

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

**LUCAS GOMES DO AMARAL**

**GERAÇÃO DE TABELAS DE TIRO**

**RIO DE JANEIRO  
2021**

LUCAS GOMES DO AMARAL

## GERAÇÃO DE TABELAS DE TIRO

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

Orientador: Rubenildo Pithon de Barros, MC

Rio de Janeiro

2021

©2021

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Gomes do Amaral, Lucas  
Geração de Tabelas de Tiro / Lucas Gomes do  
Amaral. – Rio de Janeiro, 2021.  
77 f.

Orientador: Rubenildo Pithon de Barros.

Projeto Final de Curso (graduação) – Instituto  
Militar de Engenharia, Bacharel em Engenharia  
Mecânica e de Armamento, 2021.

1. tabelas de tiro. 2. massa-ponto modificado.  
3. Runge-Kutta. 4. balística externa. 5. STANAG  
4119. I. Pithon de Barros, Rubenildo, orient.

**LUCAS GOMES DO AMARAL**

## **Geração de Tabelas de Tiro**

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

Orientador: Rubenildo Pithon de Barros.

Aprovado em Rio de Janeiro, 14 de Outubro de 2021, pela seguinte banca examinadora:



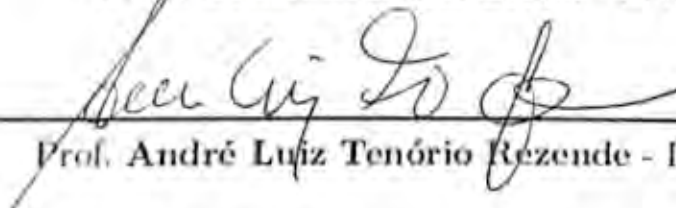
---

**Cel Rfund. Rubenildo Pithon de Barros - M. Sc. do IME - Presidente**



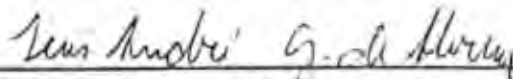
---

**Profa. Bruna Rafaella Loiola - D. Sc. do IME**



---

**Prof. André Luiz Tenório Rezende - D. Sc. do IME**



---

**TC Luís André Gomes de Abreu - M. Sc. do IME**

*Este trabalho é dedicado a todos que  
me ajudaram nessa caminhada.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, que me apoiaram na difícil jornada da minha formação. Sem o apoio de vocês não teria conquistado esse diploma tão valioso. Em especial, agradeço a minha mãe, pois mesmo com a dor de se afastar de um filho me deu as condições necessárias para seguir este caminho.

Agradeço aos meus colegas de turma, que me acompanharam nesta jornada. Sem a presença de vocês eu jamais teria resistido a pressão da formação de engenheiro militar. Em especial, agradeço aos meus colegas do curso de engenharia, que me auxiliaram durante o curso.

Agradeço aos meus professores, coordenadores e instrutores, que dedicaram tempo para compartilhar conhecimento e sabedoria para a minha formação. Em especial, agradeço ao Cel Barros e a Ten Crema por terem exercido papel especial na minha formação como engenheiro, e ao Capitão Heitor pela contribuição a minha formação militar.

Agradeço ao Instituto Militar de Engenharia pela minha formação, experiências e oportunidades. Em especial, agradeço aos membros da CEOS e SCOPE, que acreditaram nos meus sonhos e permitiram que fosse realizados.

Por fim, agradeço a minha noiva e sua família, por terem me recebido de braços abertos e com todo o carinho possível, principalmente durante os tempos da pandemia de COVID-19.

*“Com numerosos cálculos, pode-se obter a vitória. Teme quando os cálculos forem escassos. E quão poucas chances de vencer tem aquele que nunca calcula!”*

*(Sun Tzu)*

## RESUMO

O presente trabalho desenvolveu a geração e virtualização de tabelas de tiro, mais especificamente as Tabelas A, C, D, E, F e G, consultando bibliografias de origem nacional e internacional. A abordagem da metodologia foi realizada com foco no usuário, o Exército Brasileiro, através do uso de manuais americanos e da ONU, bem como o Manual de Campanha C 6-40. Quanto à modelagem balística, as equações de movimento do projétil foram formuladas de acordo com o modelo de massa-ponto modificado e o sistema de equações diferenciais ordinárias resolvidas por meio do método de Runge-Kutta de quarta ordem. Em seguida, foram desenvolvidos diversos algoritmos para a obtenção das correções devido as perturbações que o tiro de artilharia está a mercê, organizando as informações conforme as normas consultadas. As tabelas obtidas por este trabalho foram elaboradas para o Obuseiro 155mm M114 e para a munição 155mm M107 Auto Explosiva com o intuito de validação dos algoritmos. Quando comparado com as tabelas elaborados pelo Exército Americano, os resultados mostraram diferenças pouco expressivas, mas que podem vir a significativas em certos cenários de combate. Conseqüentemente, avaliou-se o rendimento das tabelas frente ao modelo balístico utilizado, aplicando ambas as tabelas em duas situações fictícias com o uso da técnica de Artilharia de Campanha no Teatro de Operações. Vale ressaltar que com a metodologia aplicada neste trabalho pode-se automatizar os procedimentos de uso, sendo necessário o esforço manual apenas para o uso da tabela de referência. Em relação ao desempenho observado, foi observado comportamento semelhante de ambas as tabelas, sendo a de referência um pouco menor que o calculado. Logo, concluiu-se que as metodologias e algoritmos deste trabalho são plenamente capazes de elaborar tabelas de tiro, sendo observado apenas estudos adicionais para aperfeiçoamento do modelo balístico.

**Palavras-chave:** tabelas de tiro, massa-ponto modificado, Runge-Kutta, balística externa, artilharia de campanha, STANAG 4119.



## ABSTRACT

The present work developed the generation and virtualization of shooting tables, more specifically Tables A, C, D, E, F and G, consulting bibliographies of national and international origin. The methodology approach was carried out with a focus on the user, the Brazilian Army, through the use of American and UN manuals, as well as the C 6-40 Campaign Manual. As for the ballistic modeling, the projectile motion equations were formulated according to the modified point-mass model and the system of ordinary differential equations solved using the fourth-order Runge-Kutta method. Then, several algorithms were developed to obtain corrections due to the disturbances that the artillery fire is at the mercy of, organizing the information according to the consulted norms. The tables obtained by this work were elaborated for the Howitzer 155mm M114 and for the ammunition 155mm M107 HE in order to validate the algorithms. When compared with the tables prepared by the US Army, the results showed little significant differences, but that can come to be significant in certain combat scenarios. Consequently, the performance of the tables was evaluated against the ballistic model used, applying both tables in two fictitious situations using the Field Artillery technique in the Theater of Operations. It is noteworthy that the methodology applied in this work can automate the procedures for use, requiring manual effort just to use the reference table. Regarding the performance observed, a similar behavior was observed for both tables, with the reference table being a little smaller than the calculated one. Therefore, it was concluded that the methodologies and algorithms of this work are fully capable of preparing firing tables, with only additional studies being observed to improve the ballistic model.

**Keywords:** firing tables, modified mass-point, Runge-Kutta, external ballistics, field artillery, STANAG 4119.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Computador Portátil de Direção de Tiro (Palmar II). . . . .	18
Figura 2 – Tiro indireto realizado por uma peça de artilharia, tendo que contornar uma cota no terreno. . . . .	20
Figura 3 – Posicionamento da peça sob o solo para executar o disparo da Fig. 2 . . . . .	21
Figura 4 – Eixo de rotação, norte geográfico e latitude na esfera definida. . . . .	22
Figura 5 – Descrição de elementos no espaço e no projétil que serão utilizados para o cálculo de trajetória. . . . .	23
Figura 6 – Descrição do rolamento, guinada e arfagem. . . . .	24
Figura 7 – Descrição de pontos de interesse na trajetória balística. . . . .	24
Figura 8 – Descrição de distâncias de interesse na trajetória balística. . . . .	25
Figura 9 – Descrição de linhas de interesse na trajetória balística. . . . .	26
Figura 10 – Descrição de ângulos de interesse no início da trajetória. . . . .	26
Figura 11 – Descrição da inclinação da trajetória em dois pontos quaisquer da trajetória. . . . .	27
Figura 12 – Descrição do desvio. . . . .	28
Figura 13 – Distribuição dos impactos de uma barragem hipotética. . . . .	28
Figura 14 – Geometria e elementos de interesse do projétil. . . . .	31
Figura 15 – Força Magnus . . . . .	35
Figura 16 – Lógica de programação do código de geração de trajetória . . . . .	39
Figura 17 – Exemplo de Tabela A. . . . .	44
Figura 18 – Fragmento da Tabela B. . . . .	44
Figura 19 – Fragmento da Tabela C. . . . .	45
Figura 20 – Fragmento da Tabela D. . . . .	46
Figura 21 – Fragmento da Tabela E. . . . .	46
Figura 22 – Fragmento da primeira parte da Tabela F. . . . .	46
Figura 23 – Fragmento da segunda parte da Tabela F. . . . .	47
Figura 24 – Fragmento da Tabela G. . . . .	48
Figura 25 – Fragmento da Tabela H. . . . .	49
Figura 26 – Fragmento da Tabela I. . . . .	49
Figura 27 – Fragmento da Tabela J. . . . .	50
Figura 28 – Fragmento da Tabela K. . . . .	50
Figura 29 – Diagrama do algoritmo utilizado para geração das trajetórias balísticas . . . . .	54
Figura 30 – Diagrama do algoritmo utilizado para geração das trajetórias de referência para as tabelas de Tiro . . . . .	56

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Condições Padronizadas da Atmosfera . . . . .	36
Quadro 2 – Dados da peça de artilharia utilizados. . . . .	40
Quadro 3 – Medições hipotéticas da variação da Velocidade de boca pela temperatura do propelente para a carga 7w . . . . .	40
Quadro 4 – Dados da Granada 155 M107 HE . . . . .	41
Quadro 5 – Coeficientes Aerodinâmicos da Granada 155 M107 HE . . . . .	41
Quadro 6 – Boletim Meteorológico de Exemplo . . . . .	51
Quadro 7 – Condições de voo consideradas para a trajetórias de referência . . . . .	56
Quadro 8 – Primeiro conjunto de colunas da Tabela F (colunas 1 a 4) . . . . .	64
Quadro 9 – Segundo conjunto de colunas da Tabela F (colunas 5 a 7) . . . . .	64
Quadro 10 – Terceiro conjunto de colunas da Tabela F (colunas 8 a 9) . . . . .	65
Quadro 11 – Quarto conjunto de colunas da Tabela F (colunas 10 a 11) . . . . .	66
Quadro 12 – Quinto conjunto de colunas da Tabela F (colunas 12 a 13) . . . . .	66
Quadro 13 – Sexto conjunto de colunas da Tabela F (colunas 14 a 15) . . . . .	67
Quadro 14 – Sétimo conjunto de colunas da Tabela F (colunas 16 a 17) . . . . .	68
Quadro 15 – Oitavo conjunto de colunas da Tabela F (colunas 18 a 19) . . . . .	68
Quadro 16 – Valores da Tabela A calculados e da tabela de referência . . . . .	69
Quadro 17 – Primeiro conjunto de colunas da Tabela G . . . . .	70
Quadro 18 – Segundo conjunto de colunas da Tabela G . . . . .	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Art Camp	Artilharia de Campanha
CM	Centro de Massa
CP	Centro de Pressão
ENIAC	<i>Electronic Numerical Integrator And Computer</i>
NATO	<i>North Atlantic Treaty Organization</i>
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
STANAG	<i>Standardization Agreement</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$AZ$	Ângulo de Azimute
$C_{D0}$	Coefficiente constante do arrasto
$C_{D\alpha^2}$	Coefficiente quadrático do arrasto
$C_{D\alpha^4}$	Coefficiente quártico do arrasto
$C_{L\alpha}$	Coefficiente linear de sustentação
$C_{L\alpha^3}$	Coefficiente cúbico de sustentação
$C_{L\alpha^5}$	Coefficiente quántico de sustentação
$C_{mag}$	Coefficiente aerodinâmico da força Magnus
$C_{Ma}$	Coefficiente do momento de capotamento
$C_{M\alpha^3}$	Coefficiente cúbico do momento de capotamento
$C_{xpm}$	Coefficiente de amortecimento do rolamento
$d$	Diâmetro característico do Projétil
$DPA$	Desvio provável em alcance
$DF$	Força de arrasto
$F$	Força atuante sobre o CM do projétil
$f_L$	Fator de sustentação
$g$	Aceleração da gravidade
$g_0$	Modulo da gravidade de referência
$H$	Fator de decaimento da densidade pela altitude
$h$	Passo de integração Runge-Kutta
$I$	Momento de Inércia
$i$	Fator de forma
$K$	Fator de decaimento da temperatura pela altitude

$k$	Coefficiente da integração de Runge-Kutta
$lat$	Ângulo de Latitude
$LF$	Força de sustentação
$M$	Número de Mach
$m$	Massa
$MF$	Força Magnus
$n_i$	Fator de correção na mudança de massa
$P$	Força peso
$Q_D$	Fator de ajuste da guinada
$Q_M$	Fator de correção da força Magnus
$R$	Raio terrestre na posição da origem da trajetória ideal em relação ao CM terrestre
$r$	Posição do CM do projétil em relação ao referencial do CM terrestre
$S$	Matriz de rotação bidimensional
$T$	Temperatura local do ar
$T(F)$	Temperatura local do ar no ponto de disparo
$T(Y)$	Temperatura local do ar no ponto na altitude $Y$
$t$	Tempo
$l_c$	Passo de raiamento
$\dot{u}$	Aceleração do CM do projétil
$u$	Velocidade do CM do projétil
$u_0$	Velocidade de saída de boca
$v$	Velocidade do Relativa do CM no fluido
$v_0$	Velocidade local do som
$W$	Velocidade do vento
$X$	Posição do CM do projétil

$Y$  Altitude

Símbolos Gregos

$\alpha$  Ângulo de ataque

$\alpha_R$  Ângulo de Equilíbrio

$\gamma$  Coeficiente de expansão adiabático

$\Lambda$  Aceleração de Coriolis

$\theta$  Ângulo de Rotação

$\rho$  Densidade local do ar

$\rho(Y)$  Densidade local do ar n altitude  $Y$

$\chi$  Eixo de Simetria do Projétil

$\vec{\Omega}$  vetor de rotação terrestre

$\omega$  Velocidade angular

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	HISTÓRICO E MOTIVAÇÃO	17
1.2	REVISÃO DA LITERATURA	18
1.3	OBJETIVO	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO</b>	<b>20</b>
2.1	O TIRO DE ARTILHARIA DE CAMPANHA	20
2.1.1	TRAJETÓRIA	21
2.1.1.1	SISTEMA DE REFERÊNCIA	22
2.1.1.2	ELEMENTOS DE TRAJETÓRIA	24
2.1.2	DISPERSÃO	27
2.2	MODELAGEM BALÍSTICA	29
2.2.1	BALÍSTICA INTERNA	29
2.2.2	BALÍSTICA TERMINAL	30
2.2.3	BALÍSTICA EXTERNA	31
2.2.3.1	EQUAÇÕES DE MOVIMENTO	31
2.2.3.2	GRAVIDADE	33
2.2.3.3	EFEITO CORIOLIS	34
2.2.3.4	FORÇAS DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO	34
2.2.3.5	FORÇA MAGNUS	35
2.2.4	ATMOSFERA PADRÃO	35
2.2.5	ANÁLISE NUMÉRICA	37
2.2.5.1	MÉTODO RUNGE-KUTTA 4ª ORDEM	38
2.2.5.2	CÓDIGO DE GERAÇÃO DE TRAJETÓRIA	38
2.3	GENERALIDADES DO ARMAMENTO	39
2.3.1	PEÇA E CARGAS	39
2.3.2	GRANADA E ESPOLETA	40
2.4	TABELAS DE TIRO	41
2.4.1	PRÍNCIPIOS	42
2.4.2	CONTEÚDO DOS TABELAS	42
2.4.2.1	CAPA E INTRODUÇÃO	43
2.4.2.2	TABELA A, B, C E D	43
2.4.2.3	TABELA E	45
2.4.2.4	TABELA F	46
2.4.2.5	TABELA G	48



2.4.2.6	TABELA H E I . . . . .	49
2.4.2.7	TABELA J . . . . .	49
2.4.2.8	TABELA K . . . . .	50
2.4.2.9	APLICAÇÃO DAS TABELAS DE TIRO . . . . .	50
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>53</b>
3.1	GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS . . . . .	53
3.2	GERAÇÃO DE TABELAS . . . . .	55
3.2.1	TABELA A . . . . .	57
3.2.2	TABELA C E D . . . . .	57
3.2.3	TABELA E . . . . .	58
3.2.4	TABELA F . . . . .	58
3.2.5	TABELA G . . . . .	60
3.3	IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DO TIRO DE ARTILHARIA . . . . .	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>63</b>
4.1	TABELA F . . . . .	63
4.2	TABELA A . . . . .	69
4.3	TABELA G . . . . .	70
4.4	APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO DAS TABELAS EM UM TIRO SIMULADO	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>76</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 HISTÓRICO E MOTIVAÇÃO

A Artilharia, no Exército Brasileiro tem por missão apoiar a Infantaria, debilitando componentes do inimigo, como também a defesa antiaérea e da costa brasileira. Para tanto, é dotada com canhões, obuses, foguetes e mísseis, que permitem abater alvos a longas distâncias e que, por questões de segurança, encontra-se desenfiaado e fora das vistas do inimigo. Contudo, tal situação favorece cenários em que o tiro direto é impossibilitado devido a fatores como o terreno ou distância, o que leva ao uso da técnica do tiro indireto [1].

Para auxiliar o atirador na tarefa de calcular o tiro indireto é possível o uso das tabelas de tiro. As tabelas proporcionam valores de referência, sob determinadas condições, para calcular a elevação e a direção do disparo [1]. A história das tabelas de tiro começa no Séc. XVI, com a publicação de *Nova Scientia* em 1537 pelo italiano Niccolo Tartaglia (1499 – 1557). Em seu trabalho, Tartaglia abordou os princípios de balística, calculou as trajetórias e montou protótipos para tabelas de tiro [2].

Entre o final do Séc. XIX e início do Séc. XX a revolução industrial trouxe diversas inovações tecnológicas, que permitiram o desenvolvimento de canhões e obuses com maior poder de fogo e alcance [2], intensificando a necessidade de tabelas de tiro precisas. Contudo, até a Segunda Guerra Mundial o processo de desenvolvimento das tabelas era basicamente feito à mão, e que devido as grandes quantidades de trajetórias necessárias sobrecarregavam as instalações destinadas aos cálculos [3].

Logo, o *Army's Ballistic Research Laboratory*, órgão responsável por desenvolver as tabelas para o Exército Americano, procurando expandir as capacidades de suas instalações desenvolveu, junto com a *University of Pennsylvania Moore School of Electrical Engineering*, o ENIAC. Tal dispositivo eletrônico, finalizado em 1946, era mais rápido que qualquer computador já produzido até então, e foi o responsável por inaugurar a era tecnológica dos computadores que revolucionou diversos campos de conhecimento humano [3].

Desde então, o ambiente operacional tem sido marcado por evolução tecnológica ímpar, com possibilidade de atuação junto a aliados e a necessidade de redução de danos colaterais. Além disso, espera-se aumento do alcance, da precisão e da letalidade da artilharia, bem como a digitalização de sistemas integrantes [4], o que incentiva o desenvolvimento de tecnologias como o sistema Gênesis, produzido pela IMBEL, para a direção e coordenação de tiro Nível Brigada. Em especial, vale citar o Palmar II CPM-3004,

Fig. 1 que realiza os cálculos balísticos para a execução dos tiros de artilharia [5].



Figura 1 – Computador Portátil de Direção de Tiro (Palmar II).

Portanto, dado o contexto histórico e atual, o presente trabalho busca acompanhar a tendência e desenvolver um sistema de geração e virtualização de tabelas de tiro, conforme não apenas com normas e acordos de padronização internacionais mas também com relação as novas perspectivas que o Sistema de Artilharia de Campanha procura implementar na sua reestruturação [6]. Sempre em concordância, é claro, com os interesses do Exército Brasileiro.

## 1.2 REVISÃO DA LITERATURA

Como comentado, este trabalho foca no desenvolvimento de um sistema de geração e virtualização de tabelas de tiro com enfoque primário de utilização no Exército Brasileiro. Para tanto, utiliza-se como base normas e padrões para manter-se dentro das diretrizes do Sistema de Artilharia de Campanha e atualizado com as práticas internacionais. Dentro do contexto internacional, as referências de interesse brasileiro [6] possuem origem no Tratado do Atlântico Norte e nos Estados Unidos.

Nascido do clima de tensão pós Segunda Guerra Mundial o Tratado do Atlântico Norte (NATO - *North Atlantic Treaty Organization*) fomentou a padronização de armas e calibres entre seus membros [2]. Naturalmente, as tabelas de tiro também foram padronizadas, e seguem os protocolos descritos no Acordo de Padronização (STANAG - *Standardization Agreement*) 4119 [7]. Além da formatação das tabelas, também há acordos para a padronização dos modelos físicos utilizados nos cálculos de trajetória [7], atmosfera padrão [8], boletim meteorológico [9] e até procedimentos para determinar valores de controles para uso em tiros indiretos [10].

Com relação ao que é aplicado nos EUA há o Manual de Artilharia de Campanha americana [11], recentemente atualizado para acompanhar as tendências mundiais. Também há o Manual de Táticas, Técnicas e Procedimentos da Artilharia de Campanha [12]. Também se utilizará uma tabela de tiro verdadeira [13], desenvolvida na década de setenta nos EUA, a partir de disparos reais de Artilharia. Vale ressaltar que tanto a peça quanto

a munição são parte do arsenal brasileiro, aumentando a importância da comparação de resultados.

No âmbito nacional, serão utilizados os dois volumes do manual de campanha da Técnica de Tiro de Artilharia de Campanha [1] [14]. Ambos os volumes serão a base para definições de termos e técnicas relativas ao uso e desenvolvimento da tabela de tiro, com o intuito de direcionar os esforços deste trabalho na sua aplicabilidade dentro das necessidades do Exército Brasileiro.

