

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Caio Oliveira Falcão

Modelagem Dinâmica de uma Arma de Pressão

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Mauro Speranza Neto

Coorientador: André Luiz Tenório Rezende

Rio de Janeiro

Junho 2021

*A Deus e minha família, que me
possibilitaram ser tudo que sou hoje.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e força proporcionados ao longo desses anos de curso.

Aos meus pais, Aderbal e Simone, pelo amor e apoio incondicional, pelo incentivo desde cedo aos estudos, me proporcionando sempre as melhores condições de estudo, acreditando em mim e me ajudando a realizar o sonho de estudar Engenharia Mecânica.

A minha irmã, Fernanda, por toda amizade, conselhos, carinho e parceria ao longo desses anos.

Aos meus avós, Lenéa, Juarez, Dulce e Jorge e a minha tia avó Lécia, por sempre terem me dado muito amor, carinho e sempre terem apoiado meus estudos.

A toda minha família, pelo carinho, apoio aos estudos, conversas, conselhos, confiança e amizade.

Aos meus amigos, irmãos que a vida me deu, por sempre me apoiarem nos estudos, pela paciência, pela parceria de longos anos e por serem muitas vezes meu refúgio.

Ao Colégio Salesiano Santa Rosa, por me proporcionar experiências incríveis, durante meus anos de escola, convivi com professores e amigos que me fizeram ter experiências e alegrias fundamentais para ser quem eu sou hoje.

Aos meus colegas de curso, pelo apoio e cooperação mútua durante os anos de estudo em especial a Cícero Vargas, Sandro Ferreira, Matheus Mendes, Marcela Pires, Filipe Papa e Fellipe Lopez.

A PUC-Rio, em especial os professores da Engenharia Mecânica por me proporcionar uma educação de alta qualidade e experiências extracurriculares que foram essenciais para meu crescimento profissional.

Aos meus orientadores, Mauro Speranza Neto e André Luiz Tenório Rezende, pelas contribuições, conselhos e dedicação para realizar o trabalho ao meu lado.

A Equipe Reptiles Baja PUC – Rio, ao ECOA PUC - Rio (Insurtech) e a Subsea 7, estágios que me fizeram e fazem crescer exponencialmente como profissional, bem como os colegas de trabalho que pude conhecer nesses ambientes.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação e conclusão do curso.

RESUMO

Modelagem Dinâmica de uma Arma de Pressão

O uso de armas de pressão no Brasil para fins esportivos vem crescendo a cada dia. No entanto, a falta de informação sobre esses equipamentos tanto por parte dos fabricantes quanto na própria literatura deixa uma lacuna aos praticantes que querem conhecer mais sobre seus armamentos. Tendo isso em vista, levantar parâmetros diversos desses armamentos se torna importante para o crescimento e desenvolvimento dos esportes que envolvem armamentos de pressão. No trabalho proposto, o foco principal será nos armamentos de *Airsoft*, esporte que a princípio ficou conhecido por simular combates militares, mas que hoje em dia possui diversas modalidades. Espera-se no final do trabalho que os resultados simulados estejam próximos com as grandezas que são possíveis de serem avaliadas, seja essa avaliação por meio experimental ou por meio comparativo com outros sistemas.

Palavras-chave: *Airsoft*. Modelagem. Armas de Pressão.

Área de concentração: Mecânica Aplicada

Linha de Pesquisa: Sistemas Dinâmicos e Controle

ABSTRACT

Dynamic Modeling of a Pressure Gun

The use of pressure weapons in Brazil for sporting purposes has been growing every day. However, the lack of information about these equipment both on the part of the manufacturers and in the literature itself leaves a gap in athletes who wants to know more about their armaments. In that regard, raising different parameters of these armaments becomes important for the growth and development of sports that involve pressure armaments. In the proposed work, it will focus specifically on Airsoft armaments, a sport that at first became known for simulating military combat but which nowadays has several modalities. At the end of the work, it is expected that the simulated results found will be close to the physical quantity that are possible to be evaluated, whether this evaluation is carried out experimentally or through a comparison with other systems.

Keywords: Airsoft. Dynamic Modeling. Pressure Gun.

Concentration Area: Applied Mechanics

Research Line: Dynamic and Control Systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Armas de Pressão.....	11
Figura 2: Subsistemas AEG	13
Figura 3: Componentes	14
Figura 4: Desenho 2D	15
Figura 5: Acoplamento Sector Gear – Pistão	16
Figura 6: Ciclo de Funcionamento – Parte 1	17
Figura 7: Ciclo de Funcionamento – Parte 2	17
Figura 8: Ciclo de Funcionamento – parte 3	18
Figura 9: Ciclo de Funcionamento – Parte 4	19
Figura 10: 2D pistão Cilindro – Diferença de áreas.....	22
Figura 11: Pressões e Temperaturas – Jusante e Montante.....	23
Figura 12: Gráfico fluxo de massa versus razão de pressão	24
Figura 13: Modelo Base	27
Figura 14: Diagrama de Corpo Livre	29
Figura 15: Subsistema Variação da Pressão	31
Figura 16: Subsistema Vazão Mássica – Modelo Base	32
Figura 17: Subsistema Aceleração.....	33
Figura 18: Sistema Completo	34
Figura 19: Gráfico Pressão na Câmara e Posição do Pistão – Modelo Base	35
Figura 20: Gráfico Força e Sinal de Comando – Modelo Base	35
Figura 21: Modelo Base – Adaptado	36
Figura 22: 2D Pistão – Cilindro – Cabeça do Cilindro – Nozzle	37
Figura 23: Bloco da Vazão Mássica – Modelo Primário	40
Figura 24: Posição do Pistão $x = 0\text{mm}$	42
Figura 25: Posição do Pistão $x = 58,5\text{mm}$	42
Figura 26: Sistema Completo – Modelo Primário	44
Figura 27: Gráfico Posição do Pistão – Modelo Primário	46
Figura 28: Gráfico Pressão na Câmara – Modelo Primário.....	46
Figura 29: Gráfico Razão de Pressões – Modelo Primário	47
Figura 30: Gráfico Vazão Mássica – Modelo Primário	47
Figura 31: Gráfico Velocidade do Pistão – Modelo Primário	47

