic signals. *Proceedings of the IEEE*, v. 55, n. 4, p. 523–531, 1967.
- 38 GAJAWADA sampath kumar. Chi-square test for feature selection in machine learning. *Towards Data Science*, 2019. Disponível em: <<https://towardsdatascience.com/chi-square-test-for-feature-selection-in-machine-learning-206b1f0b8223>>.

APÊNDICE A – ALGORITMO DA REDE NEURAL

A função *myNeuralNetwork* gerada pelo Matlab possui como entrada um vetor de 55 colunas, cuja ligação entre o número da coluna e o parâmetro está presente na Tabela 5.

Existem 7 constantes nessa função: 3 para operar o vetor de entrada da rede neural, 2 para operar na Camada Escondida e 2 para operar na Camada de Saída. As três constantes de entrada são o $Offset_{55 \times 1}$, o $Ganho_{55 \times 1}$ e o $Mínimo = -1$. As constantes da Camada Escondida são um vetor $b_{1 \times 10}^1$ e uma matriz de pesos $W_{10 \times 55}^1$. As constantes da Camada de Saída são um vetor $b_{1 \times 3}^2$ e uma matriz de pesos $W_{3 \times 10}^2$.

O primeiro passo ocorre na entrada dos parâmetros. A função *myNeuralNetwork* verifica quantas linhas o vetor de entrada $x_{1 \times 55}$ possui (ela faz esse procedimento porque a entrada pode ser uma matriz $N \times 55$, de modo a computar o resultado em cada linha da matriz. Esse recurso não será explorado aqui, visto que a entrada será 1×55), obtendo o valor 1. Em seguida, o vetor de entrada é transposto (obtendo o vetor $m_{55 \times 1}$) e os mínimos e máximos do sinal de entrada são obtidos. Esse processamento é realizado por uma função que toma o vetor $m_{55 \times 1}$, subtrai termo a termo o offset (A.1), multiplica termo a termo o ganho (A.2) e soma termo a termo o valor mínimo (A.3). Desse modo, $y_{55 \times 1}^1$ é o vetor que entra na Camada Escondida.

$$[Passo1]_{ij} = [m]_{ij} - [Offset]_{ij} \quad (A.1)$$

$$[Passo2]_{ij} = [Passo1]_{ij} * [Ganho]_{ij} \quad (A.2)$$

$$[y^1]_{ij} = [Passo2]_{ij} + Mínimo \quad (A.3)$$

Na Camada Escondida, uma matriz 10×1 é criada replicando os valores da primeira coluna de $b_{10 \times 1}^1$ para outras Q colunas (como $Q = 1$, a matriz criada é idêntica à $b_{10 \times 1}^1$). Em seguida, é obtida a matriz $Matriz_{10 \times 1}^1$ por meio da Equação (A.4). É aplicada a função de transferência simétrica de Sigmoid em $Matriz_{10 \times 1}^1$ termo a termo gerando $a_{10 \times 1}^1$, conforme (A.5), que corresponde a entrada da Camada de Saída.

$$Matriz_{10 \times 1}^1 = W_{10 \times 55}^1 * y_{55 \times 1}^1 + b_{10 \times 1}^1 \quad (A.4)$$

$$[a^1]_{ij} = \frac{2}{1 + e^{-2*[Matriz^1]_{ij}}} - 1 \quad (A.5)$$

Na Camada de Saída, uma matriz 3×1 é criada replicando os valores da primeira coluna de $b_{3 \times 1}^2$ para as outras Q colunas (a matriz criada é idêntica à $b_{3 \times 1}^2$). É calculada a matriz $Matriz_{10 \times 1}^2$ por intermédio da Equação (A.6).

Esse resultado passa pela Função de Transferência Competitiva Leve, que corresponde a uma função que toma o vetor $Matriz_{10 \times 1}^2$, torna o maior valor dentro de $Matriz_{10 \times 1}^2$ próximo a 1 (como a função é leve, ela deixa em termos de probabilidade) e as outras colunas tendem a 0. O algoritmo para obter esse resultado inicia verificando se o vetor $Matriz_{10 \times 1}^2$ está armazenado dentro da GPU. O procedimento em caso positivo ou negativo é o mesmo (exceto o modo como as operações são aplicadas), então será descrito o modo considerando que não esteja dentro da memória GPU.

$$Matriz_{10 \times 1}^2 = W_{10 \times 55}^2 * a_{55 \times 1}^1 + b_{10 \times 1}^2 \quad (A.6)$$

Um vetor $n_{3 \times 1}^1$ é criado empregando o valor máximo de cada coluna de $y_{3 \times 1}^2$ (ou seja, $n_{3 \times 1}^1 = y_{3 \times 1}^2$). O vetor $Numerador_{3 \times 1}$ é definido por meio da equação (A.7). O vetor Denominador corresponde à soma dos elementos de cada coluna do vetor $Numerador_{3 \times 1}$ (isto é, $Denominador_{3 \times 1} = Numerador_{3 \times 1}$). A saída dessa função $a_{3 \times 1}^2$ é obtida pela Equação (A.8). Caso algum termo do vetor $Denominador_{3 \times 1}$ seja 0, ele é substituído por 1.

$$[Numerador]_{ij} = e^{([y^2]_{ij} - [n^1]_{ij})} \quad (A.7)$$

$$[a^2]_{ij} = \frac{[Numerador]_{ij}}{[Denominador]_{ij}} \quad (A.8)$$

Para finalizar o algoritmo, basta obter a transposta de $a_{3 \times 1}^2$, resultando num vetor 1×3 , onde se o termo mais próximo a 1 ocorrer na primeira coluna esse resultado representará um SW, se ocorrer na segunda coluna um MB e se ocorrer na terceira coluna uma janela de não tiro.