No aspecto acadêmico, as referências de consultas para a correta aplicação e modelagem dos modelos de trajetória serão os livros de balística de Carlucci [15] e McCoy [16], além do relatório para produção de tabelas de tiro para canhões de artilharia [17]. Tal documento, servirá de base de referência inicial para a metodologia aplicada, e será expandido a luz de novas metodologias estudadas. O código fonte a ser desenvolvido para o sistema no qual este trabalho se propõe a realizar irá se basear nos códigos desenvolvidos na Iniciação à Pesquisa de Lucas Frota Grangeiro [18].

## 1.3 OBJETIVO

Definição e Sistematização das informações atinentes à geração de trajetórias de munições de artilharia, de modo a estabelecer padrões que possam conduzir ao estabelecimento de uma norma, nos moldes das STANAG 4119 e 4355 da OTAN, que possa ser aplicada à geração de tabelas de tiro.

Em particular, este trabalho procura a geração e virtualização de tabelas de tiro para a Artilharia de Campanha, implementando um código capaz de desenvolver, de forma autônoma, as tabelas. Além disso, também busca a implementação destas tabelas de acordo com as necessidades e interesses do Exército Brasileiro.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 O Tiro de Artilharia de Campanha

A Artilharia de Campanha (Art Camp) para cumprir a sua missão em combate de forma eficiente necessita atingir o alvo no tempo oportuno, com a munição e espoleta adequados para garantir o efeito procurado e a forma desejada, independentes das condições ambientais, visibilidade ou terreno [1]. Tais limitações obrigaram o desenvolvimento do tiro indireto, no qual o artilheiro realiza um tiro oblíquo para transpor obstáculos ou atingir distâncias maiores do que o tiro direto.

Para tanto, visualize-se a situação hipotética da Fig. 2. Na imagem, um obuseiro qualquer está localizado em uma cota, e necessita abrir fogo contra uma posição que se encontra atrás de uma elevação. Para executar o tiro, é necessário saber um conjunto de informações relevantes, sendo eles: localização e dimensão do alvo; localização da peça de tiro; informações da peça e da munição; e informações meteorológicas [1].

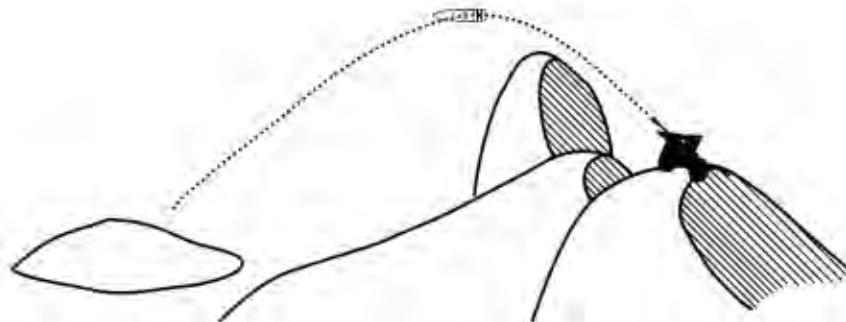


Figura 2 – Tiro indireto realizado por uma peça de artilharia, tendo que contornar uma cota no terreno.

De posse dessas informações, o artilheiro pode realizar os cálculos de artilharia utilizando-se da tabela de tiro, obtendo como resultado uma deriva e uma elevação, como mostra a Fig. 3. A deriva é o ângulo horizontal no sentido horário que o eixo do tubo fará com uma direção de referência, neste caso o norte geográfico, enquanto que a elevação é o ângulo que o mesmo eixo fará com o plano horizontal [1] [11]. Devido a necessidade de precisão elevada, ambos os ângulos são dados em milésimos, unidade de medida angular que divide o ângulo da circunferência em 6400 elementos [11].

Contudo, como visto no exemplo, foi necessário contornar a elevação do terreno, o que representa a volatilidade do teatro de operações, que impõe diversas limitações a Art Camp e requer do artilheiro a capacidade de superar os problemas apresentados. Logo, se





Figura 3 – Posicionamento da peça sob o solo para executar o disparo da Fig. 2

faz necessário a caracterização de diversos elementos da trajetória, elementos esses que possuem alguma função ou importância para a tomada de decisões.

### 2.1.1 Trajetória

A trajetória nada mais é do que a curva realizada pelo centro de massa (CM) da munição durante o voo [1], cuja a forma é de uma curva tridimensional [7]. Antes de se descrever a trajetória deve-se contextualizar o espaço e as referências nas quais a trajetória é construída. Para tanto, se fará uso de hipóteses simplificadoras, cujo objetivo é diminuir o grau de complexidade do ambiente em que a Art Camp atua.

A primeira delas é considerar que a terra é uma esfera perfeita, com centro no centro gravitacional terrestre e de raio igual a 6356766 metros [7]. Tal superfície será denominada nível do mar. Além disso, o planeta possuirá duas características marcantes de interesse: Norte Geográfico e Latitude. O norte geográfico ocorre na intersecção do eixo de rotação terrestre com o nível do mar, no polo norte terrestre. Já a latitude é a distância angular que um dado ponto na superfície faz com o plano da linha do equador, sendo os ângulos na direção norte positivos [19]. Ambas características podem ser observadas na Fig. 4.

Dado um ponto qualquer no espaço, teremos que a distância do ponto ao nível do mar será a altitude do ponto. Caso o ponto esteja localizado fora da esfera, a altitude é positiva, e quando dentro é negativa. A segunda hipótese considera que a distribuição de massa no planeta é tal que o vetor local da gravidade local no ponto esteja na direção do centro da terra, com sentido apontando do ponto em questão para o centro [7].

A terceira, quarta e quinta hipóteses são utilizadas para a descrição da trajetória ideal, trajetória essa que serve de referência para o Artilheiro iniciar os cálculos para o tiro. A hipótese considera condições ambientais ideais, ou seja, que a temperatura e umidade do ar são idênticas ao do padrão internacional da atmosfera [8] [20] e que não há presença

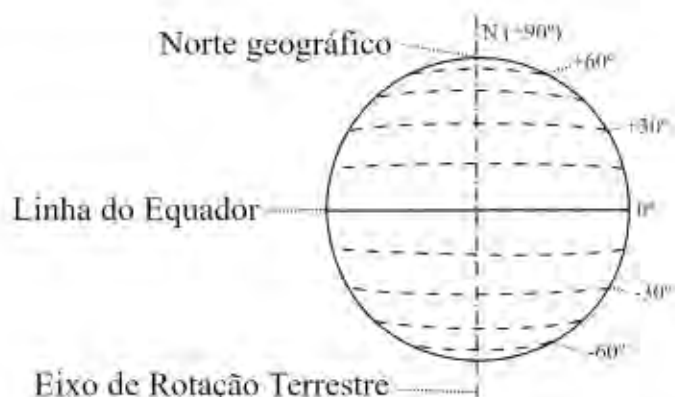


Figura 4 – Eixo de rotação, norte geográfico e latitude na esfera definida.

de vento durante o voo [7].

A quarta desconsidera os efeitos de rotação da terra, que não haverá desvio lateral, que tanto a arma quanto o alvo estão na mesma altitude, e que tanto o projétil como o alvo são pontos no espaço. Por sua vez, a quinta hipótese garante que o material está na condição padrão. Tal condição inclui propelente na temperatura ideal e que a peça de tiro está em perfeitas condições, garantindo a velocidade de boca prevista, aparelhos de pontaria perfeitamente calibrados, peça perfeitamente alinhada e que não insere no disparo qualquer tipo de incerteza [7].

Conseqüentemente, a trajetória ideal pode ser descrita em um plano bidimensional, formado pelos pontos da peça, do alvo e do centro da terra, e que para a sua modelagem necessita-se apenas considerar a gravidade e o arrasto. Obviamente, um tiro real, descrito pela trajetória real, ocorre em condições diferentes das padronizadas nas hipóteses, e a essas diferenças denomina-se perturbações [7].

Tais perturbações acabam por influenciar a trajetória, inserindo condições que alteram a forma da trajetória. A essas influências dá-se o nome de efeitos. Naturalmente, o processo de se realizar uma compensação afim de se corrigir o efeito de uma perturbação é denominado correção. Ao se aplicar um conjunto significativo de correções que permitem atingir o alvo, obtém-se a trajetória corrigida [7]. Vale ressaltar que a trajetória corrigida não é idêntica à real, mas para efeitos práticos no Teatro de Operações é próxima o suficiente para prever pontos de interesse.

#### 2.1.1.1 Sistema de Referência

Para descrever a trajetória serão utilizados os elementos mostrados na Fig. 5, onde está representada a trajetória realizada, e dois sistemas de referência, o da base, e o que irá acompanhar o projétil durante o voo. Para o da base, o primeiro elemento a ser definido é a origem cartesiana, que é a posição do centro de gravidade da munição ao sair da boca de fogo [1]. Na figura, 0 representa a trajetória realizada, enquanto que 1 e 2 os sistemas

de referência na base e no projétil, respectivamente.

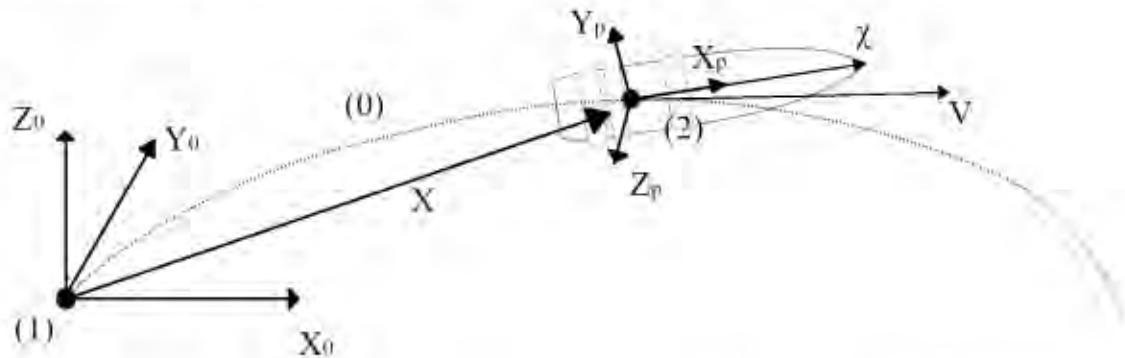


Figura 5 – Descrição de elementos no espaço e no projétil que serão utilizados para o cálculo de trajetória.

Define-se então que a direção  $Z_0$  é paralela à direção da gravidade local, mas com sentido oposto, enquanto que  $X_0$  estará apontando na direção do eixo do tubo, no plano horizontal perpendicular a  $Z_0$  e no sentido de se afastar do tubo. Por fim,  $Y_0$  é dado na direção e sentido do vetor unitário resultante do produto dos vetores unitários na direção  $Z_0$  e  $X_0$ , nesta ordem. O ângulo formado entre  $X_0$  e o Norte Geográfico, no sentido horário, receberá o nome de Azimute.

Já o segundo sistema, a direção  $X_p$  é coincidente com o ao eixo de simetria do projétil, com sentido positivo apontado para a região posterior. Devido a simetria do projétil, teremos que definir que a direção  $Z_p$  pertence ao plano formado por  $Y_0$  e  $X_0$  no ponto de origem, além de ser perpendicular a  $X_p$ . Por fim,  $Y_p$  será obtido pelo produto vetorial entre  $Z_p$  e  $X_p$ , nesta ordem.

Além disso, os esforços atuando podem causar mudanças nos ângulos de Euler entre os referenciais base e do projétil. Logo, serão definidos termos para as rotações que ocorrerem no eixos do sistema do projétil, como mostra a Fig. 6. Na imagem, estão definidos os sentidos positivos para o rolamento, guinada e arfagem, que são rotações que o projétil irá realizar nos eixos  $X_p$ ,  $Y_p$  e  $Z_p$ , respectivamente [15]. Na imagem em questão, o eixo  $Z_p$  é perpendicular ao plano de visão.

Por fim, o último elemento a ser definido é a base da trajetória, que é a projeção da curva sob o plano horizontal [1]. Nos padrões OTAN [7], a base é a projeção da curva sob o nível de superfície da origem da trajetória. Neste trabalho será adotado a primeira definição para a trajetória ideal, e a segunda para as trajetórias corrigida e real.

Para a descrição do movimento do projétil serão utilizados 3 vetores característicos, como mostra a Fig. 5, sendo eles: vetor posição  $\vec{X}$ , vetor velocidade  $V$  e o vetor do eixo de simetria  $\vec{\lambda}$ . O vetor posição  $\vec{X}$  é o vetor que liga a origem ao centro de gravidade, enquanto que o vetor velocidade descreve a velocidade do centro de gravidade no ponto



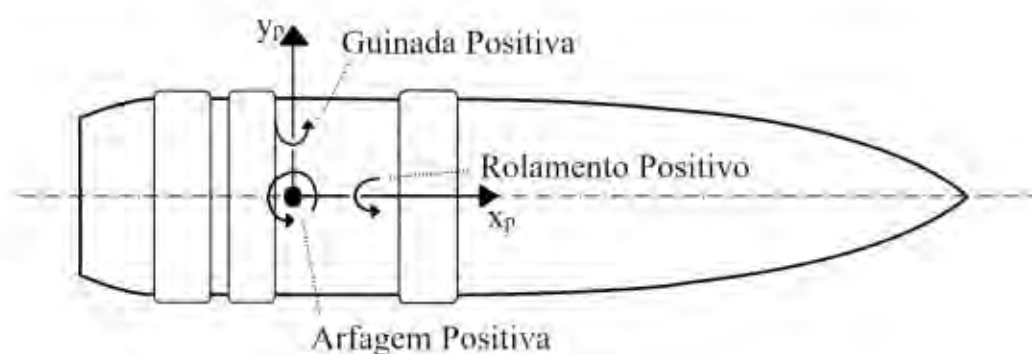


Figura 6 – Descrição do rolamento, guinada e arfagem.

em estudo. Já o vetor do eixo de simetria é um vetor unitário sempre paralelo ao eixo de simetria da munição, apontando para a região posterior do projétil [21].

### 2.1.1.2 Elementos de Trajetória

Para a descrição dos elementos da trajetória será considerada a trajetória ideal, para fins didáticos. Contudo, as definições e conceitos são tais que ainda são válidos tanto na trajetória corrigida quanto na trajetória real.

Inicialmente irá se definir 5 pontos de interesse (Origem, Vértice, o Ponto de Queda, Ponto de Incidência e Ponto de Arrebentamento), e suas posições estão descritas na Fig. 7. A definição da origem já foi realizada, pois se fazia necessária para a descrição do sistema cartesiano. O vértice será definido com o ponto de maior altura da trajetória [1], em que seu comprimento em relação à base da trajetória é denominada flecha [7].

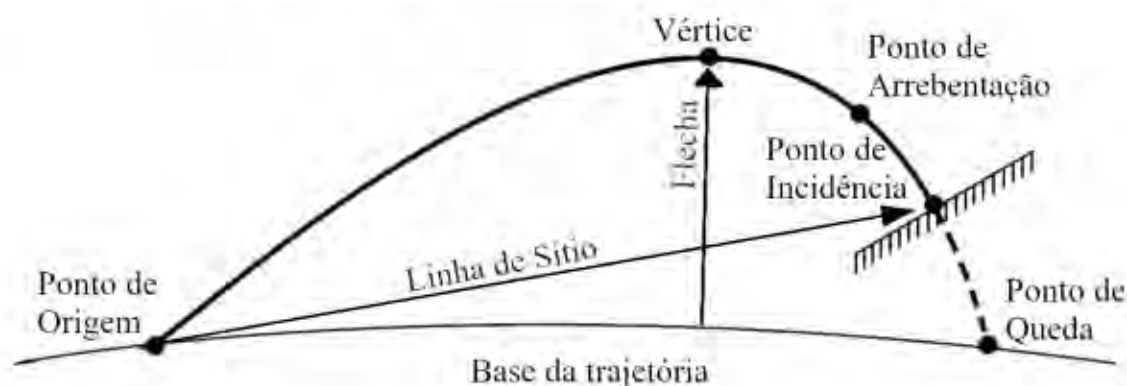


Figura 7 – Descrição de pontos de interesse na trajetória balística.

Em seguida, define-se que ponto de arrebentamento é a posição em que a munição é acionada, explodindo ou liberando sua carga e ponto de incidência é o ponto onde a munição atinge um ponto desejado (seja ele o solo ou obstáculo). Note que, por definição, o

ponto de incidência e de arrebitamento são excludentes, e que na Fig. 7 são representados juntos para fins didáticos.

Temos ainda o ponto de queda é o ponto da trajetória que intercepta a base da trajetória [1], e traz consigo o termo alcance, dado como a distância entre o ponto de origem e o ponto de interesse (ou sua projeção) na base da trajetória [7], como mostra a Fig. 8. Na figura, 0 representa o ponto de origem e que 1 e 2 representam a projeção do ponto de arrebitamento e de incidência na base da trajetória, respectivamente. Já 3 é o ponto de queda.



Figura 8 – Descrição de distâncias de interesse na trajetória balística.

A peculiaridade do ponto de arrebitamento acaba sendo necessário o conceito de altura de arrebitamento e distância de arrebitamento. Como mostra a Fig. 8, a altura de arrebitamento será a distância entre o ponto de arrebitamento e o base da trajetória. Já a distância de arrebitamento é uma variante do termo alcance, discutido anteriormente [1].

Existem duas referências estritamente ligadas aos pontos descritos, sendo elas a linha de sítio e linha de sítio de arrebitamento, como mostram as Fig. 7 e 8. Temos que linha de sítio é a reta que liga a origem ao ponto de incidência, enquanto que a linha de sítio de arrebitamento liga a origem com o ponto de arrebitamento [1].

Em seguida, podemos definir também mais 5 linhas de interesse: linha de queda, linha de incidência, linha de arrebitamento, linha de tiro e linha de projeção. Todas estão devidamente representadas na Fig. 9. As linhas de queda, incidência e arrebitamento serão definidas como o vetores unitários tangentes a trajetória no ponto de queda, incidência e arrebitamento, respectivamente [1] [7].

Na Fig. 9 os elementos 0, 1, 2 e 3 representam o pontos de origem, de arrebitamento, de incidência e de queda.

No ponto de origem surgem as linhas de tiro e de projeção. A linha de tiro será o vetor unitário paralelo ao eixo do tubo, enquanto que a linha de projeção é o vetor unitário

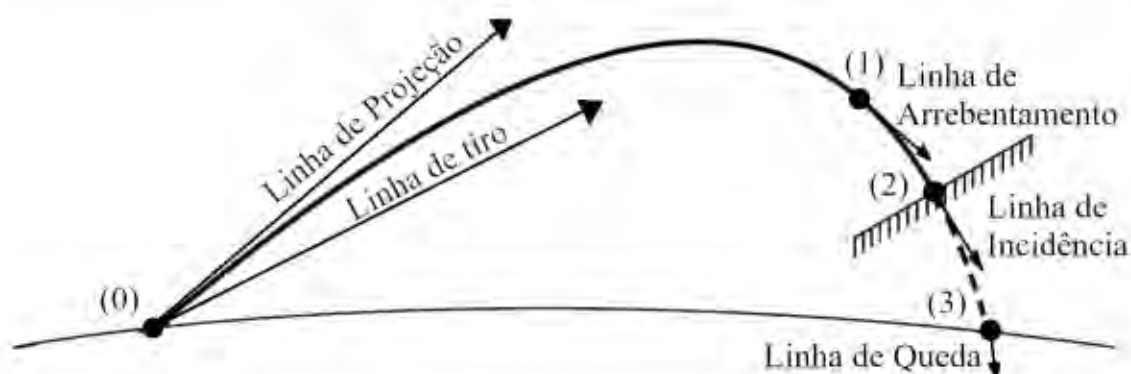


Figura 9 – Descrição de linhas de interesse na trajetória balística.

tangente da trajetória quando deixa a origem [1], que também pode ser denominado por eixo de boca [7]. As linhas de tiro e de projeção definem, cada uma, um plano vertical que as contém, sendo eles os planos de tiro e de projeção, respectivamente [1].

Continuando, na Fig. 10 estão representados ângulos de interesse no início da trajetória. Os primeiros ângulos a serem definidos são os ângulos de tiro e de projeção, ângulos verticais formados entre a linha de tiro e de projeção, respectivamente, com a linha de sítio. Já o ângulo de sítio é o ângulo formado pela linha de sítio com o plano horizontal [1] [7]. Note que para caso ocorra ponto de arrebentamento, os ângulos são em referência a linha de sítio de arrebentamento.

Ainda na Fig.10, 0 representa a base da trajetória, 1 e 2 as linhas de projeção e de tiro, respectivamente. 3 pode representar tanto a linha de sítio quanto a linha de sítio de arrebentamento, que neste caso leva o ângulo de sítio a se chamar de ângulo de sítio de arrebentamento [1].

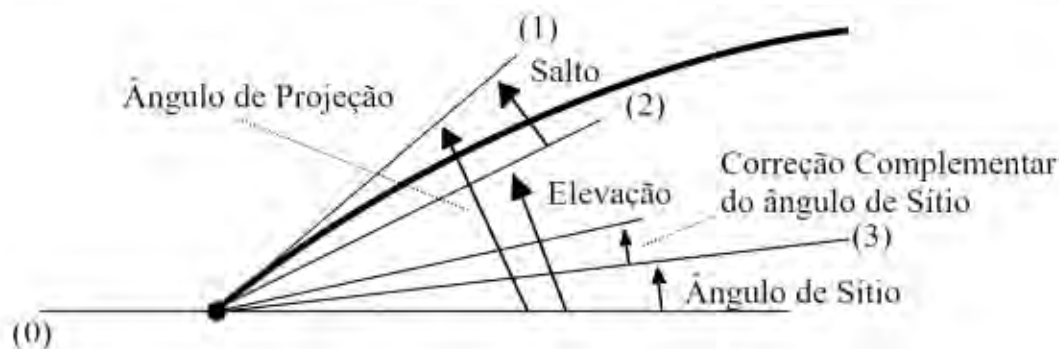


Figura 10 – Descrição de ângulos de interesse no início da trajetória.