Figura 32: Gráfico Velocidade do Escoamento – Modelo Primário	48
Figura 33: Aparato experimental	49
Figura 34: Aparato Experimental e Pesos Utilizados	50
Figura 35: Aparato Experimental – Realização da Medição.....	50
Figura 36: Gráfico Obtenção da Constante Elástica da Mola.....	52
Figura 37: Posição do Pistão $x = 36\text{mm}$	53
Figura 38: Subsistema Vazão Mássica – Modelo final	55
Figura 39: Subsistema Variação da pressão – Modelo final	56
Figura 40: Diagrama de Corpo Livre – Modelo Final.....	57
Figura 41: Subsistema Aceleração – Modelo Final	58
Figura 42: Sistema Completo – Modelo Final.....	59
Figura 43: Pressão na Câmara em Função da Posição do Pistão – Modelo Final....	61
Figura 44: Vazão Mássica – Modelo Final	61
Figura 45: Pressão na Câmara – Modelo Final	61
Figura 46: Velocidade do Escoamento no Cano – Modelo Final.....	62
Figura 47: Vazão Mássica em Função da Posição do Pistão – Modelo Final	62
Figura 48: Velocidade do Escoamento no Nozzle – Modelo Final	62
Figura 49: Velocidade do Pistão – Modelo Final	63
Figura 50: Força da Mola – Modelo Final.....	63
Figura 51: Posição do Pistão – Modelo Final	63
Figura 52: Razão de Pressões – Modelo Final.....	64
Figura 53: Armamento e Cronógrafos	65
Figura 54: Tempo de Saída do Cano da BBs 0,12g.....	67
Figura 55: Tempo de Saída do Cano da BBs de 0,25g.....	68
Figura 56: Pressão em Função do Tempo – Beretta 9mm.....	70
Figura 57: Velocidade do Ferrolho – Beretta 9mm.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidades de disparo em relação a gramatura da BBs	21
Tabela 2: Dados do Modelo Base	30
Tabela 3: Dados do Modelo Primário	39
Tabela 4: Dados Experimentais para Cálculo do K da mola	51
Tabela 5: Dados do Modelo Final.....	54
Tabela 6: Dados Experimentais de Velocidade da BBS.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS

PUC-Rio	-	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
2D	-	Bidimensional
3D	-	Tridimensional
AEG	-	<i>Airsoft Eletric Gun</i>
BBs	-	Esfera Plástica de 5,95mm de diâmetro
fps	-	<i>Feet per Second</i>
SI	-	Sistema Internacional de Unidades
IME	-	Instituto Militar de Engenharia

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	-	Área da Ponta da Cabeça do Cilindro
A_1	-	Área da Cabeça do Pistão
A_2	-	Área da Parede Interna do Pistão
M	-	Número de Mach
c	-	Velocidade do som no meio
T	-	Temperatura
R	-	Constante Universal dos Gases
n	-	Expoente da Politrópica
P	-	Pressão
w	-	Vazão Mássica
V	-	Volume
v	-	Velocidade
C_d	-	Coeficiente de descarga
γ	-	Razão de calores específico
C_r	-	Razão de pressão crítica
ρ	-	Densidade do fluido
c_p	-	Calor específico a pressão constante
c_v	-	Calor específico a volume constante

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	MOTIVAÇÃO	11
1.2.	OBJETIVO	12
2.	FUNCIONAMENTO AEG	13
3.	SISTEMAS PNEUMÁTICOS	20
3.1.	ARMAMENTO	20
3.2.	EQUACIONAMENTO	21
4.	MODELAGEM BASE	27
4.1.	MODELO	27
4.2.	DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL	29
4.2.1.	Subsistema Variação da Pressão	30
4.2.2.	Subsistema Vazão Mássica	31
4.2.3.	Subsistema Aceleração	33
4.2.4.	Sistema Completo	34
4.2.5.	Resultados	34
5.	MODELO AEG PRIMÁRIO	36
5.1.	PREMISSAS ASSUMIDAS	37
5.2.	MODELO COMPUTACIONAL	38
5.2.1.	Subsistema Vazão Mássica	39
5.2.2.	Subsistema Variação da Pressão	41
5.2.3.	Entrada do Sistema	41
5.2.4.	Sistema Completo	44
5.2.5.	Resultados	45
6.	CONSTANTE ELÁSTICA DA MOLA	49
7.	MODELAGEM AEG FINAL	53

7.1.	MODELO COMPUTACIONAL.....	54
7.1.1.	Subsistema Vazão Mássica	55
7.1.2.	Subsistema Variação da Pressão	56
7.1.3.	Subsistema Modelagem Pistão	57
7.1.4.	Entrada do sistema	58
7.1.5.	Sistema Completo	59
7.1.6.	Resultados	59
8.	TESTES NO ARMAMENTO E OUTRAS ANÁLISES	65
9.	CONCLUSÃO	72
10.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
11.	REFERÊNCIAS.....	74
	APÊNDICES.....	76
	APÊNDICE A – CÓDIGOS	76

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Armas de pressão, por ação de mola ou algum gás comprimido são em sua maior parte utilizadas para fins esportivos devido ao seu fácil acesso no mercado brasileiro, basta ser maior de dezoito anos para comprar, e sua semelhança com armas de fogo. Essas armas possuem uma energia cinética de disparo muito menor do que uma arma de fogo, sendo utilizadas em muitos casos para prática de tiro ao alvo e no caso das armas de *Airsoft* e de *Paintball*, são utilizadas na maioria das vezes para simulação de combate.

Na Figura 1 são mostradas imagens de diferentes tipos de armas de pressão como: Carabina PCP, que utiliza ar comprimido como fonte de energia para seus disparos; carabina nitro que utiliza nitrogênio; marcador de *Paintball*, que utiliza ar comprimido e por fim; pistolas e armas de *Airsoft* que podem utilizar CO₂, gás propano, *green gas* (gás propano com óleo de silicone) ou ar comprimido.



Figura 1: Armas de Pressão

Fonte: (AZSPORTS); (DISPROPIL); (PAINTBALL SPORTS); (LOJA DA CARABINA); (ACTIONX AIRSOFT)

Nesse sentido, levantar parâmetros diversos desses armamentos se torna importante para o crescimento e desenvolvimento dos esportes que envolvem armamentos de pressão. No trabalho proposto, será focado em específico nos armamentos de *Airsoft*, esporte que inicialmente ficou conhecido por simular combates militares, mas que hoje em dia possui diversas modalidades. As armas de *Airsoft* disparam projéteis de 5,95mm de diâmetro feitos de plástico, também conhecidas como BBs.

1.2. OBJETIVO

O projeto tem por objetivo principal modelar matematicamente uma arma de *Airsoft* usando conceitos de modelagem dinâmica de sistemas e mecânica dos fluídos, a partir de uma arma real de pressão modelo: RIFLE DE AIRSOFT M4 CM16 PREDATOR - G&G. Assim, o armamento será desmontado para que suas peças e componentes sejam mensurados de forma que o modelo possa ser feito da forma mais fiel possível.

2. FUNCIONAMENTO AEG

O sistema da AEG (*Airsoft Elettric Gun*), a ser estudada, é um sistema eletro mecânico composto basicamente por três subsistemas: parte elétrica (motor elétrico) destacado em verde; parte mecânica (redução) destacado em vermelho; e parte pneumática (sistema mola-pistão-cilindro e cabeça do cilindro) destacado em azul. A Figura 2 abaixo evidencia os três subsistemas descritos juntamente com a carcaça da *Gear Box*, que suporta e une todos os subsistemas descritos. Vale destacar que na Figura 2 a arma está desmontada, algumas peças não foram colocadas para que os subsistemas possam ser vistos da melhor maneira possível.

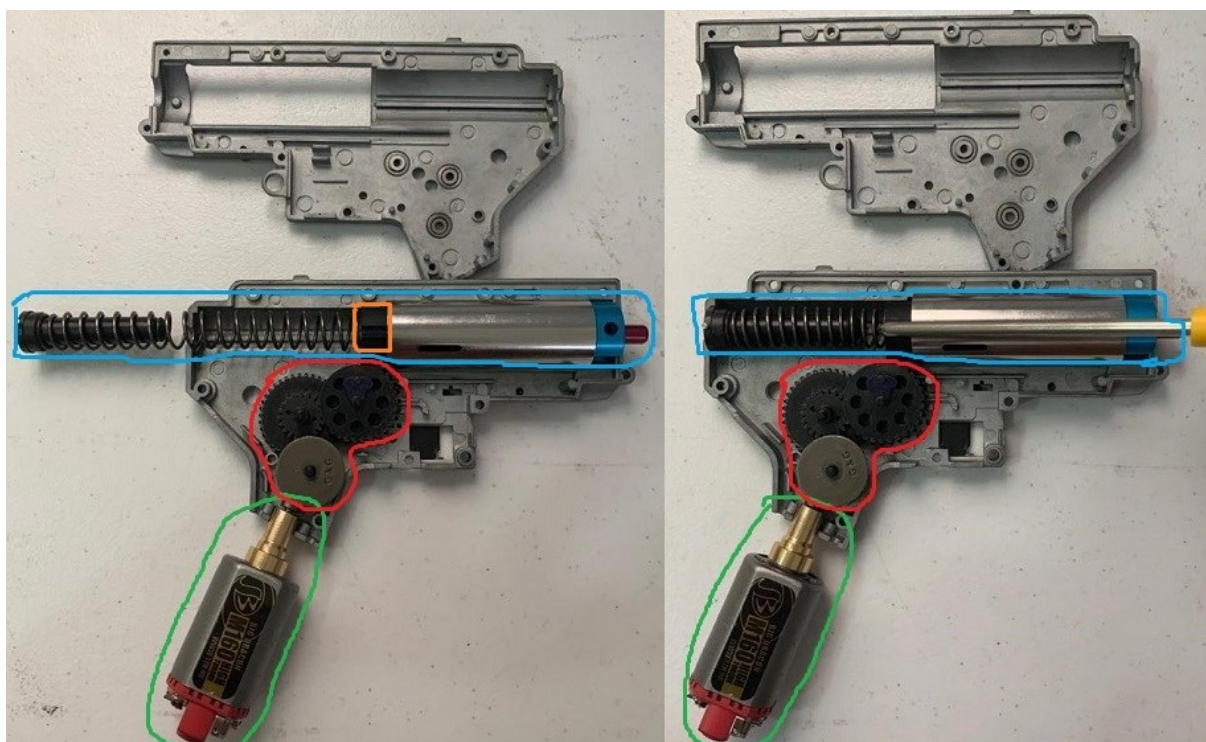


Figura 2: Subsistemas AEG

Fonte: Compilação do Autor¹

Na foto da esquerda, pode-se observar que a mola está relaxada, porém a mesma fica pré-tensionada, como se observa na foto da direita, quando a arma está totalmente montada. Na foto da esquerda, destaca-se melhor o guia de mola, que fica no interior da mola, o cilindro de cor prata, o pistão destacado em laranja, que se