Temos também que a elevação é dada pelo ângulo entre a linha de tiro e a base da trajetória. Ainda na origem existem mais dois conceitos importantes: a correção complementar de sítio e o ângulo de desvio inicial (ou salto). O primeiro é a correção

aplicada ao ângulo de Sítio para compensar a deformação da trajetória devido ao efeito gravitacional [1].

Enquanto isso, ângulo de desvio inicial é dado pela diferença entre a linha de projeção e de tiro. Sua definição é necessária pois tais linhas não são, necessariamente, paralelas. Possui duas componentes, o desvio lateral, que é o ângulo entre os planos de tiro e de projeção, e o desvio vertical, que é o ângulo vertical formado pelas linhas [1] [7].

Durante o voo, será definido que a inclinação da trajetória é o ângulo agudo entre a tangente da trajetória e o plano horizontal no local. Nos pontos de queda, incidência e arrebatamento, a tangente da trajetória será denominada como ângulos de queda, incidência e arrebatamento, respectivamente [1] [7], como mostra a Fig 11. Os pontos de arrebatamento, de incidência e de queda, a inclinação é dada como os ângulos de arrebatamento, de incidência e de queda, respectivamente.

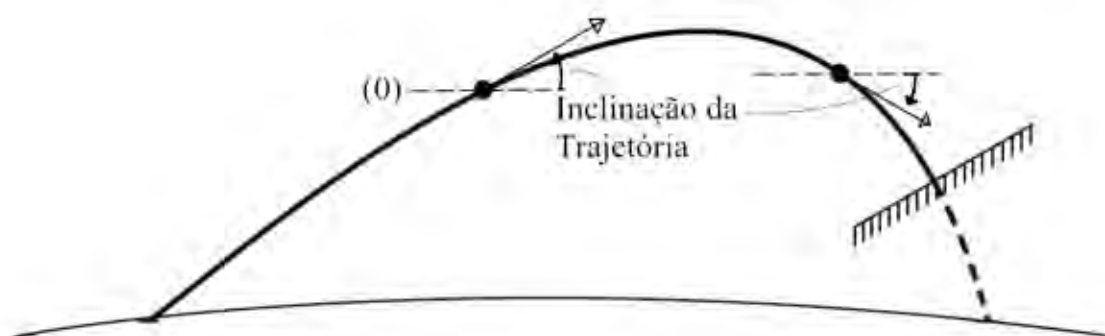


Figura 11 - Descrição da inclinação da trajetória em dois pontos quaisquer da trajetória.

Como comentado anteriormente, os efeitos sobre o voo da munição podem acabar gerando o que se conhece como desvio. Como mostra a Fig. 12, o desvio ocorre quando o ponto final da trajetória não ocorre no plano de tiro. É descrito através de duas componentes, a derivação angular e a derivação linear. Na imagem, os termos 1 e 2 referem-se ao ponto de origem e o ponto final da trajetória, respectivamente.

A derivação angular é o ângulo formado pelo plano vertical que contém a origem e o ponto final com o plano de tiro, e a derivação linear como a distância entre o ponto final e o plano de tiro [1].

Por fim, temos que a duração do trajeto é o tempo que a munição levou ao sair da origem até atingir o ponto final da trajetória [1].

## 2.1.2 Dispersão

Tome-se o cenário de uma peça realiza um barragem em regime de tiro sustentado durante um determinado período de tempo, e após o término dos disparos se observou a

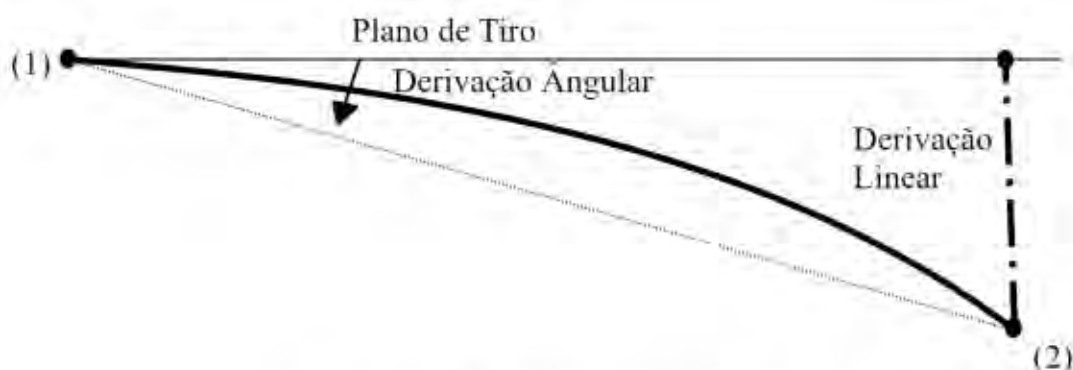


Figura 12 – Descrição do desvio.

distribuição de impactos como mostra a Fig. 13. Na imagem, a posição média de impacto pertence a intersecção da linha E com o plano de tiro. A partir da linha E, determinou-se a distância em que as linhas D e F contém entre si 50% dos impactos. A distância entre D e E e E e F dá-se o nome de desvio provável em alcance  $DPA$ [1].

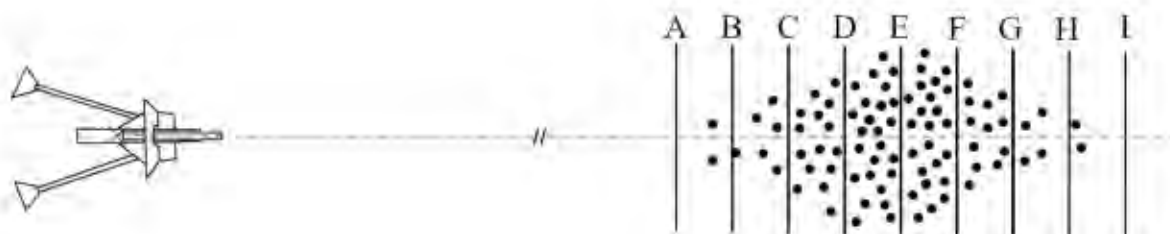


Figura 13 – Distribuição dos impactos de uma bala hipotética.

Traçadas mais 3 retas antes e depois de D e F, equidistantes  $DPA$  entre si, cerca de 99.3% dos disparos estarão contidos entre as retas das extremidades. Essa distribuição dos impactos sobre a superfície ocorre devido à natureza estocástica dos disparos, e não é fruto de erros por parte do Artilheiro [1]. A este fenómeno dá-se o nome de dispersão.

Temos ainda que o valor do  $DPA$  varia com o alcance, e seus valores aproximados encontram-se nas tabelas de tiro, obtido de forma experimental com munição preparada para este fim. Contudo, uma primeira aproximação igual a 1 metro por cada 200 metros de alcance [1].

Na Art Camp um termo de interesse é o garfo, que é a variação na elevação em que se desloca o ponto médio de impacto a uma distância igual a  $4DPA$  na sentido do tiro. Além disso, existem outros tipos de desvios prováveis, sendo eles: em direção, circular, vertical e altura de arrebitamento [1].



## 2.2 Modelagem Balística

A Balística é a ciência que trata do movimento dos projéteis e os fatores envolvidos no processo. Tem sido tema principal ou secundário de diversos estudos matemáticos os físicos, que serviram para modelar ou interpretar os efeitos no projétil durante o voo. Contudo, ainda possui uma rigorosa relação entre *design* e teste, visto que os fenômenos em questão apresentam uma grande quantidade de variáveis envolvidas, a natureza estocástica de tais elementos e até mesmo falta de compreensão completa de certos processos envolvidos [15].

O conhecimento relativo à balística é dividido em três categorias: Balística Interna, Balística Externa e Balística Terminal. A Balística Interna lida com a fase de propulsão da munição e suas relações com o armamento até a sua liberação. Em seguida, a Balística externa lida com a trajetória de voo, entre a liberação até o momento que antecede o final da trajetória. Por fim, A Balística Terminal lida com o efeito da munição sobre o alvo, para efeitos como penetração ou fragmentação [1] [15]. Há ainda uma quarta categoria, a Balística Intermediária, que lida com os momentos iniciais da trajetória do projétil [15]. Para fins deste trabalho, seus processos serão tratados dentro da Balística Interna ou desconsiderados, visto a complexidade de sua medição no Teatro de Operações e que seus efeitos recaem sobre a natureza estocástica.

A princípio, o desenvolvimento de tabelas de tiro aparenta concentrar-se sobre a balística externa. Contudo, existem fatores condicionantes característicos destes grupos que afetam não só as condições iniciais de voo, como sobre o efeito desejado no alvo, e que portanto devem ser considerados pela Tabela de Tiro para amparar as decisões do Artilheiro.

### 2.2.1 Balística Interna

Como já comentado, a balística interna estuda os processos ligados a propulsão da munição pelo armamento [1] [15]. Neste trabalho, será considerado apenas os casos que tal propulsão ocorre por expansão de gases de um propelente dentro de um tubo. Existem outras formas de se acelerar um projétil, como canhões eletromagnéticos, que ainda não atingiram maturidade comercial [22], mas não são aplicadas em nenhuma peça atual da Artilharia de Campanha no Brasil.

No que diz respeito às Tabelas de Tiro, a balística interna fornece como resultado as condições iniciais de voo do projétil, sendo eles: o vetor posição, o vetor velocidade e o vetor de velocidade angular. Contudo, existem diversos fatores que afetam seus valores e que causam divergência entre o valor calculado e o real [15]. Para a construção da Tabela de Tiro são considerados apenas aqueles que podem ser controlados e/ou mensurados.

Os primeiros fatores estão ligados à carga de projeção. A Artilharia de Campanha

possui acesso a peças que permitem o uso de diferentes cargas de projeção, ou seja, pode-se controlar a quantidade de propelente utilizado em um disparo e assim oferecem ao Artilheiro diferentes faixas de alcances [15] [1]. Devido a grande variação na velocidade de boca entre as cargas, deve-se desenvolver tabelas para cada carga.

Outro fator ligado à carga de projeção a ser considerado é a temperatura do propelente. Sua importância se dá por alterar a condição da reação de combustão do propelente, afetando assim a velocidade de boca [15]. Por não configurar uma alteração drástica da velocidade de boca, como é o caso na mudança de carga de projeção, requer apenas uma tabela para a sua correção [1].

Deve-se considerar também fatores ligados ao tubo e ao movimento do projétil pelo mesmo, como erosões e deformações resultantes do uso do armamento a velocidade angular aplicada ao projétil, respectivamente. Há também o efeito da cadência de tiro. Cada disparo fornece ao tubo uma quantidade de energia térmica, que é distribuída e dissipada, causando variações dimensionais [1].

Por fim, ainda resta avaliar a condição na qual a munição deixa o tubo. Para a elaboração da tabela de tiro, o eixo de simetria do projétil, o vetor velocidade e o vetor velocidade angular serão paralelos e tangentes à linha de tiro [7].

## 2.2.2 Balística Terminal

A balística terminal lida com os instantes finais da trajetória, e portanto possui estreita relação com o efeito desejado sobre o inimigo. Para a Art Camp os efeitos mais desejados no tiro indireto são a detonação, fragmentação e liberação de carga [15]. No desenvolvimento das tabelas de tiro, a balística terminal fornece os requisitos mínimos que as trajetórias devem possuir para garantir a eficácia da munição, principalmente quanto ao acionamento adequado da espoleta.

Para espoletas de impacto, deve-se garantir que no ponto de incidência o ângulo do vetor posição da munição com a normal do solo permita o acionamento. Ângulos elevados podem permitir impactos em que a espoleta não é acionada, debilitando ou impossibilitando a munição de entregar o resultado esperado pelo Artilheiro [1].

Além disso, o efeito desejado pode requisitar que a espoleta seja acionada a uma dada distância e altura do alvo. Nesses casos, a Art Camp costuma utilizar de espoletas de tempo. Com isso, a tabela de tiro não apenas irá possuir uma tabela para auxiliar o artilheiro a configurar a espoleta, como também fornecer a capacidade de se estimar o ponto de arrebentamento. Novamente, também deve garantir que as características necessárias para a eficácia do efeito sejam atingidas [1].

### 2.2.3 Balística Externa

Como comentado anteriormente, a balística externa trata do estudo da trajetória do projétil. Devido ao elevado potencial bélico, ao longo da história houve fomento de estudos e pesquisas nesta área, que culminaram no desenvolvimento de diversos modelos de voo. Neste trabalho irá se trabalhar com projetis estabilizados por rotação, característicos da Art Camp. Portanto, seguindo o padrão OTAN [7] [21] será utilizado o modelo de massa-ponto modificado.

Neste modelo, as equações de movimento elaboradas consideram a simplificação da geometria e da massa do projétil em um ponto, representado pelo centro de gravidade (CG), como mostra a Fig. 14. Contudo, tal aproximação considera que o ponto possui um conjunto propriedades, que irão complementar a descrição do projétil no modelo matemático [15] [21].

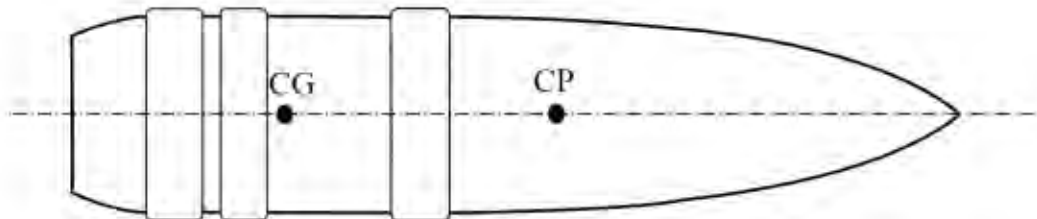


Figura 14 – Geometria e elementos de interesse do projétil.

As propriedades relativas aos esforços aerodinâmicos serão discutidas oportunamente junto com a discussão de cada elemento que constitui a força resultante. Contudo, o modelo possui propriedades gerais, que são características ou do ambiente ou do projétil e que necessitam ser abordados previamente.

Inicialmente, o projétil possui uma massa  $m$ , que no contexto da Art Camp é fixa durante a trajetória, e o diâmetro característico  $d$ . Em seguida, define-se o vetor do eixo de simetria  $\vec{\chi}$  do projétil, posicionado sobre o CG, na direção do eixo de simetria e o sentido apontando para a posição posterior do projétil, como pode ser observado na Fig. 14. O projétil também irá possuir momento de Inércia  $I_{\chi}$  na direção de  $\vec{\chi}$ .

#### 2.2.3.1 Equações de Movimento

A Eq. 2.1 descreve a aceleração do CG em função de 4 forças, sendo elas: a força de arrastó ( $\vec{DF}$ ), a força de sustentação ( $\vec{LF}$ ), a força Magnus ( $\vec{MF}$ ) e a força peso ( $\vec{P}$ ). Além disso, também está representado a aceleração resultante do efeito de Coriolis  $\vec{\Lambda}$  [21].



$$\sum \vec{F} = m\vec{u} = \overline{D}\vec{F} + \overline{L}\vec{F} + \overline{M}\vec{F} + \vec{P} + m\vec{\Lambda} \quad (2.1)$$

Integrando em relação ao tempo a Eq. 2.1 pode-se obter a velocidade  $\vec{u}$  do projétil em um instante  $t$ , como mostra a Eq. 2.2. Consequentemente, ao se integrar  $\vec{u}$  em relação ao tempo, irá se obter o vetor posição  $\vec{X}$  do projétil como mostra a Eq. 2.3. Os valor inicial de  $\vec{u}$  é a velocidade de saída de boca  $\vec{u}_0$ , na direção e sentido da linha de tiro, e o valor inicial da posição é a origem, ou seja, nulo.

$$\vec{u} = \vec{u}_0 + \int_0^t \frac{d\vec{u}}{dt} dt \quad (2.2)$$

$$\vec{X} = \int_0^t \vec{u} dt \quad (2.3)$$

Sabe-se que os esforços aerodinâmicos atuam sobre o centro de pressão CP e que possuem estreita relação com a velocidade relativa do projétil pelo fluido. Definindo que a velocidade do vento no referencial da origem é  $\vec{W}$ , a velocidade relativa do projétil no vento  $\vec{v}$  é dada pela Eq. 2.4. O ângulo formado entre  $\vec{v}$  e  $\vec{X}$  é denominado ângulo de ataque  $\alpha$ , que pode ser obtido pela Eq. 2.5 [15].

$$\vec{v} = \vec{u} - \vec{W} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\vec{v} \cdot \vec{X}}{v}\right) \quad (2.5)$$

Além disso, os esforços produzem momentos sobre o CG e induzindo o projétil a capotar. Tal situação não é desejada, pois não apenas induz a um arrasto maior pelo ar, como também prejudica o efeito desejado sobre o alvo. Dessa forma, o tubo irá possuir ranhuras que induzem uma rotação sobre o projétil, e assim utiliza-se do princípio da conservação de momento angular para manter o projétil numa posição mais adequada.

Portanto, a componente da velocidade angular  $\omega_\chi$  tem condição inicial dada pela Eq. 2.6, onde  $l_c$  é o passo de raiamento do tubo na saída e  $u_0$  o módulo da velocidade de boca. Contudo, os esforços continuam a atuar sobre a munição, de tal forma que não apenas continuam a alterar a direção de  $\vec{\chi}$  como também o vetor  $\omega_\chi$ .

$$\omega_{\chi(t)} = \frac{2\pi u_0}{l_c d} \quad (2.6)$$

Dessa forma, considerando a densidade local do ar  $\rho$ , pode-se então definir que a velocidade angular  $\omega_\chi$  em um instante  $t$  é descrita pelas Eq. 2.7 e 2.8. Nas equações,  $C_{s\text{-}pin}$  é o coeficiente de amortecimento de rotação.

$$\dot{\omega}_\chi = \frac{\pi \rho d^4 \omega_\chi C_{spin}}{8I_\chi} \quad (2.7)$$

$$\omega_\chi = \omega_{\chi 0} + \int_0^t \dot{\omega}_\chi dt \quad (2.8)$$

Por fim, o modelo considera que os esforços sobre o projétil convergem para uma posição relativamente estável do projétil durante o voo. Essa posição é basicamente definida pela guinada de sustentação  $\vec{\alpha}_R$ , que é um efeito secundário criado pela da gravidade atuando sobre o projétil em rotação. O ângulo de equilíbrio é definido pela Eq. 2.9, com o seu módulo em função do ângulo de ataque, como mostra a Eq. 2.10 [15].

$$\vec{\alpha}_R = \vec{v} \times (\vec{\chi} \times \vec{v}) \quad (2.9)$$

$$\alpha_R = \text{sen}(\alpha) \quad (2.10)$$

O modelo descreve o ângulo de equilíbrio durante o voo através da Eq. 2.11, onde  $C_{M\alpha}$  é o coeficiente do momento de capotamento e  $C_{M\alpha^2}$  o coeficiente cúbico do momento de capotamento. Por definição,  $\vec{\alpha}_R$  é nulo no início da trajetória.

$$\vec{\alpha}_R = -\frac{8I_\chi \omega_\chi (\vec{v} \times \vec{u})}{\pi \rho d^3 (C_{M\alpha} + C_{M\alpha^2} \alpha_R^2) v^4} \quad (2.11)$$

### 2.2.3.2 Gravidade

A aceleração da gravidade atuando sobre o corpo é dado pela Eq. 2.12, onde o termo  $g_0$ , módulo da gravidade de referência, é dado pela Eq. 2.13 com  $lat$  sendo o ângulo da latitude da origem da trajetória. Já  $\vec{r}$  é a posição do CM do projétil em relação ao referencial do CM terrestre, é dado pela Eq. 2.14. Enquanto que  $R$  é o raio terrestre na posição da origem da trajetória ideal em relação ao CM terrestre, de valor igual a 6356766 metros [21].

$$\vec{g} = -g_0 \left( \frac{R^2}{r^3} \right) \cdot \vec{r} \quad (2.12)$$

$$g_0 = 9.80665[1 - 0.0026(2 \cdot lat)] \quad (2.13)$$

$$\vec{r} = \vec{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

### 2.2.3.3 Efeito Coriolis

A aceleração  $\vec{\lambda}$  devido ao efeito de Coriolis é definida pela Eq. 2.15, onde o vetor de rotação terrestre  $\vec{\Omega}$  é dado pela Eq. 2.16 de módulo  $\Omega$  igual a  $7.29211510^{-5} rad/s$ . Nas equações,  $AZ$  é o azimute, que é o ângulo de deriva que a peça faz com o norte geográfico [21].

$$\vec{\lambda} = -2(\vec{\Omega} \times \vec{u}) \quad (2.15)$$

$$\vec{\Omega} = \begin{bmatrix} \Omega \cos(lat) \cos(AZ) \\ \Omega \cos(lat) \sin(AZ) \\ \Omega \sin(lat) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

### 2.2.3.4 Forças de Arrasto e Sustentação

O projétil utilizado pela Art Camp costuma ser simétrico em relação a qualquer plano de secção que contenha o eixo de simetria. Portanto, impondo uma condição de simetria na da distribuição da pressão sobre a superfície do projétil em relação ao plano formado por  $\vec{\chi}$  e  $\vec{v}$ , temos que as forças aerodinâmicas originadas não irão produzir componentes normais ao plano, visto que uma componente produzida em um dado ponto da superfície será anulada pela sua contraparte simétrica.

Dessa forma, a aceleração produzida pertence ao plano descrito. Para a simplificação, tal aceleração é decomposta com o intuito de se simplificar a aplicação nas equações de movimento. Contudo, a bibliografia [21] [15] apresenta duas possibilidades: ou em relação a  $\vec{\chi}$  ou em relação a  $\vec{v}$ . A maior diferença ocorre quanto aos coeficientes aerodinâmicos, que possuem valores distintos.

Neste trabalho irá se optar pela decomposição em relação a  $\vec{v}$ , visto que é a opção tomada pelo padrão da OTAN. A componente na direção de  $v$  é dada pela Eq. 2.17, e receberá o nome de força de arrasto  $\vec{DF}$  [21]. Na equação,  $i$  é o fator de forma,  $C_{D0}$  é o coeficiente constante do arrasto,  $C_{D\alpha^2}$  é o coeficiente quadrático do arrasto,  $C_{D\alpha^4}$  é o coeficiente quártico do arrasto e  $Q_D$  é o fator de ajuste da guinada.

$$\vec{DF} = -\left(\frac{\pi \rho i d^2 v}{8}\right) \left[ C_{D0} + C_{D\alpha^2} (Q_D \alpha_R)^2 + C_{D\alpha^4} (Q_D \alpha_R)^4 \right] \cdot \vec{v} \quad (2.17)$$

Na direção ortogonal a  $\vec{v}$  temos a força de sustentação  $\vec{LF}$ , dado pela Eq. 2.18. Na equação,  $C_{L\alpha}$  é o coeficiente linear de sustentação,  $C_{L\alpha^3}$  é o coeficiente cúbico de sustentação,  $C_{L\alpha^5}$  é o coeficiente quártico de sustentação e  $f_L$  é o fator de sustentação.

$$\vec{LF} = \left(\frac{\pi f_L \rho d^2 v^2}{8}\right) \left[ C_{L\alpha} + C_{L\alpha^3} \alpha_R^2 + C_{L\alpha^5} \alpha_R^4 \right] \cdot \vec{\alpha_R} \quad (2.18)$$

Obviamente, a condição de simetria na da distribuição da pressão sobre a superfície do projétil não é possível garantir devido a estabilização ser ocasionada pela rotação do projétil. A rotação induz diferentes velocidades tangenciais no fluido em contato com a superfície, alterando a distribuição da pressão. Contudo, pode-se complementar as forças de arrasto e sustentação através da força Magnus [15].

### 2.2.3.5 Força Magnus

Como já comentado, para evitar que o projétil capote durante o voo os projetis estudados neste trabalho são estabilizados por rotação. Contudo, como mostra a Fig. 15, a velocidade do fluido tangente a superfície do projétil irá variar de acordo com a componente transversal da velocidade do vento em relação ao eixo de rotação. Essa diferença causa uma força aerodinâmica perpendicular a componente transversal do vento na direção e sentido do ponto onde o fluido possui o maior módulo de velocidade do fluido tangente a superfície do projétil [15].

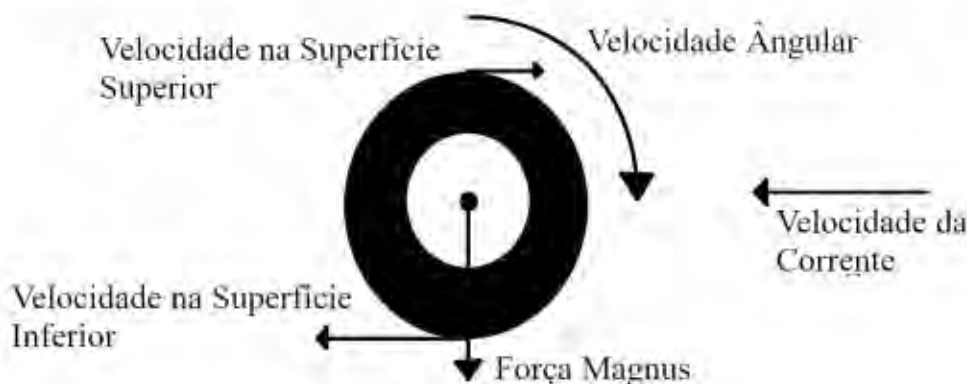


Figura 15 - Força Magnus

A Eq. 2.19 descreve a força Magnus  $\vec{MF}$  em função da Guinada de sustentação  $\vec{\alpha}_R$ , onde  $Q_M$  é o fator de correção da força Magnus e  $C_{mag}$  é o coeficiente aerodinâmico da força Magnus.

$$\vec{MF} = -\left(\frac{\pi \rho l^3 \omega_\chi Q_M C_{mag}}{8}\right) (\vec{\alpha}_R \times \vec{v}) \quad (2.19)$$

### 2.2.4 Atmosfera Padrão

A formulação dos esforços aerodinâmicos é estritamente ligada as propriedades da atmosfera na região do projétil. Contudo, as propriedades atmosféricas variam significativamente seja pela altitude, clima, região e outros fatores. Logo, para a concepção da trajetória ideal adota-se uma atmosfera padronizada, e através de um boletim meteorológico aplica-se as correções possíveis [1].

De acordo com a padronização adotada pela OTAN [9], os valores da densidade do ar  $\rho$  e temperatura  $T$  estão dispostos no Quadro 1, com valores em função da altitude e sem a presença de vento. Na tabela, os valores padrões são considerando constantes dentro das faixas definidas pela altitude. Nos manuais atuais da Art Camp trabalha-se até a linha de código 16 [1] [14].

Quadro 1 – Condições Padronizadas da Atmosfera

CÓDIGO	ZONA	VALORES PADRÕES	
	ALTITUDE	Temperatura (Kelvin)	Densidade (g/m <sup>3</sup> )
00	superfície	288.150	1225.0
01	0 - 200	287.500	1213.3
02	200 - 500	285.875	1184.4
03	500 - 1000	283.275	1139.2
04	1000 - 1500	280.025	1084.6
05	1500 - 2000	276.775	1032.0
06	2000 - 3000	271.900	956.86
07	3000 - 4000	265.400	863.23
08	4000 - 5000	258.900	776.77
09	5000 - 6000	252.400	697.11
10	6000 - 8000	242.650	589.50
11	8000 - 10000	229.650	466.35
12	10000 - 12000	218.275	363.39
13	12000 - 14000	216.650	265.48
14	14000 - 16000	216.650	193.67
15	16000 - 18000	216.650	141.29
16	18000 - 20000	216.650	103.07
17	20000 - 22000	217.650	74.874
18	22000 - 24000	219.650	54.280
19	24000 - 26000	221.650	39.466
20	26000 - 28000	223.536	28.777
21	28000 - 30000	225.518	21.042

Fonte: STANAG 4061 [9] - Traduzida pelo autor

Contudo, nos cenários simulados neste trabalho irão alterar as condições atmosféricas, visto o intuito de observar os efeitos no alcance e desvio do tiro. Para a temperatura, o valor da temperatura em cada camada é dado pela Eq. 2.20, onde  $T(F)$  é a temperatura no ponto de disparo,  $T(Y)$  é a temperatura no ponto de altitude  $Y$ . O expoente  $K$ , conhecido como fator de decaimento da temperatura pela altitude, é dado pela Eq.2.21, considerando a atmosfera padrão [16].

$$T(Y) = [T(F) + 459.67]e^{-KY} - 459.67 \quad (2.20)$$

$$K = 6.858 * 10^{-6} + 2.776 * 10^{-11}Y \quad (2.21)$$

Com a temperatura, é possível obter a velocidade do som local, dado pela Eq. 2.22. Por fim, a densidade local do ar  $\rho_c(Y)$  é dado pela Eq. 2.23, onde o fator de decaimento da densidade pela altitude  $H$  é dado pela Eq. 2.24, e  $\rho_0$  é a densidade do ar no local de disparo.

$$v_c = 49.19\sqrt{T(Y) + 459.67} \quad (2.22)$$

$$\rho_c = \rho_0 e^{-HY} \quad (2.23)$$

$$H = 2.926 * 10^{-5} + 1.0 * 10^{-10}Y \quad (2.24)$$

Note que a Eq. 2.20 até a Eq. 2.24, as unidades estão no Sistema Imperial, pois foram transcritas diretamente do livro texto [16]. No algoritmo empregado por este trabalho, com o intuito de manter a confiabilidade dos valores presentes nas equações, irá converter as entradas para imperial e as saídas no Sistema Internacional. Com relação a como é feita a correção em campo, o boletim meteorológico utiliza de 3 condições fictícias: vento balístico, densidade balística, temperatura balística. Tais condições fictícias são consideradas constantes para as correções, mas são elaboradas afim de se compensar as variações presentes na atmosfera [1] [9].

Além disso, os dados atmosféricos, além de afetarem diretamente as forças aerodinâmicas comentadas, também influenciam nos valores dos coeficientes aerodinâmicos. Neste trabalho, cada coeficiente aerodinâmico utilizado é dado em função do número de Mach  $M$ , dado pela Eq. 2.25. Na equação,  $v_c$  é a velocidade local do som, dado pela Eq. 2.22.

$$M = \frac{v}{v_c} \quad (2.25)$$

### 2.2.5 Análise Numérica

As equações que descrevem a trajetória do projétil formam um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, onde a taxa de variação das propriedades é dada pelo tempo e pelas próprias condições. Neste trabalho, as condições iniciais da trajetória serão definidas, de tal forma que a junto com o sistema de equações diferenciais se obtêm um problema de condição inicial.

Serão empregados métodos numéricos que irão discretizar o problema em uma solução aproximada dada por um conjunto de pontos da trajetória, em que cada ponto irá descrever a condição do projétil naquele ponto. Neste trabalho se empregará o método de Runge-Kutta de 4<sup>th</sup> Ordem.



### 2.2.5.1 Método Runge-Kutta 4ª Ordem

No método de Runge-Kutta de 4ª Ordem, temos que a diferença entre as propriedades de dois pontos consecutivos é dado pela Eq. 2.26, onde os coeficientes  $k$  são obtidos conforme as Eq. 2.27 a 2.30. Além disso,  $h$  é o passo de integração, e é inversamente proporcional ao número de pontos que a trajetória possui.

$$y_{n+1} - y_n = \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.26)$$

$$k_1 = f(x_n, y_n) \quad (2.27)$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{1}{2}hk_1\right) \quad (2.28)$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{1}{2}hk_2\right) \quad (2.29)$$

$$k_4 = f(x_n + h, y_n + hk_3) \quad (2.30)$$

### 2.2.5.2 Código de Geração de Trajetória

Como já comentado, o código base da geração das trajetórias irá partir através do trabalho realizado por Grangeiro [18] para o modelo de massa-ponto modificado. O programa em si é composto por 1 *script* para MATLAB, em que o primeiro trecho é composto pelos dados de entrada do problema. Os dados de entrada podem ser divididos em dados balísticos do projétil, condições iniciais de voo e condições atmosféricas. Em seguida, define-se quatro funções utilizadas para o cálculo numérico.

A primeira função de interesse descreve as equações de movimento para a formulação da trajetória, enquanto que a segunda aplica o método de Runge-Kutta utilizando a equação anterior para produzir a trajetória. A terceira modela as propriedades atmosféricas. Por fim, a última é responsável por exportar os dados para arquivos de texto.

A Fig. 16 mostra os relacionamentos e fluxo de informações no programa, formulada a partir da análise do código em questão, e ilustra a lógica de programação utilizada. Na figura, as setas com ponta preenchida representa a direção que o código atua, enquanto que as setas com ponta oca mostram as interações entre os dados e processos do código. Quando é apenas uma linha, é um fluxo de consulta de informações.

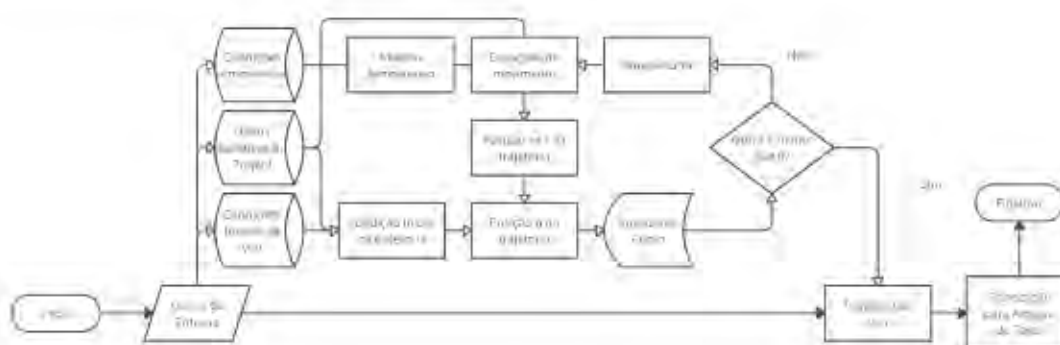


Figura 16 – Lógica de programação do código de geração de trajetória

## 2.3 Generalidades do Armamento

As tabelas são produzidas para um conjunto padronizado de peça, projétil e espoleta, que serve de base para os cálculos das trajetórias e correções. Vale ressaltar que é possível adotar outras configurações, principalmente de projétil e espoleta, mas que irão requerer correções. Tais correções estão previstas a serem realizadas pela tabela K, desde que os efeitos não sejam expressivos [7].

### 2.3.1 Peça e Cargas

A peça escolhida foi o Obusceiro 155 mm M1 AR, originalmente desenvolvido pelo Exército Americano e que teve batismo de fogo durante a Operação Tocha, em 8 de Novembro de 1942 no Norte da África. Também participou da Guerra da Coreia, e que em 1962 seria então renomeado para M114, mesma época em que foi adotado por outros grupos militares americanos. O Exército Brasileiro teve contato com tal equipamento desde a Segunda Guerra, empregados pela primeira vez em 16 de setembro de 1944 no sopé do Monte Bastione, na Toscana (Itália) [23].

Os dados técnicos do modelo utilizado nas simulações deste trabalho estão descritos no Quadro 2. A elevação mínima foi definida como paralela ao plano horizontal, o que leva a elevação máxima a ser de 1300 Milésimos [24]. A taxa de rotação e o ajuste fino de elevação foram tomadas para simplificar a forma de ajuste de operação da peça.

A simulação irá considerar a carga 7w, presente na Tabela de Tiro de referência [13], com um valor de velocidade de boca igual a 562.4 m/s. Outras cargas são disponibilizadas, mas como este trabalho busca apenas atuar na concepção da construção das tabelas não será preciso avaliar as outras. Tal carga foi escolhida por possuir o maior valor de velocidade de boca, e assim possuir o maior alcance, que será avaliado com o valor de 14600 metros, fornecido pela Tabela Verdadeira.

Adicionalmente, a geração da Tabela E necessita de dados experimentais para a sua



Quadro 2 – Dados da peça de artilharia utilizados.

Calibre	155 mm
Elevação Máxima	1300 Mil
Elevação Mínima	0 Mil
Taxa de Elevação por Rotação do Volante	34 Mil/Rot
Ajuste Fino do Ângulo de Elevação e Deriva	1 Mil
Passo de raiamento final	1:20
Carga	562,4 m/s

Fonte: Armas Nacionais [23] e Manual do operador e manutenção do M114 [24] - Traduzida pelo autor

elaboração. Para tanto, para os fins a que se destina esse trabalho, buscou-se na Tabela de Referência 5 valores de temperatura para se medir a variação da velocidade de boca, dados registrados no Quadro 3.

Quadro 3 – Medições hipotéticas da variação da Velocidade de boca pela temperatura do propelente para a carga 7w

Carga 1	
Temperatura de Medição	Variação da Velocidade de Boca
$^{\circ}\text{C}$	m/s
-40	-15.1
-17.8	-9.6
10	-2.7
37.8	4.1

Fonte: Tabela de Referência para a configuração utilizada [13] - Traduzida pelo autor

### 2.3.2 Granada e Espoleta

A granada utilizada foi a 155 M107 HE, cujas informações pertinentes às simulações estão descritas no Quadro 4. Tal granada é elaborada para a destruição de alvos ou para frear o avanço de tropas inimigas. Para tanto, ao detonar libera fragmentos metálicos e uma onda de choque, sendo altamente efetiva contra alvos estacionários, infantaria leve e alvos com baixo índice de blindagem.

Já o Quadro 5 traz os coeficientes aerodinâmicos utilizados na simulação, obtidos através do PRODAS [25]. Assim como Grangeiro, utilizou-se os coeficientes  $C_{Da^4}$ ,  $C_{La^6}$  nulos. Os fatores de forma  $\gamma$  da Eq. 2.17, de sustentação da Eq. 2.18 e de correção da força Magnus  $Q_M$  da Eq. 2.19 iguais a 1.

Por fim, a espoleta utilizada como referência é a M520, dotada de um temporizador mecânico operado por força centrífuga, além de um elemento que permite a detonação por

Quadro 4 – Dados da Granada 155 M107 HE

Diâmetro característico	155 mm
Massa (com a espoleta)	43,09 Kg
Momento de Inércia	0.142453 Kg.m <sup>2</sup>
Momento de Inércia Transversal	1.22553 Kg.m <sup>2</sup>

Fonte: PRODAS V3 [25] - Traduzida pelo autor

Quadro 5 – Coeficientes Aerodinâmicos da Granada 155 M107 HE

Mach	$C_{D0}$	$C_{D\alpha^2}$	$C_{L\alpha}$	$C_{L\alpha^3}$	$C_{mag}$	$C_{spin}$	$C_{M\alpha}$	$C_{M\alpha^3}$
0,600	0,139	4,040	1,540	7,640	-0,770	-5,200	3,200	-4,000
0,700	0,134	4,290	1,550	7,390	-0,770	-5,200	3,300	-4,000
0,750	0,132	4,410	1,550	7,270	-0,770	-5,200	3,350	-4,000
0,800	0,132	4,540	1,550	7,140	-0,770	-5,200	3,400	-4,000
0,850	0,138	4,880	1,630	6,890	-0,810	-6,300	3,500	-4,000
0,875	0,147	5,070	1,680	6,760	-0,830	-6,900	3,600	-4,000
0,900	0,157	5,250	1,720	6,630	-0,860	-7,500	3,750	-4,000
0,925	0,187	5,500	1,760	6,450	-0,970	-8,700	3,900	-4,000
0,950	0,215	5,760	1,810	6,270	-1,080	-9,900	4,200	-4,000
0,975	0,285	6,020	1,780	6,050	-1,040	-11,800	4,200	-4,000
1,000	0,335	6,280	1,770	5,830	-0,990	-13,800	4,000	-4,000
1,025	0,363	6,590	1,810	5,580	-0,950	-13,600	4,700	-4,000
1,050	0,383	6,860	1,820	5,340	-0,900	-13,400	3,600	-4,000
1,100	0,385	7,420	1,860	4,820	-0,860	-14,600	3,500	-4,000
1,200	0,375	7,960	1,900	4,320	-0,770	-15,800	3,450	-4,000
1,350	0,355	7,430	1,960	4,890	-0,770	-15,600	3,400	-4,000
1,500	0,340	6,910	2,030	5,460	-0,770	-15,300	3,350	-4,000
1,750	0,312	6,420	2,140	6,030	-0,770	-15,300	3,300	-4,000
2,000	0,285	5,990	2,260	6,560	-0,770	-15,300	3,200	-4,000
2,250	0,262	5,710	2,340	6,890	-0,770	-15,300	3,100	-4,000
2,500	0,247	5,430	2,400	7,220	-0,770	-15,300	3,000	-4,000
3,000	0,233	5,010	2,470	7,690	-0,770	-15,300	2,900	-4,000
3,500	0,220	4,850	2,530	7,900	-0,770	-15,300	2,800	-4,000

Fonte: PRODAS V3 [25]

impacto [26]. A faixa de programação da detonação é de 0.5 a 75 segundos. Tal espoleta foi escolhida pois a sua massa combinada com a da granada fornece a massa padrão de 4 quadrados de massa, configuração padrão da Tabela de referência [13].

## 2.4 Tabelas de Tiro

As tabelas de tiro servem de fonte de dados e informações que permitem ao Artilheiro realizar o cálculo necessário para obter a configuração que será imposta sobre o sistema de arma para se obter o efeito desejado.

### 2.4.1 Princípios

O princípio básico das tabelas se baseia na trajetória ideal, realizada sob 7 condições padrões, numeradas abaixo. Neste trabalho, os parâmetros da sexta condição ou serão escolhidos independentemente ou a partir de manuais, pois necessitam de testes reais para sua avaliação.

1. A atmosfera utilizada é a atmosfera padrão ICAO [20] conforme descrito no Quadro 1.
2. o planeta terra é uma esfera homogênea, sem rotação.
3. A gravidade atua sempre na vertical, e seu valor é dado conforme padrão ICAO, que para todos os efeitos é calculado com módulo de latitude igual a  $0^\circ$  de latitude.
4. A menos que seja descrito o contrário, a altitude de referência é 0.
5. As equações de movimento do projétil serão baseadas nas equações, fatores e outros parâmetros da STANAG 4355 [21], com os coeficientes aerodinâmicos variando conforme o número de Mach.
6. Os parâmetros de cálculos para as trajetórias serão determinados conforme os resultados de tiros reais realizados de acordo com a STANAG 4144 [10].
7. A velocidade de boca inicial é padronizada.

Para as condições ambientes que fogem das condições padrões utiliza-se dados do Boletim Meteorológico, a partir do padrão utilizado atualmente pela Art Camp [1] no Brasil. Além disso, os termos e definições utilizados para descrever a trajetória já foram definidos anteriormente, já traduzidos e localizados nos termos brasileiros. Contudo, as tabelas de tiro possuem termos característicos, que serão definidos e comentados oportunamente.

### 2.4.2 Conteúdo dos Tabelas

As Tabelas são divididas internamente em: Capa, Introdução, Tabelas do projétil de referência, Tabelas adicionais para projéteis específicos e Apêndices. Neste trabalho, irá se abordar e desenvolver até as tabelas do projétil de referência, pois as tabelas adicionais variam de acordo com o projétil que se trabalha, e devem ser obtidas de forma paralela ao estudo de aplicação ao armamento em questão.

Com relação aos apêndices, eles também não serão abordados, visto que as informações contidas neles são informações adicionais ao artilheiro ou ferramentas adicionais a serem usadas em campanha, como pranchetas de tiro, mapas e imagens para auxiliar a observação das trajetórias e termos relacionados.

### 2.4.2.1 Capa e Introdução

A capa é a parte inicial das Tabelas de Tiro possui informações resumidas, como a nomenclatura do armamento, lista de munições, a fonte de dados no qual a Tabela se baseia e um sumário resumindo o conteúdo da tabela brevemente. Também pode conter dados relativos a atualização dos dados da tabela de tiro [11].

A introdução possui um conjunto de dados iniciais úteis e/ou necessários ao uso das tabelas. Para a compreensão, as informações foram aqui divididas de forma a facilitar o entendimento. A primeira parte contém o sumário, tabela de símbolos e termos, resumo da função de cada tabela, exemplos de mensagens meteorológicas, tabela de funções trigonométricas e tabelas de conversão de valores.