¹ Foto retirada em bancada do Autor com seus próprios equipamentos.

encontra no interior do cilindro, a cabeça do cilindro de cor azul e o *Nozzle* (bocal) de cor vermelha, que encaixa na ponta da cabeça do cilindro.

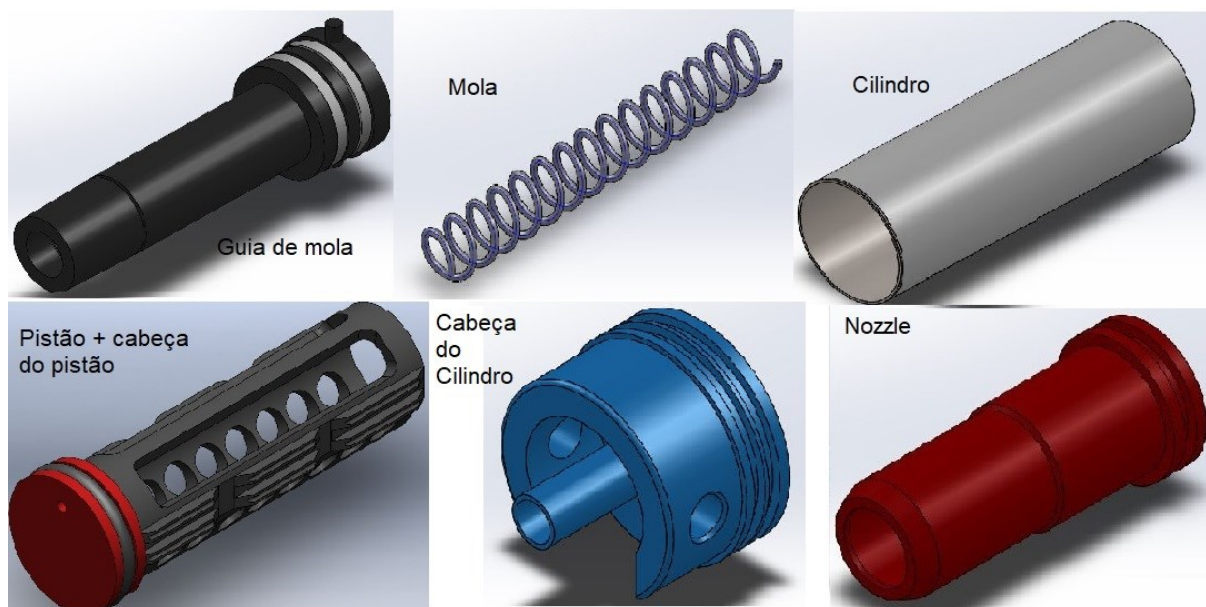


Figura 3: Componentes

Fonte: (HALSOE, 2015)

A partir do acionamento do gatilho, o motor elétrico gira em ciclos que podem ser contínuos (modo automático) ou interrompidos (modo semiautomático) acionando o a redução através da *Bevel Gear*, que por sua vez está acoplada a *Spur Gear* e finalmente transfere todo seu torque, esse sendo aumentado em 18 vezes, consequentemente a velocidade reduzida em 18 vezes para a *Sector Gear*. Os componentes do modelo 3D da Figura 3 acima se assemelham muito com os componentes reais da Figura 2.