A segunda parte possui os dados técnicos da peça de artilharia, munição e espoleta padronizadas utilizadas na confecção das tabelas, além dos armamentos e munições que podem fazer uso da tabela, dado as correções necessárias. Também inclui tabelas de projéteis de outras nações na qual o artilheiro pode fazer uso em operações em conjunto e o erro no qual está sujeito o uso a tabela [11] [7]. Também pode incluir informações adicionais de cada arma ou exército, de acordo com as estratégias.

A terceira parte é relativa ao tempo de vida da peça de artilharia padronizada, e serve de base para aplicar-se correções a velocidade de boca, ou até mesmo condenar o armamento (ou o processo de avaliação para tal). Contém duas tabelas, uma para calcular o nível de dano que um disparo causa à vida da arma, e a segunda para estipular, de acordo com o dano total causado à vida, calcular as correções na velocidade de boca [11].

A última parte é a tabela para escolha das cargas a serem utilizadas pelo armamento para se atingir um alcance próximo ao desejado. A tabela inclui também o erro provável que cada carga possui para dado alcance afim de fornecer meios para o artilheiro escolher qual carga é a adequada para cada situação [11] [7].

### 2.4.2.2 Tabela A, B, C e D

As tabelas A, B, C e D estão intimamente ligadas ao uso do boletim meteorológico e entre si, e portanto é interessante que sejam abordadas em conjunto.

A tabela A, exemplificada pela Fig. 17, é utilizada para se determinar qual linha balística da mensagem meteorológica será utilizada para realizar os cálculos. Contudo, só pode ser utilizada quando já se sabe a faixa de elevação que o tubo ficará [7]. Isso ocorre pois é caracterizada através de apenas duas colunas, sendo a primeira a elevação e a segunda a linha respectiva. O seu uso é ligado quando já se sabe a faixa que ocorrerá ou pode-se deduzi-lo de alguma forma.

A tabela B, cujo fragmento é mostrado na Fig. 18, é utilizada para se obter a correção do complementar do ângulo de sítio em função tanto da diferença de altura

**TABLE A**  
**LINE NUMBER**

FT 155-AM-2  
PROJ, HE, M107  
FUZE, PO, M557

CHARGE  
4G

LINE NUMBERS OF METEOROLOGICAL MESSAGE

QUADRANT ELEVATION MILS	LINE NUMBER
0.0- 146.3	0
146.4- 280.2	1
280.3- 421.8	2
421.9- 561.9	3
562.0- 686.1	4
686.2- 863.6	5
863.7- 1119.8	6
1119.9- 1300.0	7

Figura 17 – Exemplo de Tabela A. Fonte: FM 6-40[12]

entre a peça e o alvo, como também em função do alcance (distância) entre eles. Além disso, também é possível extrair qual a linha balística a ser utilizada nos cálculos, pois marginalmente a tabela encontra-se as linhas em questão dividindo as faixas de elevação e alcance em blocos. Ou seja, a tabela B pode ser usada no lugar da tabela A.

LINE NUMBER (LN)	RANGE (X)	DIFFERENCE IN ALTITUDE OF TARGET AND GUN IN METERS (AALT TGT - GUN)							
		-400	-300	-200	-100	0	100	200	300
	M								
	0					0			
	100					0			
	200					0			
	300					0	4	4	
	400					0	4	4	5
	500			-2		0	4	4	5
	600			-4	-1	0	5	6	5
	700		-8	-5	-2	0	5	7	6
	800		-8	-6	-3	0	5	9	9
	900	-14	-11	-7	-3	0	6	10	12
	1000	-16	-12	-8	-4	0	7	11	14
	1100	-16	-14	-9	-4	0	7	12	17
	1200	-20	-16	-10	-5	0	8	14	19
	1300	-22	-17	-11	-5	0	8	15	21
	1400	-24	-19	-12	-5	0	9	17	23
	1500	-26	-20	-12	-6	0	10	18	26
	1600	-28	-21	-14	-6	0	11	19	28
	1700	-30	-23	-15	-7	0	12	21	30
	1800	-32	-24	-16	-7	0	12	22	32
	1900	-34	-25	-17	-7	0	13	24	35
	2000	-36	-27	-17	-7	0	14	26	37
	2100	-38	-28	-18	-8	0	15	27	39
	2200	-39	-30	-19	-8	0	16	29	38
	2300	-41	-31	-20	-8	0	17	21	29
	2400	-43	-32	-21	-8	0	13	25	31
	2500	-45	-34	-21	-8	0	13	26	34
				00				01	

Figura 18 – Fragmento da Tabela B. Fonte: STANAG 4119 [7]

A tabela C é utilizada para se obter as componentes do vento em relação ao plano de tiro. No boletim meteorológico pode-se obter qual a direção do vento em relação a direção de referência. Com a direção do vento calcula-se a o vento de carta, que é o ângulo do vento em relação a direção e sentido no qual aponta a linha do tubo. Ou seja, sabe-se a direção do vento em relação à direção que o tubo aponta. Um fragmento está exemplificado na Fig. 19.



CHART DIRECTION OF WIND	CROSS WIND	RANGE WIND
MIL	KNOT	KNOT
0	0	H1.00
100	R.10	H.99
200	R.20	H.98
300	R.29	H.96
400	R.38	H.92
500	R.47	H.88

Figura 19 – Fragmento da Tabela C. Fonte: FM 6-40 [12]

Com a direção do vento de carta, calcula-se as componentes de vento em duas direções de interesse: Paralelo e perpendicular ao plano de tiro. No caso do vento em paralelo, a componente é chamada de vento de alcance; já que influência diretamente no alcance [7]. Dependendo do sentido pode ser denominado como vento de cauda, caracterizado como T, (no mesmo sentido que o projétil) ou vento de proa, caracterizado por H (sentido oposto ao do projétil) [27]. A caracterização é usada junto com os valores da componentes para indicar o sentido da componente.

Já a componente perpendicular é o vento cruzado [27], e é classificado como R se a origem do vento é à direita da arma ou L se a origem do vento é à esquerda. Vale ressaltar que as componentes da tabela são para o vento a 1 nó, e que para se obter os valores da correção deve-se multiplicar as componentes pelo módulo [7]. É composta por 3 colunas, sendo a primeira com a direção do vento de carta, a segunda a componente do vento cruzado e a terceira a componente do vento de alcance. Além disso, os valores

Por fim, a tabela D, mostrada na Fig. 20, é utilizada para realizar as correções nos valores de temperatura e densidade balística em função da altura entre o plano de referência no qual foi feito o Boletim Meteorológico e a peça. Os valores apresentam dois sinais para a correção, e a escolha depende se a peça está acima ou abaixo do plano. Caso a peça esteja acima do plano meteorológico, utiliza-se os valores à esquerda, caso esteja abaixo utiliza-se os valores à direita [7], de acordo com a padronização.

#### 2.4.2.3 Tabela E

A tabela E é a última etapa para o cálculo da variação da velocidade de boca, que é a variação causada devido a temperatura em que se encontra o propelente a ser usado no disparo. O cálculo da variação da velocidade de boca começa na introdução, que por meio da documentação do armamento pode-se calcular a variação devido ao uso da peça [7]. Um exemplo pode ser observado na Fig. 21.

Na tabela E, a entrada é a temperatura medida do propelente, na primeira coluna.

**TABLE D**  
**TEMPERATURE AND DENSITY CORRECTIONS**

CORRECTIONS TO TEMPERATURE (DT) AND DENSITY (DD), IN PERCENT, TO COMPENSATE FOR THE DIFFERENCE IN ALTITUDE, IN METERS, BETWEEN THE BATTERY AND THE MDP

DH	CORRECTIONS TO TEMPERATURE (DT) AND DENSITY (DD), IN PERCENT, TO COMPENSATE FOR THE DIFFERENCE IN ALTITUDE, IN METERS, BETWEEN THE BATTERY AND THE MDP										
	0	+10	+20	+30	+40	+50	+60	+70	+80	+90	
0	DT	0.0	0.0	0.0	-0.1+	-0.1+	-0.1+	-0.1+	-0.2+	-0.2+	-0.2+
	DD	0.0	-0.1+	-0.2+	-0.3+	-0.4+	-0.5+	-0.6+	-0.7+	-0.8+	-0.8+
+100	DT	-0.2+	-0.2+	-0.2+	-0.3+	-0.3+	-0.3+	-0.4+	-0.4+	-0.4+	-0.4+
	DD	-1.0+	-1.1+	-1.2+	-1.3+	-1.4+	-1.5+	-1.6+	-1.7+	-1.8+	-1.8+
+200	DT	-0.6+	-0.6+	-0.6+	-0.6+	-0.6+	-0.6+	-0.7+	-0.7+	-0.7+	-0.7+
	DD	-2.0+	-2.1+	-2.2+	-2.3+	-2.4+	-2.6+	-2.6+	-2.7+	-2.8+	-2.8+
+300	DT	-0.7+	-0.7+	-0.7+	-0.8+	-0.8+	-0.8+	-0.8+	-0.9+	-0.9+	-0.9+
	DD	-3.0+	-3.1+	-3.2+	-3.3+	-3.4+	-3.5+	-3.6+	-3.7+	-3.8+	-3.8+

Figura 20 – Fragmento da Tabela D. Fonte: FM 6-40 [12]

TEMPERATURE OF PROPELLANT DEGREES F	EFFECT ON VELOCITY M/S	TEMPERATURE OF PROPELLANT DEGREES C
-40	-6.4	-40.0
-30	-5.8	-34.4
-20	-4.8	-28.9
-10	-4.2	-23.3

Figura 21 – Fragmento da Tabela E. Fonte: FM 6-40 [12]

A saída é dada através da linha, na segunda coluna, com a variação da velocidade de boca. Caso caia valores intermediários, deve ser realizada a interpolação linear entre as linhas que a medição se encontra [11] [7].

#### 2.4.2.4 Tabela F

A tabela F em si é uma compilação de diversas colunas, em que cada coluna possui a capacidade de corrigir um diferente aspecto da trajetória, utilizando não apenas os dados obtidos através de A a E, como também correções devido à vida útil da peça. Para o projétil convencional alto explosivo, apresenta 19 colunas, divididas em duas partes. A primeira parte, exemplificada na Fig. 22, contém os dados principais da trajetória ideal, que serão corrigidos na segunda parte.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
RANGE	VELOCITY	FS FOR GRAZE BURST FUZE MSH	DPS PER 10 M DEC HOE	DR PER 10 MIL D ELEV	F O R K	TIME OF FLIGHT	AZIMUTH CORRECTIONS	
M	MIL			M	MIL	SEC	MIL	MIL
0	0.0			20	1	0.0	0.0	0.00
100	6.1			20	1	0.3	0.0	0.01
200	10.1			20	1	0.6	0.0	0.01
300	15.2			20	1	1.0	0.1	0.01
400	20.3			20	1	1.3	0.1	0.02
500	25.4			19	1	1.5	0.2	0.02
600	30.6	1.0	1.06	19	1	1.9	0.3	0.03

Figura 22 – Fragmento da primeira parte da Tabela F. Fontes: FM 6-40 [12]

A primeira coluna apresenta o alcance que se deseja, ou que foi calculado a partir da Tabela B, e é o valor que deseja-se atingir com o uso da tabela. A segunda coluna fornece ao artilheiro qual é a elevação que a peça deve possuir para atingir o alcance desejado na primeira coluna, dentro das condições padrões [7]. Ou seja, é o valor inicial da elevação.

A terceira coluna apresenta a configuração a ser utilizada para que a espoleta padrão detone ao projétil atingir o alcance da primeira coluna. A quarta apresenta a correção que deve ser aplicada à espoleta para que sua detonação ocorra 10 metros abaixo do ponto final, ou seja, após o ponto ser atravessado [7]. Caso deseja-se que seja acima, basta trocar o sinal.

A quinta coluna apresenta o efeito no alcance caso aumente a elevação do tiro em 1 Milésimo. Ou seja, o valor é absoluto, mesmo que o aumento da elevação provoque diminuição do alcance. Enquanto a sexta é a elevação que deve ser aplicada para aumentar o alcance num valor igual ao Garfo. A sétima coluna é o tempo que o projétil leva para concluir a trajetória [7].

Já a oitava e nona coluna apresentam as correções do desvio, garantido que o ponto final da trajetória ocorra dentro do plano de tiro inicialmente calculado. A oitava corrige o efeitos magnum, enquanto que a nona corrige os efeitos de vento cruzado. A nona corrige para o valor de vento cruzado igual a 1 nó, e deve ser ajustado com o valor encontrado da componente na Tabela C. A correção deve ser aplicada sob a deriva da peça [7].

A partir da décima coluna começa as correções devidos aos fatores mais significativos devido as condições não padrões, como pode ser observado na Fig. 23. As correções dos efeitos são feitas aos pares, devido as condições eliminam uma das colunas. Isso ocorre pois as correções nem sempre são simétricas como é o observado no caso das correções que basta apenas mudar o sinal [7].

T	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
R A N G E	RANGE CORRECTIONS FOR									
	MUZZLE VELOCITY 1 M/S		RANGE WIND 1 KNOT		AIR TEMP 1 PCT		AIR DENSITY 1 PCT		PROJ WT OF 1 SQ IN SQ STD)	
	DEC	INC	HEAD	TAIL	DEC	INC	DEC	INC	DEC	INC
	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
100	0.6	-0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1	1
200	1.3	-1.3	0.0	0.0	0.1	-0.1	0.0	0.0	-2	2
300	1.9	-1.7	0.1	0.0	0.2	-0.1	0.0	0.0	-3	3
400	2.5	-2.2	0.1	-0.1	0.3	-0.2	-0.1	0.1	-4	4

Figura 23 - Fragmento da segunda parte da Tabela F. Fonte: FM 6-40 [12]

O primeiro par é a décima e décima primeira coluna. Utiliza-se a décima caso ocorra decréscimo da velocidade de boca, enquanto que a décima primeira caso ocorra acréscimo. Ambas as correções são aplicadas a elevação e relativas à variação de 1 m/s. O valor da correção verdadeira é obtida multiplicando o valor da correção encontrado pela



tabela vezes o valor encontrado da variação da velocidade de boca [7].

Já o segundo par é a correção do vento de proa (12<sup>a</sup> coluna) ou de cauda (13<sup>a</sup> coluna). Em ambas, as correções foram feitas pensando no valor da componente igual a 1 nó, e requer multiplicação pelo valor da componente encontrado para que se obtenha o valor da correção real. A correção é então aplicada na elevação [7].

O terceiro par corrige a elevação considerando o decréscimo (14<sup>a</sup> coluna) ou acréscimo (15<sup>a</sup> coluna) da variação de um por cento na temperatura do ar em relação às condições ideais. O quarto par corrige a elevação para o decréscimo (16<sup>a</sup> coluna) ou acréscimo (17<sup>a</sup> coluna) para a variação de um por cento na densidade do ar [7].

Por fim, o último par corrige a elevação para o decréscimo (18<sup>a</sup> coluna) ou acréscimo (19<sup>a</sup> coluna) da massa em relação a massa padronizada. Essa diferença pode ocorrer devido a mudança de espoleta, por exemplo [7].

### 2.4.2.5 Tabela G

Fornece os dados relativos à estatísticas de tiro e dados da trajetória complementares ao que foi desenvolvido em F. Assim como a tabela F, a 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> coluna são iguais às da tabela F. Entre a terceira e sétima coluna estão dispostos os erros prováveis de diversos parâmetros da tabela. Um exemplo é observado no fragmento mostrad na Fig. 24.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R A N G E	E L E V	PROBABLE ERRORS					ANGLE OF FALL	COT ANGLE OF FALL	TML VEL	MG	COMP SITE FOR ANGLE OF SITE	
		R	D	FUZE MM4							+1 MIL SITE	-1 MIL SITE
				HB	TB	RB						
M	MIL	M	M	M	SEC	M	MIL	M/S	M	MIL	MIL	
0	0.0	4	0				0	316	0	0.000	0.000	
500	35.4	4	0				26	39.4	308	0	0.001	0.000
1000	51.7	5	1	1	0.06	16	53	19.1	301	13	0.002	-0.002
1500	78.9	7	1	2	0.07	19	83	12.3	296	30	0.005	-0.005
2000	107.0	8	1	2	0.07	21	113	9.0	290	54	0.010	-0.010

Figura 24 – Fragmento da Tabela G. Fonte: FM 6-40 [12]

A terceira coluna apresenta o erro provável em alcance no ponto de queda, sendo que a quarta é o erro provável relativo ao deflexão no ponto de queda. Na sequência, a quinta coluna apresenta o erro provável em relação a altura de detonação, enquanto que a sexta é o erro provável relativo ao tempo de detonação da espoleta. A sétima é o erro provável para o caso do alcance de detonação.

Já a oitava coluna apresenta o ângulo de queda, enquanto que a 9 a cotangente de queda. A décima coluna estima a velocidade residual do projétil no ponto de queda. A décima primeira fornece a altura da flecha realizada pela trajetória nas condições padronizadas e ao nível do mar.

A décima segunda e décima terceira coluna apresentam o valor que deve apresentar a correção complementar do ângulo de sítio para corrigir o efeito da falta de rigidez da

trajetória. A coluna 12 é para quando o alvo está acima da peça, e a 13 quando o alvo está abaixo da peça.

#### 2.4.2.6 Tabela H e I

As tabelas H e I são correções a serem realizadas devido ao efeito Coriolis. Ambas possuem a mesma estrutura, possuem duas entradas, a primeira é o alcance desejado, e a segunda é o ângulo horizontal que a linha de sítio faz com o Norte geográfico, conhecido como azimute do alvo. Nestas tabelas não ocorre interpolação para a escolha do azimute, que no caso ocorre com relação ao azimute mais próximo.

A tabela H, mostrada na Fig. 25 realiza as correções na elevação para corrigir os efeitos de alcance, enquanto que a Tabela I, exemplificada na 26 corrige a deriva para os efeitos que ocorrem de desvio. Contudo, uma diferença entre elas é que a tabela H é feita para a latitude 0, e suas correções para outras altitudes são obtidas através de fatores de multiplicação em uma tabela complementar, enquanto que existe tabelas I entre 0 e 70°, espaçadas 10° cada uma.

RANGE METERS	AZIMUTH OF TARGET - MILS								
	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
	3200	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600
500	0	0	-1+	-1+	-2+	-2+	-2+	-2+	-2+
1000	0	-1+	-2+	-2+	-3+	-4+	-4+	-4+	-4+
1500	0	-1+	-3+	-4+	-5+	-5+	-6+	-6+	-7+
2000	0	-2+	-3+	-5+	-6+	-7+	-8+	-8+	-8+
2500	0	-2+	-4+	-6+	-7+	-9+	-10+	-10+	-10+

Figura 25 - Fragmento da Tabela H. Fonte: FM 6-40 [12]

RANGE METERS	0 DEGREES LATITUDE								
	AZIMUTH OF TARGET - MILS								
	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
	6400	6000	5600	5200	4800	4400	4000	3600	3200
500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 26 - Fragmento da Tabela I. Fonte: FM 6-40 [12]

#### 2.4.2.7 Tabela J

A tabela J é responsável por aplicar correções na configuração da espoleta para compensar os efeitos já calculados. A entrada ocorre na primeira coluna, que é a configuração obtida na Tabela F. Em seguida, as correções são feitas aos pares, como ocorre entre as colunas 10 e 19 da Tabela F. As correções para um valor padronizado unitário, e para a correção real multiplica-se pelo valor encontrado da perturbação.

Na tabela, mostrada na Fig. 27, a variação de velocidade de boca é corrigida para caso ocorra decréscimo (Coluna 2) ou acréscimo (coluna 3) de 1 m/s. Para a variação real,

multiplica-se pelo valor real encontrado da velocidade de boca. Para o vento de alcance, a coluna 4 corrige caso seja um vento de proa, e a coluna 3 para vento de cauda, ambos de módulo igual a 1 nó.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
FS	FUZE CORRECTIONS FOR									
	MUZZLE VELOCITY 1 MS		RANGE WIND 1 KNOT		AIR TEMP 1 PCT		AIR DENSITY 1 PCT		PROJ WGT OF 1 SQ (4 SQ STD)	
	DEC	INC	HEAD	TAIL	DEC	INC	DEC	INC	DEC	INC
35	-.089	.077	-.016	.008	-.043	.017	.019	-.019	-.127	-.135

Figura 27 - Fragmento da Tabela J. Fonte: FM 6-40 [12]

As colunas 6 e 7 corrigem o decréscimo ou acréscimo de 1% na temperatura balística, respectivamente. O mesmo ocorre para as colunas 8 e 9, só que para a densidade balística. Além disso, as colunas 10 e 11 corrigem o acréscimo ou decréscimo da massa do projétil. Outras colunas podem aparecer, caso o projétil seja autopropulsado, por exemplo.

#### 2.4.2.8 Tabela K

Caso o disparo utilize uma espoleta diferente da padronizada, as tabelas K fazem a correção de configurações e correções, afim de se obter o mesmo efeito que a padronizada. Um fragmento pode ser observado na Fig. 28.

CORRECTIONS TO FUZE SETTING OF FUZE, MTSQ, M564 FOR  
FUZE, MTSQ, M630A1

FUZE SETTING		CORRECTIONS
FUZE M564		
FROM	TO	
2.5	2.2	0.2
2.2	2.9	0.3
2.0	2.7	0.4

Figura 28 - Fragmento da Tabela K. Fonte: FM 6-40 [12]

#### 2.4.2.9 Aplicação das tabelas de Tiro

Além de compreender o que cada tabela contém de informação, se faz necessário também a sua aplicação pelo Artilheiro no planejamento do tiro. Para tanto, o método será descrito de forma simplificada a partir do que se pode compreender dos exemplos propostos da tabela de referência [13]. Os dados expostos são apenas ilustrativos, e não fazem parte de nenhuma configuração de Artilharia em particular.

O primeiro passo é compreender o posicionamento do inimigo em relação a sua posição e seu Azimute de referência. No caso, tomemos que se deseja atingir um inimigo a 11000 metros, na mesma altitude que a sua peça e que o ângulo que o azimute do inimigo da sua posição com o norte é de 1600 milésimos (45<sup>º</sup> no sentido horário). Consultando a

tabela B, observa-se que a célula de alcance de 11000 metros e sem diferença de altitude fornece como saída a linha 3 do boletim meteorológico.

Com posse dessa informação, extrai-se os dados do boletim, dado pelo Quadro 6. Sem entrar em detalhe sobre o formato do boletim, procura-se a linha com inicial 03 (7ª linha - 032419 926084). Do bloco a esquerda da linha obtém-se que o vento balístico possui direção de 2400 milésimos em relação ao norte com intensidade de 19 nós. Do segundo bloco, têm-se que a temperatura balística é 92.6% da temperatura de referência e que a densidade é 8.4% maior do que a de referência, ambas em relação aos valores absolutos.

Quadro 6 – Boletim Meteorológico de Exemplo

METB31	344983
121450	037013
002109	945071
012215	937079
022318	933082
032419	926084
042620	941075
052822	949065
063123	960051

Fonte: Tabela de Referência [13]

Com posse da direção do vento, consulta-se a Tabela C para obter as componentes do vento. Note que o vento faz, em relação a direção geral de tiro, um ângulo de 800 milésimos (2400-1600). Consultando a tabela C na STANAG 4119 [7], as componentes são iguais a 0.71 a direita para o vento cruzado e 0.71 de vento de cauda (Note que a deriva de acordo com a Técnica do tiro de Artilharia de Campanha [1] [14] a deriva ocorre no sentido horário). Ambos possuem módulo de 13 nós de intensidade.

Caso a peça não esteja no mesmo plano que o posto de medição meteorológica, a diferença na altura serve de entrada para a Tabela D, que irá fornecer as devidas correções a serem aplicadas na temperatura e densidade balística. Para este exemplo, tome que a medição foi feita no mesmo plano horizontal, não sendo necessário correção adicional.

O último valor antes do cálculo das correções é obtido a partir da Tabela E, que será assumido uma variação de 2 m/s a menos na velocidade de boca. Na tabela F utilizada para ilustração, tomaremos que a elevação não corrigida é de 400 milésimos. Como houve perda de velocidade de boca, consulta-se a 10ª coluna, cujo valor na linha em questão é de 20.2 metros. A correção então é dada pelo produto, resultando em 40.4 metros (lembre-se que a coluna é para o caso de 1 m/s).

Repetindo o processo, o vento de cauda é corrigido na 13ª coluna, dito aqui que o valor é de -10.4 metros, e assim o valor para este caso resulta em -135.2 metros. Para o vento balístico foi observado um decréscimo de 7.4 pontos percentuais, se o valor da

célula da 14<sup>a</sup> coluna for de 6, teremos um valor de 41.4 metros. Por fim, digamos que o valor presente na 17<sup>a</sup> coluna, para a correção do aumento de densidade do ar, seja de 35.6 metros, então a última correção de alcance é de 300 metros.

O próximo passo é somar todos esses valores, que resultam em um valor final para o alcance de 249.6 metros. Para o que se destina neste trabalho, a correção na elevação será feita a partir do valor na 5<sup>a</sup> coluna, cujo valor arbitrário será de 50 metros. Dessa forma, temos que a correção na elevação é igual a razão do valor da soma pelo valor da 5<sup>a</sup> coluna, resultando em +5 milésimos na elevação. Somando com a elevação da linha, têm-se a elevação do tiro.

Para a Deriva, consulta-se a coluna 9, que corrige o vento cruzado. Na coluna, o valor proposto aqui é de 0.5 milésimos. Multiplicando pelo módulo do vento cruzado, temos uma correção na deriva de 6.5 milésimos. Como o vento está para a direita, o valor é negativo, pois o ajuste ocorrerá na direção anti-horária (esquerda) para compensar o vento. Somando-se o valor presente na 8<sup>a</sup>, já no sinal correto, mais o Azimute do alvo, têm-se a deriva do tiro.

Podem existir outros valores a serem corrigidos, provenientes da Tabela B ou devido ao desgaste do tubo. Tais correções não serão abordadas, mas são realizadas de forma semelhante ao que foi mostrado.



## 3 METODOLOGIA

O processo para a geração de Tabelas deste trabalho será compartimentado em processos menores, permitindo não apenas a melhor compreensão do procedimento, mas como também para permitir correções e funcionalidades de interesse. Para tanto, a técnica aqui proposta possui como núcleo a geração computacional de trajetórias para o cálculo das correções de voo. Tais correções, ao serem aplicadas as trajetórias de referência, irão fornecer de forma simples e rápida ao Artilheiro no Teatro de Operações os ângulos de elevação e de deriva para atingir o objetivo da missão.

### 3.1 Geração de Trajetórias

A Fig. 29 mostra, através de um fluxograma, a lógica do algoritmo para a geração de Trajetórias Balísticas. Originalmente desenvolvido por Grangeiro [18], o algoritmo recebeu modificações a fim de atender algumas necessidades específicas no procedimento de geração de Tabelas de Tiro. Para compreensão do Fluxograma, as linhas tracejadas marcam o fluxo de informação entre os blocos, enquanto a linha cheia marca o sentido das etapas.

O primeiro bloco já traz uma mudança significativa em relação à sua versão original, recebendo como entrada fatores de voo adicionais, como condições atmosféricas e condição de parada. Tal entradas são armazenadas em um banco de dados disponível para consulta ao longo do código. Dessa forma, pode-se inserir diferentes configurações de tiro, além das condições inicialmente utilizadas por Grangeiro [18].

Em seguida, o algoritmo passa para o segundo bloco, onde, a partir dos dados de entrada, calcula o estado inicial da trajetória. Como já discutido anteriormente, a posição inicial encontra-se na origem do sistema de referência. O eixo de simetria  $\chi$  inicialmente encontra-se com a sua componente na direção  $Y_0$  nula, enquanto na direção  $X_0$  e  $Z_0$  dado pelo cosseno e seno, respectivamente, do ângulo de elevação. A velocidade inicial é paralela ao vetor  $\chi$ , com módulo igual a velocidade de boca, enquanto a velocidade de rotação pode ser obtida através da Eq. 2.6. Por fim, tanto o Ângulo de Repouso como o instante inicial são nulos.

Neste ponto inicia-se o ciclo para o cálculo dos pontos da trajetória. A partir dos dados comentados no parágrafo anterior, computa-se os esforços aerodinâmicos, bem como a mudança devido ao amortecimento da rotação e mudança no Ângulo de Repouso. Para tanto, o quarto bloco acessa o bloco adicional 4.5, responsável por determinar o número de Mach de acordo com a camada atmosférica que o projétil encontra-se e a sua velocidade relativa ao ar. Neste caso, a formulação atmosférica utilizada por Grangeiro foi substituída

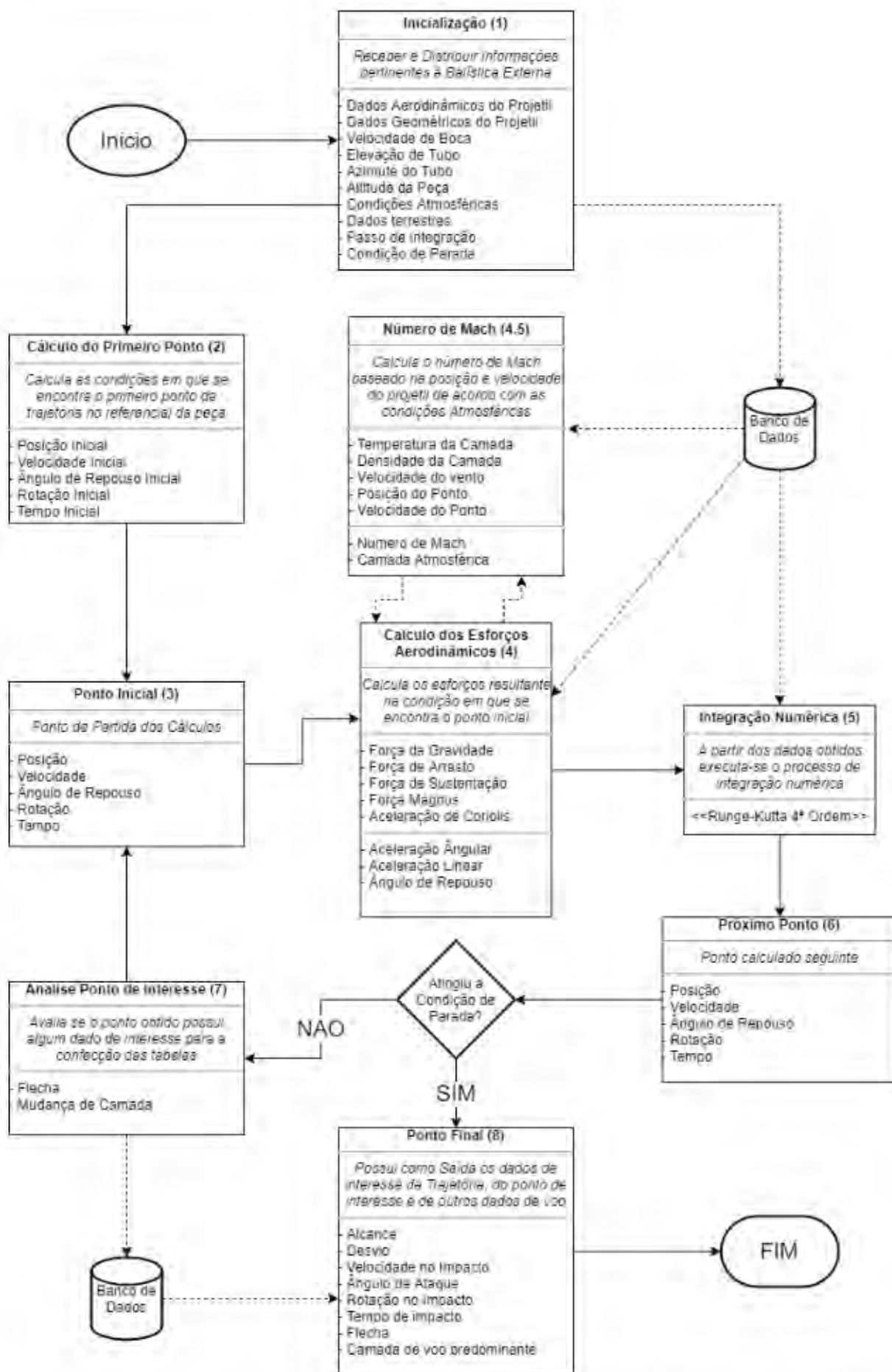


Figura 29 – Diagrama do algoritmo utilizado para geração das trajetórias balísticas



pela formulação em camadas do Quadro 1.

Com os dados obtidos, inicia-se a etapa de integração, que utilizou o método de Runge-Kutta de 4<sup>ª</sup> Ordem. Vale ressaltar que método de integração escolhido, combinado com a relação entre os esforços com a sua posição e velocidade, os blocos 4, 4.5 e 5 estão intimamente interligados no código. Conseqüentemente, obtêm-se o estado do ponto seguinte, que então é avaliado se atinge a condição de parada do ciclo.

Se não atingir, o novo ponto é analisado para incremento do contador de camada e para verificação da altura para o cálculo da Flecha da trajetória. Em seguida, o ciclo repete-se até atingir a condição de parada. Quando tal situação ocorrer, o programa entra no seu último bloco, cuja função é retornar uma série de dados de interesse da trajetória. Diferentemente do que é feito por Grangeiro, essa forma de saída torna simples o armazenamento e estudo das trajetórias nas outras etapas para a geração de Tabelas.

## 3.2 Geração de Tabelas

Como já discutido, as tabelas compilam um conjunto de dados que, a partir de uma trajetória de referência, irão corrigir cada uma das perturbações sistematicamente, resultando ao final uma elevação e deriva utilizadas no disparo inicial. Tais valores buscam atender as necessidades do Artilheiro, ou no mínimo oferecer um resultado próximo que necessite de apenas um ajuste fino no Teatro de Operações.

Devido a extensão do trabalho necessário para se criar todas as tabelas algumas tabelas não serão geradas neste trabalho, de tal forma a analisar mais profundamente no método das demais. Elas são: Tabela B, Tabela H, Tabela I, Tabela J e Tabela K. Inclusive, a tabela de maior interesse é a Tabela F, de importância central pois contém em si 19 colunas, das quais podem servir para correção de perturbações ou de base para o cálculo do tiro de artilharia.

Portanto, a primeira etapa do processo é obter um conjunto de trajetórias de referência, uma prévia da Tabela F, que servirá também para consulta durante as confecções das outras tabelas. De acordo com o relatório de pesquisa balístico para a geração de Tabelas de Tiro [17], é ideal uma faixa de 100 metros entre as alcances da Tabela F. Logo, o algoritmo buscará as trajetórias de referência espaçadas entre 100 metros de alcance entre si.

Para tanto, a Fig. 30 mostra, através de um fluxograma, a obtenção do conjunto em questão. O primeiro bloco é responsável por inicializar os dados referentes a munição, peça e espoleta, que são repassados através dos nomes dos arquivos nos quais estão armazenados. Dessa forma, os dados são carregados quando necessários nas etapas seguintes, de forma a evitar contaminação de informações.

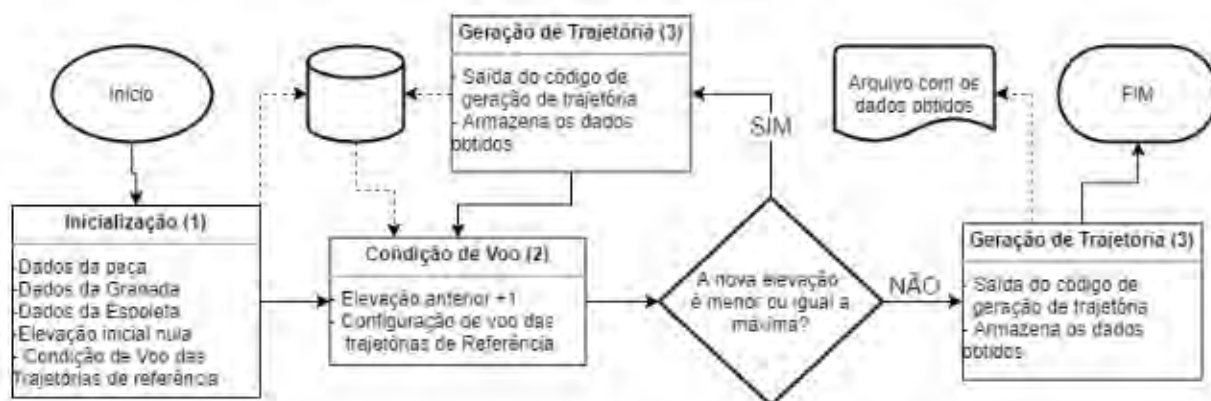


Figura 30 – Diagrama do algoritmo utilizado para geração das trajetórias de referência para as tabelas de Tiro

O arquivo da munição contém os dados presentes nos Quadros 4 e 5. Já o arquivo da Espoleta contém a faixa de programação do temporizador. O arquivo da peça contém aos dados presentes nos Quadros 2 e 3. Vale ressaltar que as tabelas geradas são para cada carga individualmente, pois cada uma irá gerar situações distintas de voo.

Em seguida, o programa inicia o cálculo das trajetórias de referência, partindo da elevação inicial de 1 milésimo até a elevação máxima da peça, com incremento gradativo de 1 milésimo, até que ele ultrapasse o primeiro alcance desejado de 100 metros. Quando isso ocorre, ele decresce a elevação em 1 milésimo, diminui o passo de incremento para 0.01 milésimo e repete o ciclo até ultrapassar novamente o alcance desejado.

Quadro 7 – Condições de voo consideradas para a trajetórias de referência

Condição	Símbolo	Valor	Unidade
Módulo da Gravidade de Referência	$g_0$	9,80665	$m/s$
Velocidade Angular Terrestre	$\Omega$	7,29E-05	$rad/s$
Raio de Referência Terrestre	R	6356766	$m$
Condições Atmosféricas	-	Quadro 1	-
Velocidade do vento	$\vec{W}$	$\vec{0}$	$m/s$
Efeito Coriolis?	-	Não	-
Latitude	Lat	0	$Gráus$
Passo de Tempo	h	0.01	$segundos$

Ao ultrapassar pela segunda vez o alcance desejado, o programa então salva a trajetória obtida, incrementa o alcance desejado em 100 metros e reajusta o incremento de elevação para 1 milésimo e reinicia o ciclo. Além disso, quando o alcance passa a diminuir com o incremento da elevação, o alcance desejado passa a decrescer em 100 metros, e o código passa a verificar se o alcance obtido é menor que o desejado.

Caso a nova elevação seja maior que a máxima o algoritmo salva as curvas obtidas e fornece como saída um arquivo com todas as trajetórias de referência com uma faixa de 100 metros de diferença entre as linhas. Têm-se como saída a posição final, a velocidade

final, a rotação, o ângulo de repouso, a flecha e o tempo de voo para cada trajetória de referência

### 3.2.1 Tabela A

De acordo com o relatório de pesquisa balístico para a geração de Tabelas de Tiro [17], a linha meteorológica é dada pela flecha da trajetória. Para compreender, note que no Quadro 1, cada faixa possui uma altura mínima e máxima, e a média entre as duas. Portanto, a linha meteorológica é composta pelas trajetórias que estão acima da média da faixa em questão, bem como as menores que a média da faixa superior.

Para compreender melhor, considere a faixa 1 da atmosfera padrão, com altura mínima igual a 0 e altura máxima igual a 200 metros. trajetórias com flechas menores que 100 metros devem ser corrigidas considerando a linha 00 do boletim meteorológico. Contudo, as trajetórias que tenham flecha maiores que 100 metros, mas menor que 350 metros da faixa superior, então deve-se considerar a linha 01 do boletim.

Para tanto, o algoritmo de geração de trajetórias irá fornecer como saída a flecha. Portanto, após a geração das trajetórias de referência, o algoritmo percorre a lista separando as faixas de elevação para cada linha do boletim meteorológico, baseado na regra definida pelo relatório de pesquisa balístico [17]. Nos pontos de transição, o algoritmo aplica o mesmo procedimento para a geração de trajetórias de referência, mas neste o algoritmo procura a elevação de transição.

### 3.2.2 Tabela C e D

A tabela C visa fornecer as componentes unitárias que a velocidade do vento possui. Para tanto, considera-se que a componente vertical é sempre nula, e que as outras componentes são dadas por seno e cosseno que o vento faz com a velocidade do projétil. Dessa forma, constitui-se apenas de uma tabela de senos e cossenos, e necessita apenas ser virtualizada. Assim como a Tabela D.

A tabela D trabalha de forma complementar ao boletim meteorológico para a obtenção da diferença, em pontos percentuais, da diferença de temperatura e densidade do ar que podem ocorrer no Teatro de Operações. O boletim em si calcula tais fatores a partir da altitude onde se encontra a estação meteorológica, mas isso acarreta diferenças quando a peça se encontra a uma altitude diferente. Já a tabela corrige a diferença de altitude entre o posto meteorológico e a peça de artilharia.

Já a tabela corrige a diferença de altitude entre o posto meteorológico e a peça de artilharia, mas os cálculos não dependem da peça, munição ou carga, devido a se tratar apenas de correções atmosféricas. Portanto, pode-se virtualizar a tabela D, sem a necessidade de contas. Tais valores podem ser encontrados na Fig. 20.

### 3.2.3 Tabela E

A tabela E necessita de dados experimentais para ser elaborada, mas a metodologia de elaboração pode ser discorrida neste trabalho para os fins no qual se destina. A tabela em si determina a variação que ocorre na velocidade de boca da carga para diferentes temperaturas. Dessa forma, é preciso determina-se a faixa climática que a peça será utilizada e tomando-se um conjunto de pontos de algumas temperaturas e observar a mudança na velocidade inicial do projétil. Neste trabalho considerou-se que tais medições, presentes no Quadro 3, foram consideradas para a interpolação. Quanto ao método, utilizou-se interpolação cúbica, entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $37.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com intervalos de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Devido a simplicidade desse método, considerando ainda que a fonte dos dados foi a própria tabela de referência, os resultados não serão discutidos. Contudo, a metodologia aqui exposta pode ser aplicada em uma experimentação real, ai neste caso a comparação poderia ser feita para determinar a precisão do método.

### 3.2.4 Tabela F

A elaboração da Tabela é constituída de um conjunto de diferentes algoritmos para as colunas que possui. O programa de geração de Trajetórias já possui como saída os valores da 1<sup>a</sup> (alcance), da 2<sup>a</sup> (elevação) e da 7<sup>a</sup> (tempo de voo) colunas. A 3<sup>a</sup> coluna é dada pelo tempo que deve ser aplicado a espoleta para que ela exploda antes do impacto, no valor configurável mais próximo, mas menor, da 7<sup>a</sup> coluna. No caso da espoleta utilizada, ela possui um valor mínimo para o *timer* de 0.5 segundos, logo valores de tempo menor que 0.5 segundos deixaram a célula da tabela em branco, assim como as que possuem valores superiores a 75 segundos.

A 4<sup>a</sup> coluna é obtida a partir como saída do algoritmo de geração de trajetórias. No algoritmo em questão, assim que o cálculo da trajetória atinge 10 metros de altura no ramo descendente. Assim, o valor da 4<sup>a</sup> coluna é o valor a ser retirado da 3<sup>a</sup> coluna para se obter o ponto de impacto a 10 metros de altura. Para flechas menores que 10 metros, pode-se deixar a célula em branco, visto que é provável que também possua um tempo de voo menor que o mínimo da espoleta.

Para a 5<sup>a</sup> coluna, temos a variação, em metros, que ocorre no alcance caso aumente-se a elevação em 1 milésimo. A obtenção deste valor é feita ao recalcular a trajetória da linha, mas aumentando a elevação em 1 milésimo. Assim sendo, o valor da coluna então é dado pelo valor absoluto da diferença da trajetória calculada e pelo valor da 1<sup>a</sup> coluna. Note que, pela definição, busca-se saber apenas sobre o efeito na elevação.

Já a sexta coluna é relativa ao valor apresentado pelo garfo, que é um valor característico da dispersão natural que o tiro de artilharia apresenta. De acordo com o relatório de pesquisa balística [17], tal valor é obtido a partir dos erros prováveis, que por



sua vez são obtidos através de disparos reais.

Para a 8ª coluna, corrige-se a deriva do armamento em relação ao desvio observado na trajetória de referência, que não depende de Coriolis, vento ou qualquer outro fator. Logo, a correção pode ser computada com o uso da definição de milésimo, que é igual um ângulo cuja tangente é igual a 0.001, ou o ângulo que 1 metro faz em um raio de 1000 metros.