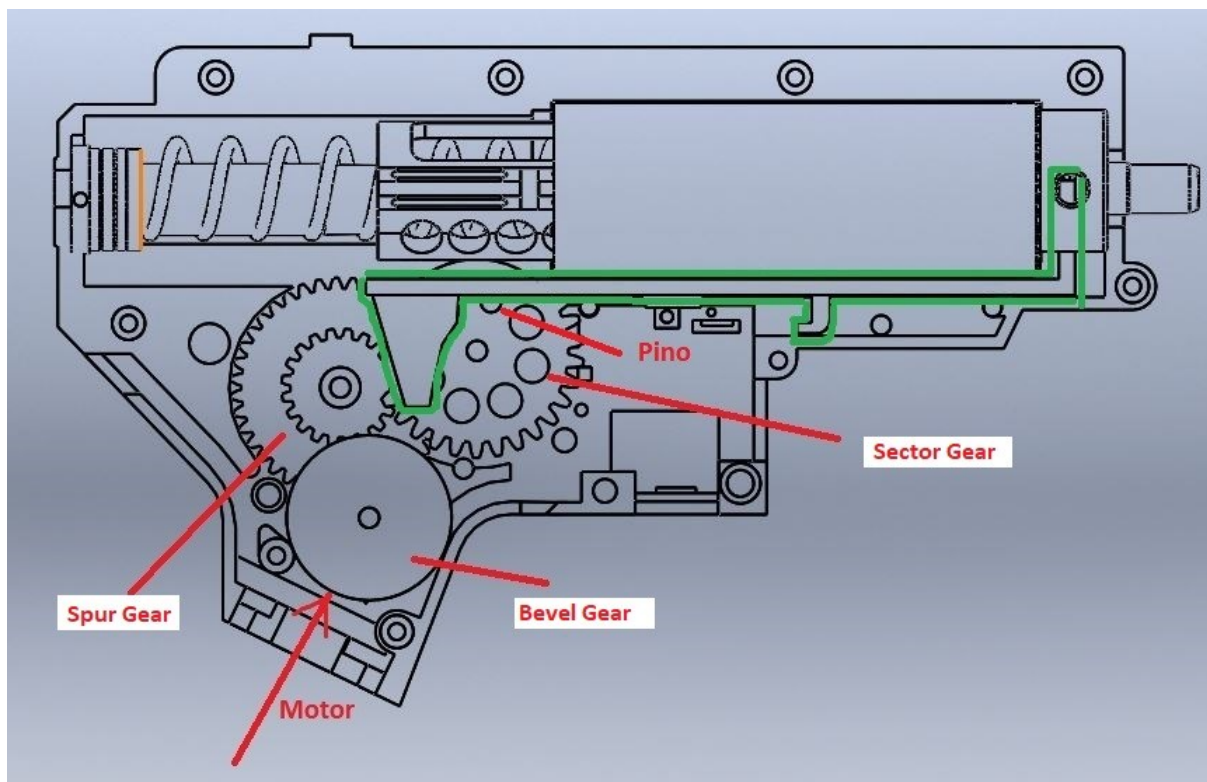


Figura 4: Desenho 2D

Fonte: (HALSOE, 2015)

Pode-se observar que a *Sector Gear* é semidentada em uma de suas faces. Esse motivo é proposital, pois dessa maneira ela consegue com um apertar e soltar do gatilho (um ciclo no modo semiautomático), comprimir a mola através do pistão que é dentado, e quando o curso dos dentes da *Sector Gear* acaba, o pistão avança através da ação da mola e comprime o ar que está dentro do cilindro, passando-o por um bocal convergente. No processo, esse ar é acelerado e dispara uma BBs (não mostrado na figura) que se encontra em frente ao *Nozzle*.

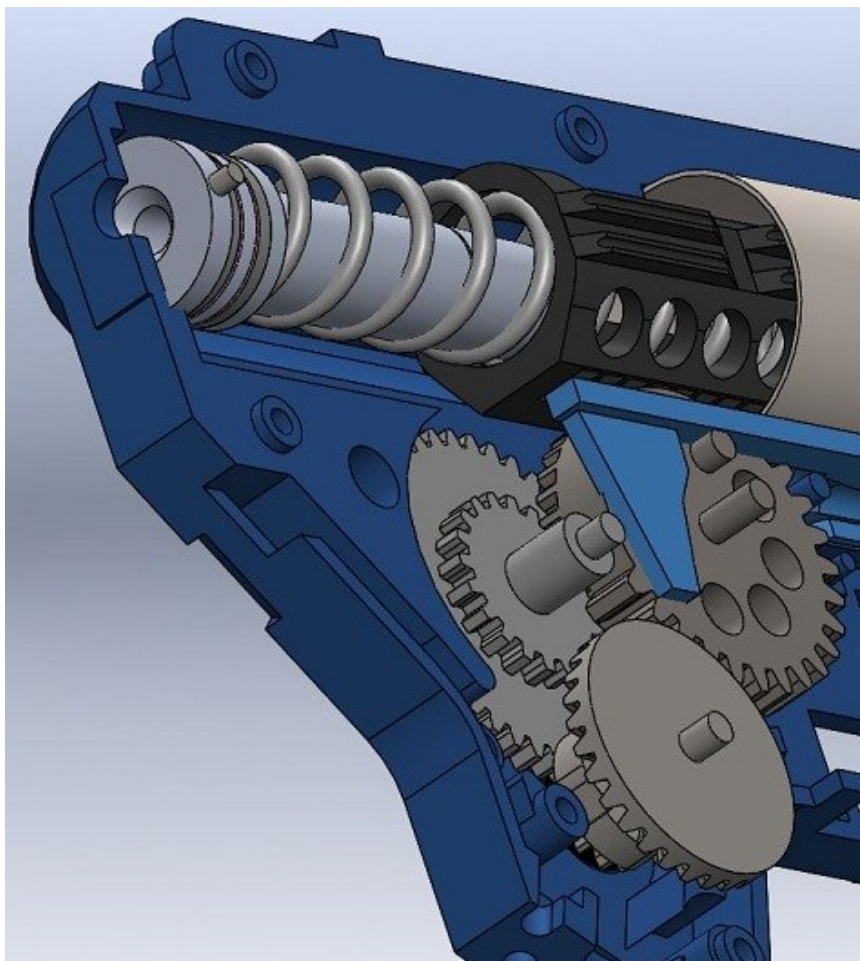


Figura 5: Acoplamento Sector Gear – Pistão

Fonte: (HALSOE, 2015)

Na Figura 5, pode-se observar em mais detalhes o que foi descrito anteriormente, os dentes do pistão bem como os acoplamentos das engrenagens. Observa-se também o *Tappet Plate*, destacado em verde na Figura 4, o mesmo é acionado pelo pino da *Sector Gear*, destacado também na Figura 4. O *Tappet Plate* é responsável pelo recuo e avanço do *Nozzle*, permitindo que o magazine, equipamento onde os projéteis são armazenados, impulsione uma BBs durante o recuo do pistão. Nota-se na Figura 4 e Figura 5 que o pino da *Sector Gear* se encontra um pouco antes dos dentes da engrenagem se acoplarem aos dentes do pistão, isso acontece porque o magazine deve empurrar uma BBs antes que o pistão avance para efetuar o disparo.