Por exemplo, supondo hipoteticamente um disparo cujo alcance é de 2000 metros com um desvio de 20 metros a esquerda do tubo (sinal positivo no referencial utilizado), resulta em uma correção de 0.01 milésimo para a direita (sinal positivo, pois a deriva do armamento aumenta para a direita).

Para a 9ª coluna, corrige-se a deriva causada pelo vento cruzado. Para tanto, gera-se novas trajetórias, com as mesmas condições das trajetórias de referência, com uma exceção: agora o vento possui componente em  $Y_0$  igual a 1 nó ( $\approx 0.514$  m/s). Com o valor obtido, repete-se o processo realizado para a 8ª coluna.

A 10ª e 11ª coluna apresentam a diferença sofrida pelo alcance devido a variação negativa ou positiva na velocidade de boca, respectivamente, de valor igual a 1 m/s. O valor é obtido pela diferença entre o alcance da 1ª coluna pelo alcance obtido ao se recalcular a trajetória com a variação na velocidade de boca igual a (em módulo) igual a 15 m/s. Divide-se o valor encontrado por 15, e então obtêm-se o fator da coluna em questão.

A 12ª coluna atua corrigindo o efeito do vento de proa, o que costuma diminuir o alcance, enquanto a 13ª atua para o caso de vento de cauda, que costuma aumentar o alcance. Aplica-se o mesmo algoritmo de correção anterior, mas no caso altera-se a componente  $X_0$  da velocidade de vento para 50 nós, tanto negativo (12ª coluna) quanto positivo (13ª coluna). Dessa vez, a diferença é dividida por 50, para se obter o valor sofrido no alcance para o valor de 1 nó.

Já a 14ª e 15ª coluna corrigem as variações, em 1 ponto percentual, que ocorre na temperatura do ar. Tal fator irá modificar a velocidade do som em cada camada, o que afeta nos valores dos coeficientes aerodinâmicos devido a variação da velocidade do som. Para tanto, altera-se a temperatura da condição de referência em 10%, na temperatura absoluta, para menos (14ª coluna) e para mais (15ª coluna).

A diferença em relação ao alcance de referência é então dividida por 10, fornecendo assim o valor da coluna. Tal variação só é possível devido a modelagem proporcionada pelas Equações 2.20 a 2.24. O mesmo método é aplicado nas colunas 16ª e 17ª, que são responsáveis pela variação da densidade em um ponto percentual.

Já para as duas últimas colunas, 18ª e 19ª, têm-se o caso para corrigir uma variação na massa do projétil, que pode ocorrer devido a mudança da espoleta utilizada. Na condição de referência, a massa do projétil é de 4 quadrados (equivalente a 43.09 Kg), e calcula-se a

variação causada por 1 quadrado a menos (18<sup>ª</sup> coluna) e a mais (19<sup>ª</sup> coluna).

Contudo, o valor do quadrado é uma categoria de peso do projétil. Por exemplo, enquanto 4 quadrados valem 43,09 Kg, 3 quadrados valem, aproximadamente, 42,64 Kg. Uma diferença de 450 gramas por quadrado. O valor de cada coluna é, novamente, a diferença sofrida pelo alcance devido a modificação.

A correção é feita de duas formas. A primeira é alterando o valor da massa do projétil nas equações. Contudo, repare que na modelagem das forças aerodinâmicas a massa não possui influência direta, como observado nas Equações 2.1, 2.17, 2.18 e 2.19. A influência ocorre na aceleração sofrida. Sendo assim é necessário realizar uma correção adicional. De acordo com a STANAG 4355 ela é dada pela Eq. 3.1.

$$\Delta u_0 = n_i u_0 \frac{(m - m_r)}{m_r} \quad (3.1)$$

Onde  $\Delta u_0$  é a variação na velocidade de boca,  $m_r$  é a massa do projétil em questão,  $m$  é a massa do projétil de referência e  $n_i$  é o fator de correção proveniente de modelos de balística interna ou de tiros reais. Como não se possui um valor para  $n_i$ , este trabalho adotará a conservação de energia cinética, em que a energia cinética do projétil ao sair é igual em ambos os casos, cuja igualdade fornece a velocidade de boca corrigida.

### 3.2.5 Tabela G

A tabela G armazena dados estatísticos do tiro no ponto de impacto. A primeira e segunda coluna estão a elevação e o alcance, idêntico às duas primeiras colunas de F. Da terceira até a sétima coluna estão registrados dados de erros prováveis para alcance, desvio, altura de detonação e erro do tempo da espoleta, respectivamente. Para essas colunas o trabalho elaborado não irá abordá-las devido a origem ser proveniente de disparos reais, como propõe o relatório balístico [17].

Com relação a oitava coluna, temos o ângulo de queda. Por definição, ele é dado pela tangente da curva no ponto de impacto. Para tanto, dado o fato de que a velocidade é a tangente da posição no ponto, o ângulo de queda foi obtido arco-tangente da razão, em módulo, da componente  $Z_0$  pela componente  $X_0$ , em milésimos. Tal valor é o ângulo que a trajetória da granada faz com a horizontal.

Já a 9<sup>ª</sup> coluna é a cotangente, definida como o ângulo que a granada faz com a vertical, em graus. É obtida através do valor da coluna anterior, utilizando relações trigonométricas. Já a 10<sup>ª</sup> coluna é a velocidade no ponto de impacto, obtida como saída do próprio algoritmo de geração de trajetória, assim como a flecha, que é o valor presente na 11<sup>ª</sup> coluna.

Contudo, como a tabela B não será abordada neste trabalho, as duas últimas colunas não serão calculadas, já que corrigem as correções feitas pela Tabela B.

### 3.3 Implementação da Técnica do Tiro de Artilharia

A implementação das Tabelas calculadas através da metodologia proposta será por meio do cálculo da elevação e a deriva que o Obuseiro deve ser posicionado para que possa atingir um alvo pré-determinado. Será empregada a mesma lógica descrita na seção da aplicação das tabelas de tiro, contudo apenas utilizando as obtidas neste trabalho.

Para tanto, as entradas do algoritmo serão a carga, o azimute do alvo e a distância (alcance) do alvo, a diferença na altitude entre o plano do posto meteorológico e a peça, o boletim meteorológico, a temperatura do propelente e a categoria de massa do projétil. O algoritmo então carrega as tabelas de tiro respectivas, salvando no banco de dados para consulta.

Em seguida, varre-se a tabela F, em busca da elevação prevista para o alcance desejado. Com essa informação, consulta-se a Tabela A para obter qual a linha meteorológica. Com os dados da linha, calcula-se as componentes do vento cruzado e de cauda/proa através da Tabela C. Assim como também se obtém a correção necessária na tabela D.

Com a temperatura do propelente, a tabela E irá fornecer a variação na velocidade de boca. Assim sendo, inicia-se a fase do cálculo da variação no alcance, como já exemplificado.

O algoritmo analisa qual coluna deve acessar na linha da Tabela F já encontrada. Com o dado da célula, o algoritmo multiplica pela variação observada, calculando assim a variação no alcance para cada perturbação. Por fim, soma-se os valores encontrados, que então é dividido pelo valor da 5ª coluna (ajustado para caso ocorra aumento ou perda de alcance com o aumento da elevação), somando o resultado a elevação da linha.

Para a deriva o processo é semelhante, consultando a 8ª e 9ª colunas e calculando a deriva resultante. O código executa o procedimento para as duas elevações possíveis, desde que elas sejam possíveis. Quando não são, a saída respectiva é apenas uma matriz unitária de dimensão 1 nula para aquele caso.

Caso seja, o retorno é a elevação e deriva (em relação ao norte) que o tubo deve executar para atingir o alvo. Para análise do resultado, será tomado as tabelas a serem calculadas, bem como um alvo a 11000 metros de distância, no mesmo plano horizontal que a peça, com boletim meteorológico realizado a 160 metros abaixo do obuseiro, utilizando projétil de 4 quadrados de massa.

além disso, a carga encontra-se a 0 °C. O boletim meteorológico é descrito no Quadro 6, com a 10ª linha meteorológica sendo '106222 923050'. Por fim, o alvo possui azimute de 1600 milésimos. Após o cálculo da elevação e deriva resultante, tais valores



serão arredondados para o múltiplo inteiro mais próximo.

Assim, utilizando o código de geração de trajetórias com todas as perturbações presentes simultaneamente, será observada a precisão fornecida pela tabela para o primeiro disparo de artilharia. O procedimento do cálculo de tiro também será aplicado aos valores da Tabela de referência, também executando o código de geração de trajetória para o cálculo do ponto de impacto.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção irá se discutir os resultados obtidos ao aplicar a metodologia proposta para o conjunto peça-granada-espoleta-carga descrito ao longo deste trabalho. Recapitulando, utilizou-se o Obuseiro 155 mm M114, a granada 155 M107 HE, a espoleta M520 e a carga 7w, de valor de boca igual a 562.4 m/s.

A discussão irá iniciar pela Tabela F, devido a sua importância e diversidade de fatores que busca corrigir. Em seguida, irá se discutir a Tabela A, E e G. Como já discutido, as tabelas B, H, I, J e K não serão abordados neste trabalho.

### 4.1 Tabela F

Para a tabela F, foram calculadas 206 linhas com 19 colunas cada, totalizando 3914 fatores de correção calculados. Para manter a análise de resultados sucinta, mas com variedade suficiente para perspectiva ampla a tabela foi subdividida em 3 quadros, de acordo com a divisão das colunas. Além disso, será avaliada as trajetórias ímpares e múltiplas de 1000, tanto no trecho crescente de alcance quanto no decrescente. Incluiu-se também as colunas referentes a elevação máxima. Como discutido não se inclui a Coluna 6.

Quanto a divisão, a primeira parte, dada pelos Quadros 8, 9 e 10, contém da 1<sup>a</sup> até a 9<sup>a</sup> coluna. Como já discutido, cada uma das colunas possui uma função, sendo elas: alcance (1<sup>a</sup>), elevação (2<sup>a</sup>), tempo espoleta (3<sup>a</sup>), ajuste do tempo da espoleta (4<sup>a</sup>), mudança no alcance para elevação de 1 milésimo (5<sup>a</sup>), tempo de voo (7<sup>a</sup>), ajuste na deriva (8<sup>a</sup>), ajuste na deriva devido a vento cruzado de 1 m/s (9<sup>a</sup>). Em todos os quadros a linha com asterisco representa a transição do trecho crescente para o decrescente em alcance. Para comparação, paralelo as colunas calculadas está os valores da tabela de referência [13].

Com relação as duas primeiras colunas, o trecho ascendente apresenta uma diferença pequena no valor obtido, com a maior diferença sendo de 3.8 milésimos para o alcance de 9000 metros. Contudo, a exceção mostra-se o alcance máximo, com a diferença sendo de 7.3 milésimos. Para o trecho descendente, a diferença continua a próxima de 7 milésimos, mas divergindo ainda mais conforme aumenta-se a elevação. A maior diferença ocorreu para a última elevação com 28 milésimos de diferença.

Em porcentagem a perspectiva é diferente. Em todos os casos estudados, a maior diferença percentual (em módulo) encontrada foi de 2.24%. Entretanto, é uma perspectiva enganosa. Antes de tecer comentários mais profundos, observemos a 5<sup>a</sup> coluna. Para todas

Quadro 8 - Primeiro conjunto de colunas da Tabela F (colunas 1 a 4)

1ª Coluna	2ª coluna (mil)		3ª coluna (s)		4ª coluna (s)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000.00	16.72	16.70	1.86	0.00	0.93	0.00
3000.00	57.06	57.20	6.14	6.20	0.36	0.35
5000.00	110.01	111.30	11.37	11.60	0.19	0.19
7000.00	181.01	184.20	17.70	18.10	0.12	0.12
9000.00	271.49	275.30	24.85	25.20	0.08	0.08
11000.00	382.98	385.80	32.96	33.30	0.05	0.06
13000.00	528.82	530.00	42.92	43.30	0.04	0.05
14600.00	765.24	772.50	57.73	58.70	0.03	0.04
*	*	*	*	*	*	*
14600.00	838.00	831.00	61.89	62.10	0.03	0.04
13000.00	1056.00	1052.10	72.84	73.40	0.02	0.03
11000.00	1178.00	1167.60	-	78.60	-	0.03
9000.00	1269.00	1243.40	-	81.10	-	0.03
8700.00	1280.00	1252.00	-	81.70	-	0.03

Quadro 9 - Segundo conjunto de colunas da Tabela F (colunas 5 a 7)

1ª Coluna	5ª coluna (m)		7ª coluna (s)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000.00	56.46	56.00	1.86	1.90
3000.00	42.38	43.00	6.14	6.20
5000.00	30.90	32.00	11.37	11.50
7000.00	23.64	24.00	17.70	17.90
9000.00	18.42	20.00	24.85	25.00
11000.00	15.90	16.00	32.96	33.10
13000.00	9.88	11.00	42.92	42.90
14600.00	1.95	-	57.73	58.20
*	*	*	*	*
14600.00	2.79	-	61.89	61.50
13000.00	13.66	13.00	72.84	72.70
11000.00	19.28	22.00	77.76	77.50
9000.00	25.21	33.00	80.80	80.40
8700.00	26.17	36.00	81.14	80.80

as elevações, a diferença não ultrapassou a marca de 10 metros de diferença, flutuando ao dentro da faixa de 1 metro de diferença. Em relação ao alcance é uma diferença de menos 1%.

Considerando então que os valores da tabela de referência são absolutos, a diferença nas elevações multiplicadas pelo valor da 5ª coluna fala-se em uma diferença de  $\pm 100$  metros para as baixas elevações. Para as altas elevações a diferença é acima de 200 metros, chegando a 1000 metros de diferença para a última linha. Ou seja, há uma proximidade nos resultados, mas as diferenças ainda são significativas para cenários de combate que

Quadro 10 - Terceiro conjunto de colunas da Tabela F (colunas 8 a 9)

1ª Coluna	8ª coluna (mil)		9ª coluna (mil)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000.00	0.47	0.40	0.04	0.04
3000.00	1.58	1.70	0.14	0.14
5000.00	3.03	3.50	0.25	0.27
7000.00	4.88	5.90	0.38	0.39
9000.00	7.10	8.80	0.48	0.49
11000.00	9.96	12.40	0.57	0.57
13000.00	14.18	19.30	0.66	0.68
14600.00	23.29	28.40	0.79	-
*	*	*	*	*
14600.00	27.22	32.00	0.85	-
13000.00	45.26	53.40	1.10	1.12
11000.00	64.30	78.90	1.38	1.45
9000.00	94.91	131.40	1.79	2.12
8700.00	101.88	145.80	1.86	2.31

exijam alta precisão.

Uma diferença notável a ser comentada é que a 3ª e 4ª coluna foram feitas para espoletas de tempo diferentes da qual a tabela foi projetada. O modelo da tabela é para a espoleta de impacto M557 [26], enquanto as colunas em questão foram elaboradas para a espoleta M564. Em ambos os casos, a configuração possui uma categoria de peso diferente da referência de 4 quadros. Devido as diferenças não será comparado as duas colunas discutidas. Para a 7ª coluna não foi observado diferença significativa no tempo de voo entre o calculado e a referência.

Para as correções na deriva, observa-se na 8ª coluna um aumento maior na tabela de referência do que o calculado. Logo, a diferença passa de 0,1 milésimo para 5,1 milésimo no trecho ascendente, chegando a 43,9 milésimos na última linha. Ou seja, há um desvio lateral mais significativo do que o observado. Realizando o cálculo geométrico, isso representa uma diferença no desvio de 160 metros para a linha de 11000 metros decrescente e de 380 metros para a última linha. A 9ª coluna as resultados foram parecidos entre as tabelas. Nem mesmo na elevação máxima a diferença foi superior a 0,5 milésimos, o que mostra que a mecânica escolhida foi semelhante a empregada para a geração da referência.

A segunda parte está descrita nos Quadros 11 e 12, contendo da 10ª a 13ª colunas, além da 1ª coluna com os alcances para auxiliar na consulta. As colunas em questão tratam da diferença que trajetória de referência possui com a perturbação que cada coluna apresenta. As perturbações são: Decréscimo (10ª) e Acréscimo (11ª) de 1 m/s na velocidade de boca e vento de proa (12ª) e cauda (13ª) igual a 1 nó.

Comparando as quatro colunas em questão, é possível notar uma grande proximi-

Quadro 11 – Quarto conjunto de colunas da Tabela F (colunas 10 a 11)

1ª Coluna	10ª Coluna (m)		11ª Coluna (m)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000.0	3.42	3.5	-3.5	-3.3
3000.0	9.44	9.6	-9.33	-9.2
5000.0	14.04	14.4	-14.24	-13.9
7000.0	17.68	17.8	-17.69	-17.4
9000.0	20.08	19.9	-20.11	-19.7
11000.0	21.84	21.8	-22.04	-21.5
13000.0	23.79	23.9	-23.8	-23.4
14600.0	26.24	-	-26.39	-25.6
*	*	*	*	*
14600.0	26.41	-	-26.71	-26.1
13000.0	24.42	24.4	-24.68	-23.7
11000.0	20.94	20.6	-21.18	-19.8
9000.0	16.78	15.4	-16.89	-14.3
8700.0	1.86	14.4	16.1	-

Quadro 12 – Quinto conjunto de colunas da Tabela F (colunas 12 a 13)

1ª Coluna	12ª Coluna (m)		13ª Coluna (m)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000.0	0.06	0.1	-0.06	-0.1
3000.0	0.67	0.7	-0.68	-0.6
5000.0	1.91	2	-1.94	-1.9
7000.0	4.19	4.7	-4.32	-4.2
9000.0	7.64	8.8	-7.91	-7.5
11000.0	11.77	13.5	-12.25	-11.3
13000.0	16.48	18.8	-16.93	-15.3
14600.0	20.88	-	-20.93	-18.6
*	*	*	*	*
14600.0	21.34	-	-21.25	-20.3
13000.0	20.71	21.2	-20.14	-17.9
11000.0	19.16	19	-18.29	-12.4
9000.0	17.2	14.5	-14.31	-
8700.0	-16.18	13.3	16.81	-

dade dos resultados com a referência. Na 10ª e 12ª colunas, a diferença entre os valores é crescente com a elevação, mas não passa de 2 metros até as elevações no limiar superior do armamento. Supondo que o propelente estivesse a  $-40^{\circ}\text{C}$ , limite inferior da Tabela E, ter-se-ia uma perda na velocidade de boca de 4.5 m/s. Considerando a tabela de referência novamente como absoluta, a diferença causaria, no pior cenário, aproximadamente 8 metros de divergência. Logo, os resultados deste trecho são razoáveis.

Já com relação a 11ª e 13ª as diferenças são maiores, chegando a 6 metros para a linha de 11000 metros decrescente na 13ª coluna. Supondo um cenário de temporal, que na



escala Beaufort [28] é possui ventos com velocidades de 50 nós direção de proa do disparo, ter-se-ia uma divergência de 120 metros no alcance. para 11000 metros, seria relativo a aproximadamente 1% de erro. Contudo, apesar da diferença maior obteve-se valores para elevações que a tabela de referência não foi capaz de fornecer.

Por fim, os Quadros 13, 14 e 15 contém as últimas colunas, da 14<sup>a</sup> a 19<sup>a</sup> colunas, novamente com a primeira para referência. Para essas colunas, o valor calculado é a diferença entre a trajetória de referência e a trajetória real quando aplicado as perturbações de cada coluna. As perturbações são: Decréscimo (14<sup>a</sup>) e Acréscimo (15<sup>a</sup>) de 1 ponto percentual na temperatura do ar, Decréscimo (16<sup>a</sup>) e Acréscimo (17<sup>a</sup>) de 1 ponto percentual na densidade do ar, Decréscimo (18<sup>a</sup>) e Acréscimo (19<sup>a</sup>) de 1 um quadro na massa do projétil.

Quadro 13 – Sexto conjunto de colunas da Tabela F (colunas 14 a 15)

1 <sup>a</sup> Coluna	14 <sup>a</sup> Coluna (m)		15 <sup>a</sup> Coluna (m)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000.0	-0.13	-0.2	0.11	0.2
3000.0	-1.46	-1.5	1.3	1.4
5000.0	-3.32	-4.1	3.02	3.6
7000.0	-4.19	-4.3	2.06	1.4
9000.0	0.85	2.4	-4.06	-5.6
11000.0	8.84	11.2	-12.13	-13.1
13000.0	17.07	18.1	-18.99	-19.4
14600.0	19.75	-	-21.42	-22.6
*	*	*	*	*
14600.0	19.06	-	-20.87	-21.8
13000.0	15.18	17.5	-17.27	-19.1
11000.0	12.55	15.3	-14.49	-17
9000.0	11.08	15.4	-12.58	-17.2
8700.0	-27.57	15.8	11.15	-17.8

Para as 6 colunas avaliadas, as colunas 14 a 17 as diferenças entre o calculado e a referência flutuou na faixa de  $\pm 6$  metros, atingindo os maiores valores nas elevações superiores a 1180 mil. A coluna com o resultado mais adequado foi a 17<sup>a</sup>, não ultrapassando 2 metros de divergência nem mesmo na última linha. Já a coluna com a maior diferença foi a 16<sup>a</sup>, que inclusive não possui valores de referência para as duas últimas linhas.

Supondo um clima com 19 pontos percentuais para a diminuição da temperatura ( $\approx -40^{\circ}\text{C}$ ), as divergências encontradas resultam em 90 metros de diferença no alcance para a temperatura para a última linha. Já para a densidade, supondo 19 pontos percentuais para a diminuição da densidade do ar, a diferença seria de 120 metros no alcance, aproximadamente. Contudo, as maiores divergências foram encontradas nas colunas 18 e 19.

Como já discutido, elas são relativas a variação da massa do projétil. As diferenças entre a referência e o calculado são crescentes com o aumento da elevação, chegando a uma diferença 37.6 metros para a linha de 8700 metros no trecho decrescente. Contudo, essa

Quadro 14 – Sétimo conjunto de colunas da Tabela F (colunas 16 a 17)

1ª Coluna	16ª Coluna (m)		17ª Coluna (m)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000.0	-0.43	-0.6	0.94	0.6
3000.0	-5.23	-5.1	5.06	5.3
5000.0	-14.05	-13.9	13.23	14.5
7000.0	-25.04	-24.4	22.67	23.5
9000.0	-34.41	-32.4	30.47	30.7
11000.0	-43.15	-40	37.93	38.8
13000.0	-52.62	-47.4	47.19	49.7
14600.0	-65.74	-59.4	58.78	-
*	*	*	*	*
14600.0	-67.42	-64.8	60.34	-
13000.0	-62.63	-57.7	55.86	56.3
11000.0	-52.55	-46.9	47.01	47
9000.0	-39.73	-	36.5	35.1
8700.0	-12.44	-	-37.18	32.9

Quadro 15 – Oitavo conjunto de colunas da Tabela F (colunas 18 a 19)

1ª Coluna	18ª Coluna (m)		19ª Coluna (m)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000.0	-9.91	-9	9.8	9
3000.0	-23.55	-19	23.4	20
5000.0	-26.17	-22	29.64	23
7000.0	-26.19	-20	29.31	21
9000.0	-25.84	-17	26	19
11000.0	-24.09	-13	21.76	15
13000.0	-18.35	-6	18.72	9
14600.0	-12.75	2	13.29	2
*	*	*	*	*
14600.0	-11.05	3	11.61	1
13000.0	-9.59	6	10.18	-2
11000.0	-6.71	13	7.32	-8
9000.0	-1.14	33	1.95	-27
8700.0	34.65	38	0.44	-34

diferença pode-se chegar a apenas a 110 metros, visto que só pode-se diminuir a massa do projétil em apenas 3 quadrados no máximo. Ou seja, a divergência é maior, mas menos impactante nos casos extremos.

Após a análise da Tabela F gerada e comparando com a Tabela F de referência, pode-se perceber grande proximidade dos resultados calculados com os valores esperados. Entretanto, para as elevações maiores as divergências aumentam significativamente. Contudo não é possível afirmar categoricamente se houve um erro nos cálculos.

Isso porque a tabela F de referência foi calculada a partir de disparos reais na



década de 60, empregando as normas da época para a elaboração dos cálculos. Já no caso deste trabalho, parte dos dados teve origem a partir de um software de terceiros e empregando, no caso da balística externa, as versões atualizadas de diversas normas. Além disso, há ainda considerações a serem feitas com relação ao modelo balístico utilizado.

Como discutido, as forças aerodinâmicas possuem fatores de correção, que foram assumidos com valor unitário. Contudo, a própria STANAG 4355 [21] possui uma seção para ajuste dos fatores de forma os fatores de forma com os alcances reais obtidos. Ou seja, é interessante a implementação de um estudo balístico complementar para verificar a hipótese que a diferença observada surgiu devido a suposição de fatores de forma constantes.

Por exemplo, verificando superficialmente a hipótese do fator de correção, tome a elevação de 1209.5 milésimos, que na tabela de referência possui alcance de 10000 metros. Experimentando alguns valores de fatores de forma  $i$  na Eq. 2.17 encontra-se que o código de trajetória de Frota fornece como saída um alcance de aproximadamente 10000 metros quando  $i = 1.073$ . Um indicativo de que é possível aumentar a previsão da tabela com o uso de alguns tiros reais para ajustar as equações aerodinâmicas.

## 4.2 Tabela A

Outra Tabela calculada é a Tabela A, responsável pela divisão das linhas de correção meteorológica de acordo com a elevação. Para o sistema dado, o resultado obtido é descrito no Quadro 16. Paralelo as colunas calculadas estão os valores de referência [13].

Quadro 16 – Valores da Tabela A calculados e da tabela de referência

Elevação Inferior Calculada	Elevação Inferior Referência	Elevação Superior Calculada	Elevação Superior Referência	Linha
0	0	85.93	86	0
85.94	86.1	170.4	170.9	1
170.41	171	263.53	264.7	2
263.54	264.8	356.91	358.8	3
356.92	358.9	437.98	440.4	4
437.99	440.5	546.36	549	5
546.37	549.1	676.6	679.2	6
676.61	679.3	798.78	801.4	7
798.79	801.5	919.52	922	8
919.53	922.1	1113.4	1115.9	9
1113.4	1116	1300	1270	10

É possível observar pouca diferença entre as faixas de elevação de cada linha meteorológica. Assim como abordado na Tabela F, a diferença observada pode ser fruto da divergência nos modelos físicos e pode ter a precisão aumentada ao ajustar os fatores

de forma, visto que eles são elaborados para aproximar a balística externa calculada com a realidade.

### 4.3 Tabela G

A última tabela calculada foi a tabela G, cujos os valores estão descritos nos Quadros 17 e 18. Assim como discutido, não foram calculadas as colunas 3 a 7, além das 18 e 19. Para comparação foi extraído os dados da Tabela G da tabela de referência, cujos os dados foram dispostos paralelo as colunas calculadas. Como já abordado, as colunas apresentam os valores relativos a: Alcance (1<sup>a</sup>), Elevação (2<sup>a</sup>), ângulo de queda (8<sup>a</sup>), cotangente do ângulo de queda (9<sup>a</sup>), velocidade terminal (10<sup>a</sup>) e flecha (11<sup>a</sup>).

Assim como a Tabela F, também será exposto aqui as colunas com alcance ímpares e múltiplos de 1000. Incluso as linhas mais próximas do alcance máximo e a linha do última alcance calculado. Na tabela convencional a diferença de alcance entre as linhas é de 1000 metros.

Quadro 17 – Primeiro conjunto de colunas da Tabela G

1 <sup>a</sup> Coluna	2 <sup>a</sup> Coluna (mil)		8 <sup>a</sup> Coluna (mil)		9 <sup>a</sup> Coluna (-)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000	16.72	16.7	17.7	18	57.56	57.1
3000	57.06	57.2	68.49	70	14.85	14.6
5000	110.01	111.3	150.43	155	6.72	4.7
7000	181.01	184.2	270.12	277	3.68	2.9
9000	271.49	275.3	406.84	408	2.37	2
11000	382.98	385.8	554.99	551	1.65	1.4
13000	528.82	530	723.34	717	1.16	0.9
14500	726.52	730.2	918.09	917	0.79	0.6
*	*	*	*	*	*	*
14500	875.97	872	1048.57	1041	0.6	0.5
13000	1056	1052.1	1194.18	1190	0.42	0.4
11000	1178	1167.6	1290.3	1289	0.31	0.3
9000	1269	1243.4	1364.8	1372	0.24	0.2

A metodologia empregada demonstrou uma proximidade dos valores calculados com os esperados ainda maior do que o observado na tabela F. A maior diferença no ângulo de queda foi de 7.57 milésimo ( $\approx 0.43$  graus), de 7 m/s para a velocidade terminal e uma diferença de 160 metros na flecha (que representa 2% do valor total). Ao contrário do observado para a tabela F, não houve indícios de uma relação do aumento das divergências pela elevação, com exceção do trecho decrescente para a coluna com o valor da flecha.

Tal coluna foi sim observado uma tendência em uma flecha maiores do que as de referência, o que pode indicar um arrasto menor que o previsto pela tabela, que pode vir a ser corrigido com fatores de forma. Logo, há um indício que a diferença nas flechas

Quadro 18 – Segundo conjunto de colunas da Tabela G

1ª Coluna	10ª Coluna (m/s)		11ª Coluna (m)	
	Calculada	Referência	Calculada	Referência
1000	515	513	4	4
3000	427	422	46	46
5000	351	344	158	161
7000	314	315	390	400
9000	302	306	789	802
11000	300	304	1405	1409
13000	305	309	2373	2363
14500	317	321	3904	3912
*	*	*	*	*
14500	328	327	5141	5087
13000	330	331	6580	6532
11000	332	333	7438	7353
9000	333	332	7975	7816

esteja mais ligada a diferença na elevação do que necessariamente ao modelo físico. Note as maiores diferenças só ocorreram a partir de 11000 no trecho decrescente da tabela, quando a diferença na elevação era maior do que 10 milésimos, dobrando para a linha seguinte quando a diferença na elevação foi aproximadamente de 25 milésimos.

#### 4.4 Aplicação e Comparação das Tabelas em um Tiro Simulado

A partir das Tabelas calculadas e utilizando o algoritmo e a situação problema descrito na seção de para implementação da técnica do tiro de artilharia, encontra-se os seguintes valores para as perturbações para a baixa elevação: -5.12 m/s na velocidade de boca, +7.8 pontos percentuais na densidade do ar, -8.9 pontos percentuais na temperatura, vento cruzado para a direita e vento de cauda, ambos com módulo de 13 nós.

Para a alta elevação, as perturbações são: -5.12 m/s na velocidade de boca, +4.4 pontos percentuais na densidade do ar, - 9.2 pontos percentuais na temperatura, vento cruzado com módulo de 20 nós para a esquerda e vento de proa com módulo de 8 nós. Para ambos os casos as perturbações são as mesmas, seja para a tabela de referência ou calculada.

O algoritmo forneceu como saída duas possibilidades. A primeira possui elevação de 404 milésimos, com uma deriva no valor de 1583 milésimos em relação ao Norte Geográfico. Aplicando a situação no código de geração de trajetórias, obteve-se um alcance de 10967 metros, com um desvio para a direita de 198 metros.

Lembre-se que o código de geração de tiro fornece a saída em relação ao plano de tiro do obuseiro. Logo, para verificar a proximidade com o alvo deve-se utilizar a matriz

de rotação  $S$  da Eq. 4.1, cujo ângulo é dado pela diferença entre o azimute de tiro e o azimute do alvo. Para o caso em análise o valor é de -17 milésimos.

$$S(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Aplicando a rotação obtêm-se que o alcance foi de 10969 metros, com um desvio para a direita de 15 metros. Considerando os dados de erro provável em alcance (31 metros) e desvio (6 metros) da Tabela G de referência para o alcance de 11000 metros, a precisão foi significativa. Será necessário apenas um ajuste de 1 milésimo para a esquerda e para cima para garantir que 50% dos disparos impactem na proximidade do alvo.

A segunda possibilidade de disparo ocorre para a elevação de 1148 milésimos de elevação e deriva no valor de 1563 milésimos. Como resultado, obteve-se 10917 metros de alcance e um desvio de 328 metros para a direita. Rotacionando, com ângulo de -37 milésimos, obteve-se um alcance de 10921 metros e desvio de 68 metros para a esquerda.

Em comparação com o caso anterior, a precisão diminui, sendo necessário um ajuste secundário de -4 milésimos na elevação e de 7 milésimos para a direita para que 50% dos disparos impactem na proximidade do alvo. tal diferença é esperada, visto que a trajetória mais curva apresenta mais tempo para que os efeitos das perturbações combinadas aumentem, resultando numa diferença significativa no local do impacto.

Para a Tabela de Referência, a elevação baixa foi de 409 milésimos, com deriva de 1580 milésimos. No código de geração de trajetórias obteve-se um alcance de 11040 metros, com desvio lateral para a direita de 202 metros. Rotacionando para o ângulo de -20 milésimos, o alcance percebido foi de 11042 metros, com desvio lateral percebido de 15 metros para a esquerda. A correção secundária é semelhante ao caso das tabelas calculadas, sendo de 1 milésimo para baixo e 1 para a direita.

A elevação maior calculada foi de 1440 milésimos com deriva de 1550. No código de geração de trajetórias, o alcance obtido foi de 11053 metros, com desvio lateral de 322 metros para a direita. Rotacionando para o ângulo de -50 milésimos, obteve-se um alcance percebido de 11055 metros, com desvio lateral percebido de 221 metros para a esquerda. Nesse caso, a correção é de 4 milésimos para cima e de 20 milésimos para direita.

Era esperado que para as baixas elevações houve-se proximidade entre a Tabela de referência e a Calculada, visto que foi observada baixa diferença entre as duas. Contudo, o resultado mais interessante foi obtido para as grandes elevações, em que era esperado grande diferença nos resultados devido ao que foi observado.

A Tabela de Referência teve uma precisão inferior a tabela calculada, com mais de 200 metros de diferença. Tal resultado é um indicativo que a razão da discrepância

dos valores calculados com os de referência tenha origem na modelagem balística. Como a tabela deste trabalho utilizou a mesma modelagem que de voo que a verificação dos resultados, seus valores tornaram-se mais adequados do que a Tabela real.

Ou seja, se tal hipótese for verdadeira, a tabela calculada não apenas possui desempenho satisfatório (considerando que os resultados sejam recíprocos para tiros reais), como a geração de trajetórias requer apenas alguns ajustes mais finos. Inclusive, a própria STANAG 4355 [21] prevê ajustes a serem realizados por meio de fatores de forma.

Por fim, vale ressaltar que apesar da relativa proximidade observada nas colunas para o ajuste de massa do projétil, sugere-se estudos de balística interna para obtenção do fator  $n_i$  da Eq. 3.1. Tal diferença foi tanta que optou-se por não comparar o resultado na implementação da Técnica do tiro de artilharia.



## 5 CONCLUSÃO

Recapitulando os objetivos deste trabalho, buscava-se a definição e sistematização de informações atinentes à geração de trajetórias de munições de artilharia, como também a implementação de um código capaz de calcular as tabelas de forma autônoma. Além disso, também procurava-se aplicar as tabelas em conformidade com o interesse e necessidade do Exército Brasileiro.

Como resultado, obteve-se uma extensa abordagem dos conceitos que estão interligados ao tiro de artilharia, desde os mais simples, como a definição de elevação e deriva, até a descrição completa da modelagem da balística externa. Incluiu-se também as definições de cada tabela, bem como a sua aplicação e importância para a técnica.

Com a teoria exposta, pode-se tratar do código de geração de trajetórias. Para tanto, aplicou-se a metodologia de diferentes fontes ou a partir do que havia sido abordado teoricamente. O resultado foi um conjunto de tabelas, que ao serem comparadas com a tabela de real, seus valores mostraram-se coerentes.

Contudo, observou-se divergências mais significativas para as grandes elevações. Levantou-se a hipótese de que as diferenças fossem resultado das simplificações na modelagem da balística externa. Para verificar tal hipótese mais profundamente, aplicou-se a técnica do tiro de artilharia em um disparo simulado.

Para tanto, desenvolveu-se um programa capaz de calcular as correções necessárias e em conformidade com o previsto em manuais. Tal programa atende, em parte, o requisito de aplicar as tabelas em um interesse e necessidade do Exército Brasileiro, visto que se assemelha, resguardado as devidas proporções, ao executado pelo Palmar II.

Como resultado, o desempenho das tabelas foi próximo na baixa elevações, o que era previsto devido a baixa diferença nos valores de correção das perturbações nesse aspecto. Para a alta elevação, a tabela calculada apresentou uma precisão maior do que a tabela de referência.

Nesse aspecto, a hipótese de que as diferenças têm origem na modelagem balística é reforçada. Se verdadeira, a metodologia para a geração de trajetórias necessita apenas de ajustes finos nos fatores de correção. Conseqüentemente, a tabela gerada pelo código deste trabalho também ganhará precisão.

Por fim, pode-se concluir que, mesmo com os desafios enfrentados por este trabalho, a busca pelo cumprimento dos objetivos propostos por este trabalho resultou em bons frutos. Inclusive, a virtualização dos dados permite seu uso em equipamentos digitais, que ao fazer uso dos procedimentos do tiro de artilharia fornece ao combatente uma ferramenta



útil e de simples uso. Contudo, novos desafios e perspectivas foram expostos, que podem ser abordados mais profundamente em estudos futuros.

Não apenas isso, mas a superação desses obstáculos agregará valor aos códigos e algoritmos desenvolvidos neste trabalho, possibilitando maior precisão e poder de fogo no teatro de operações. Assim sendo, este trabalho ao ser expandido e aperfeiçoado conduzirá ao estabelecimento de uma norma brasileira para a confecção de tabelas de tiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 EXÉRCITO BRASILEIRO. ESTADO-MAIOR. *Técnica de tiro de Artilharia de Campanha - Volume I*. Brasília: Exército Brasileiro, 2001. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/393>>. Acesso em: 19 Jan. 2021.
- 2 KINARD, J. *Artillery: an illustrated history of its impact*. 1. ed. Santa Barbara, Califórnia: ABC-CLIO, 2007. 537 p.
- 3 POLACHEK, H. Before the eniac. *IEEE Annals of the History of Computing*, v. 19(2), 1997. 10 maio de 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/586069>>.
- 4 MINISTÉRIO DA DEFESA. EXÉRCITO BRASILEIRO. SECRETARIA-GERAL DO EXÉRCITO. *Boletim do Exército Nº 45/2016*. Brasília, Distrito Federal: Exército Brasileiro, 2016. Disponível em: <<https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/1/1408/1/bel45-16.pdf>>. Acesso em: 19 Jan. 2021.
- 5 IMBEL. *Sistema Gênese GEN-3004*. 18 Jan. de 2021. Disponível em: <<https://www.imbel.gov.br/index.php/a-empresa/104#:~:text=O%20Sistema%20Gênese%20é%20um,de%20Infantaria%2C%20Cavalaria%20e%20Artilharia.>>
- 6 ALVES Ângelo de O.; FERREIRA, F. G.; DIAS, M. de S. A reestruturação do sistema de artilharia de campanha (sac): implantação das vbcoap m109 a5 e m109 a5+br. *Revista do Exército Brasileiro*, v. 154, 2018. 19 jan de 2021. Disponível em: <<http://ebrevistas.eb.mil.br/REB/article/view/2467/1987>>.
- 7 NATO STANDARTIZATION AGENCY. *STANAG 4119 - Adoption Of A Standart Cannon Artillery Firing Table Format*. 2. ed. Bruxelas, Bélgica: NATO Standartization Agency, 2007.
- 8 NATO STANDARTIZATION AGENCY. *STANAG 4044 - Adoption Of A Standard Atmosphere*. 2. ed. Bruxelas, Bélgica: Military Agency for Standartization (MAS), 1969.
- 9 NATO STANDARTIZATION AGENCY. *STANAG 4061 - Adoption Of A Standard Ballistic Meteorological Message*. 1. ed. Bruxelas, Bélgica: Military Agency for Standartization (MAS), 2000.
- 10 NATO STANDARTIZATION AGENCY. *STANAG 4144 - Procedures To Determine The Fire Control Inputs For Use In Indirect Fire Control Systems*. 2. ed. Bruxelas, Bélgica: NATO Standartization Agency, 2005.
- 11 HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY. *Field Artillery Manual Cannon Gunnery*. Washington, DC: Headquarters, Department of the Army, 2016.
- 12 HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY. *Tactics, Techniques and Procedures for Field Artillery Manual Cannon Gunnery*. Washington, DC: Headquarters, Department of the Army, 1999.
- 13 ESTADOS UNIDOS. EXÉRCITO AMERICANO. *Firing Tables For Cannon, 155MM HOWITZER, M114A2*. WASHINGTON,DC, 1974.

- 14 EXÉRCITO BRASILEIRO. ESTADO-MAIOR. *Técnica de tiro de Artilharia de Campanha - Volume II*. Brasília, Distrito Federal: Exército Brasileiro, 2001. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspu/handle/123456789/393>>. Acesso em: 19 Jan. 2021.
- 15 CARLUCCI, D. E.; JACOBSON, S. S. *Ballistics Theory And Design Of Guns And Ammunition*. 3. ed. 6000 Broken Sound and Parkway NW, Suite 300: CRC-Press, 2018.
- 16 MCCOY, R. L. *Modern Exterior Ballistics*. Atglen, PA: Schiffer Publishing Ltd, 1998.
- 17 DICKINSON, E. R. *The Production Of Firing Tables For Cannon Artillery*. Aberdeen Proving Ground, Md, 1967.
- 18 GRANGEIRO, L. F. Geração de tabelas de artilharia. IME, 2021. Tema de Iniciação à Pesquisa.
- 19 ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 19111 - Geographic information - Referencing by coordinates*. 3. ed. [S.l.]: ISO - International Organization for Standardization, 2019.
- 20 INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO. *Manual of the ICAO Standard Atmosphere - extended to 80 kilometres (262 500 feet)*. 3. ed. [S.l.]: International Civil Aviation Organization - ICAO, 1993.
- 21 NATO STANDARTIZATION AGENCY. *STANAG 4355 - The Modified Point Mass And Five Degrees Of Freedom Trajectory Models*. 3. ed. Bruxelas, Bélgica: NATO Standardization Agency, 2009.
- 22 O'ROURKE, R. *Navy Lasers, Rail Gun, and Hypervelocity Projectile: Background and Issues for Congress*. [S.l.], 2017. Disponível em: <[www.crs.gov](http://www.crs.gov)>.
- 23 ARMAS NACIONAIS - MODELISMO E HISTÓRIA. *M114 155 mm Howitzer no Brasil*. Disponível em: <<https://www.armasnacionais.com/2018/07/m114-155-mm-howitzer-no-brasil.html>>. Acesso em: 24 jul 2021.
- 24 ESTADOS UNIDOS. EXÉRCITO AMERICANO. *Operator and Organizational Maintenance Manual Howitzer, Medium, towed 155 mm M114, M114A1 and M114A2*. 1965. Disponível em: <<https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uva.x004816217&view=1up&seq=5&skin=2021>>. Acesso em: 24 Jul 2021.
- 25 ARROW TECH. *Projectile Rocket Ordnance Design & Analysis System - PRÓDAS*. Disponível em: <<http://www.prodass.com/XQ/ASP/P.400/QX/webPageXML4.htm>>.
- 26 ESTADOS UNIDOS. EXÉRCITO AMERICANO. *Army Ammunition Data Sheets, Artillery, Ammunition, Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles And Artillery Fuzes*. WASHINGTON,DC, 2003.
- 27 AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. *ANACpédia*. Disponível em: <[https://www2.anac.gov.br/anacpedia/ing\\_por/ing-por.htm](https://www2.anac.gov.br/anacpedia/ing_por/ing-por.htm)>. Acesso em: 10 mai 2021.
- 28 REVISTA DE GESTÃO COSTEIRA INTEGRADA. *Escala Beaufort*. Disponível em: <<https://www.aprl.pt/rgci/glossario/escalaBeaufort.html>>. Acesso em: 24 jul 2021.