A fim de detalhar ainda mais cada parte do ciclo de funcionamento da AEG, se destacam as figuras abaixo.

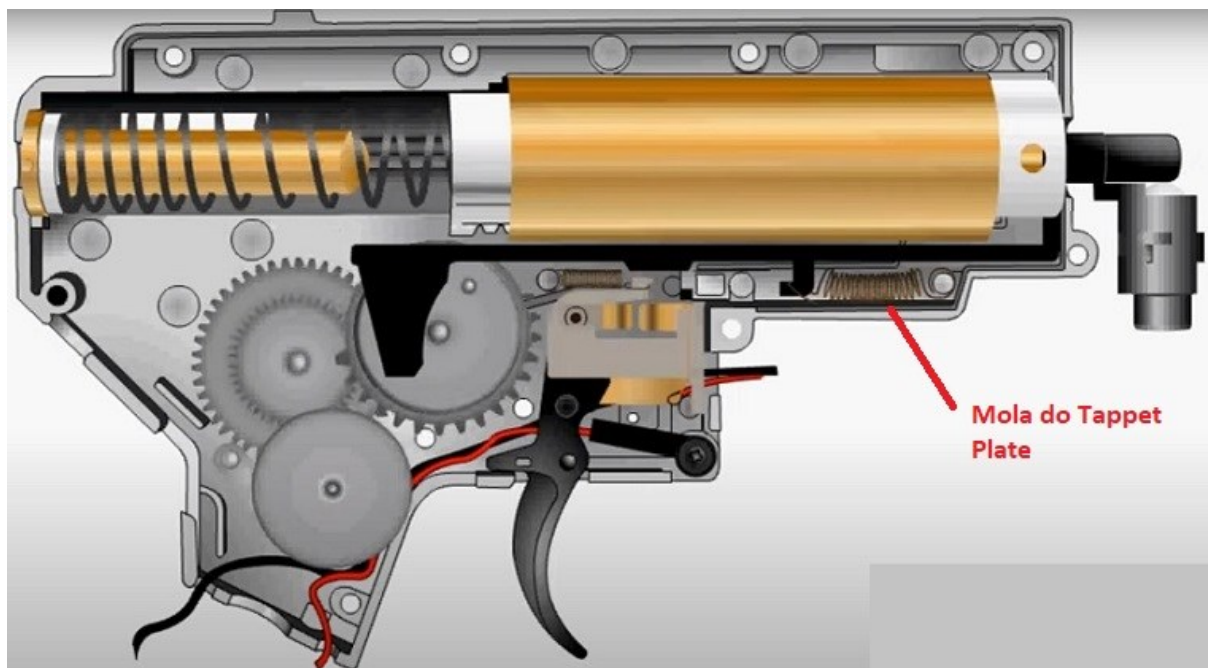


Figura 6: Ciclo de Funcionamento – Parte 1

Fonte: (MECHBOX, 2007)

Antes do gatilho ser acionado, todos os componentes se encontram na posição da Figura 6 acima, mola pré-tensionada, pistão encostado na cabeça do cilindro, *Nozzle* impedindo que a BBs suba para sua frente e mola do *Tappet Plate* relaxada.

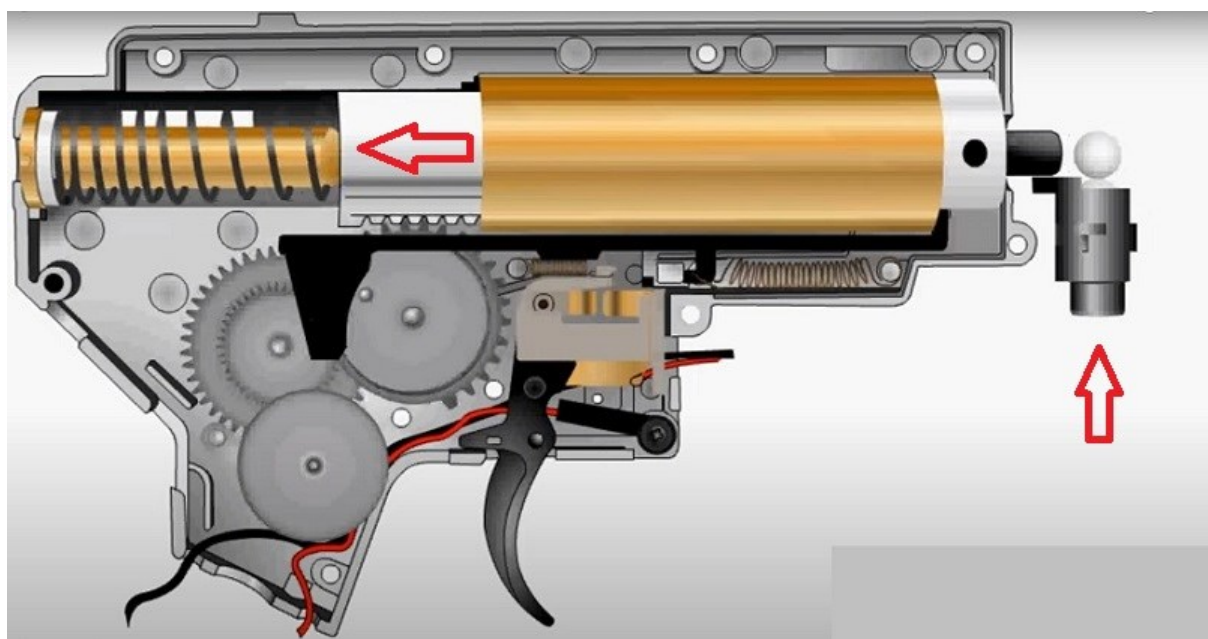


Figura 7: Ciclo de Funcionamento – Parte 2

Fonte: (MECHBOX, 2007)

Ao apertar e soltar o gatilho, uma conexão elétrica é fechada fazendo com que o motor gire, acionando todo o sistema de engrenagens. O pistão recua tensionando mais ainda a mola, criando um fluxo de ar para dentro do cilindro e o pino da *Sector Gear* move o *Tappet Plate* para traz, recuando o *Nozzle* que está acoplado no *Tappet Plate* e permitindo dessa maneira que o magazine coloque uma BBs em frente ao *Nozzle*. Observa-se agora que tanto a mola do *Tappet Plate* quanto a mola do pistão estão mais tensionadas que na Figura 6.

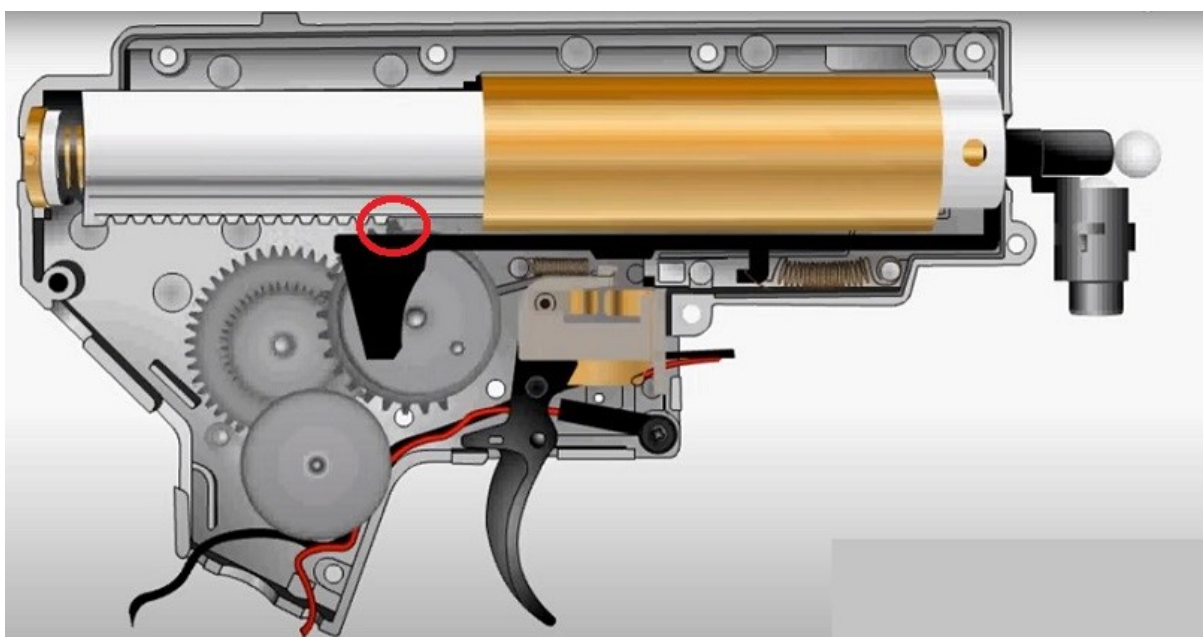


Figura 8: Ciclo de Funcionamento – parte 3

Fonte: (MECHBOX, 2007)

Considera-se a Figura 8 como sendo o final do ciclo da Figura 7, aonde destacado em vermelho, o último dente da *Sector Gear* que por um tempo muito pequeno, ainda sustenta toda a tensão causada pelo dente do pistão causada consequentemente pela mola. Nessa etapa, enquanto a mola está completamente comprimida, a mola do *Tappet Plate* está relaxada, pois o pino da *Sector Gear* já não o encosta mais e a BBs já se encontra em frente ao bocal, aonde todo o ar passará.

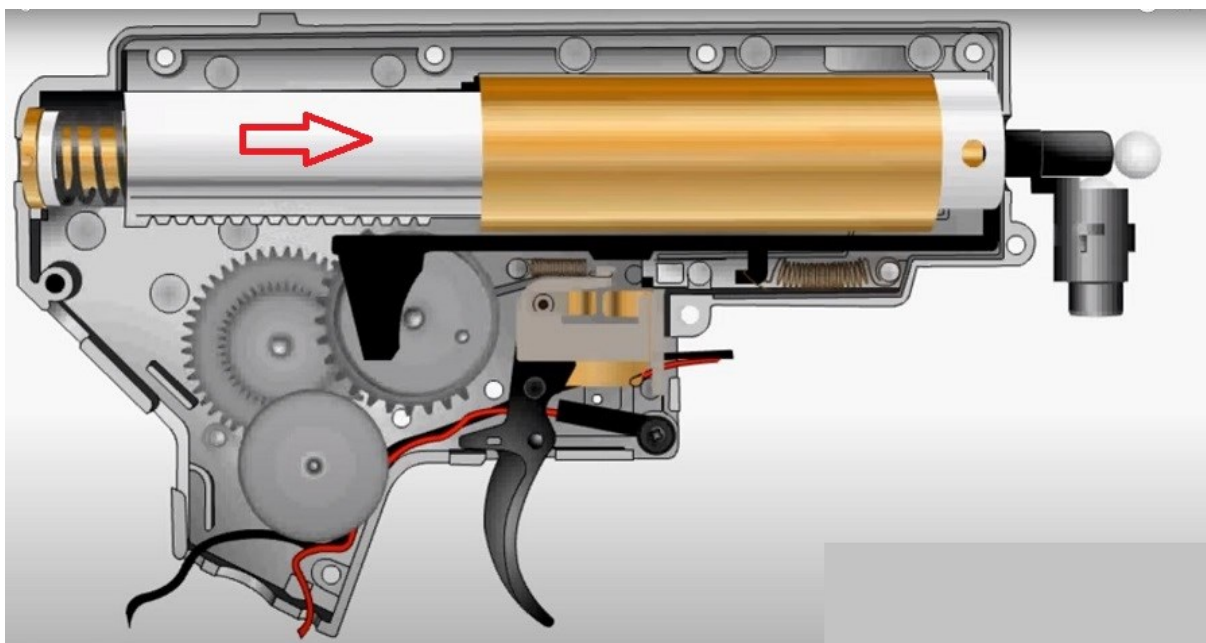


Figura 9: Ciclo de Funcionamento – Parte 4

Fonte: (MECHBOX, 2007)

Por fim, depois que o último dente da *Sector Gear* encosta no último dente do pistão, o pistão avança pela ação da mola e acelera para frente com grande velocidade, comprimindo o ar que se encontra dentro do cilindro que passa por um bocal convergente, adquirindo características de escoamento compressível. O pistão só finaliza o seu percurso quando encosta na cabeça do cilindro, que é seu batente mecânico.

3. SISTEMAS PNEUMÁTICOS

3.1. ARMAMENTO

A partir da explicação dos itens anteriores, foi possível perceber que se trata de um sistema que utiliza o ar como fluido de trabalho para disparar as BBs, portanto, estudar sobre os sistemas pneumáticos se torna importante para entender as equações que regem a modelagem do sistema.

Normalmente os sistemas pneumáticos envolvem compressibilidade, escoamento no qual existem variações significantes na massa específica do fluido. Os efeitos de compressibilidade surgem devido a grandes variações de velocidade, que por sua vez originam expressivas variações de pressão, levando a consideráveis variações de massa específica e temperatura. Segundo (FOX, MCDONALD e PRITCHARD) o escoamento pode ser considerado compressível quando $M^2 = \frac{\text{velocidade do escoamento}}{\text{velocidade do som no meio}} = \frac{v}{c} > 0,3$. Normalmente, em um jogo de *Airsoft*, as armas disparam as BBs com velocidade final entre 300 e 400 fps³ com BBs 0,20g, convertendo para o SI⁴ tem-se de 91,44 m/s a 121 m/s. Considerando uma temperatura de 30°C o valor da velocidade de propagação do som no ar é de 350 m/s, portanto, o número de Mach para as velocidades das BBs acima fica entre $M = \frac{91,44}{350} = 0,26$ e $M = \frac{121}{350} = 0,34$.

É importante destacar que o número de Mach encontrado é relativo à velocidade final das BBs, que depende fortemente de sua gramatura pois a velocidade do escoamento, é teoricamente a mesma, porque o sistema mecânico é único. Portanto, é razoável assumir que a velocidade do escoamento ao longo do cilindro e da cabeça do cilindro é maior que a velocidade final das BBs. Para ilustrar este fato, destaca-se a Tabela 1 a seguir.

² Número de Mach

³ Feet Per Second ou Pés por segundo – Grandeza Física.

⁴ Sistema Internacional de Unidades

Tabela 1: Velocidades de disparo em relação a gramatura da BBs

Fonte: Compilação do Autor

Gramatura(g)	Velocidade de disparo (m/s)	Velocidade de disparo (fps)	Energia (J)	Mach
0,30	96,60	316,93	1,40	0,28
0,28	100,00	328,08	1,40	0,29
0,25	105,83	347,21	1,40	0,30
0,20	118,32	388,19	1,40	0,34
0,12	152,75	501,15	1,40	0,44

A Tabela 1 foi construída supondo que uma AEG tem uma energia cinética do projétil de $1,4 J$. Essa energia é aceita em jogos de *Airsoft* no Brasil, com base em campos de *Airsoft* no exterior. Mantendo essa energia fixa e variando a gramatura do projétil, consegue-se perceber que a velocidade aumenta pois

$$v = \sqrt{\left(2 * \frac{Energia}{massa}\right)}$$

Dessa maneira é razoável assumir que quanto mais próximo da menor gramatura, mais perto se chega da velocidade real do escoamento. Todavia, essa velocidade pode depender fortemente de outros fatores, como por exemplo: comprimento do cano; volume do cilindro; volume morto do cilindro e diâmetro do cano. Como a Tabela 1 é uma tabela teórica, baseada na energia cinética, ao se calcular a velocidade para a gramatura $0g$, se chegará à velocidade teórica de escoamento como sendo infinita, o que não é real. O propósito da Tabela 1 e da explicação que a envolveu é demonstrar que o escoamento pode ser considerado compressível, pois para a menor gramatura de bolinhas possíveis de serem testadas, tem-se o valor de $M > 0,3$.

3.2. EQUACIONAMENTO

Quando se estuda compressibilidade de fluidos, muito se fala sobre variação de área em bocais convergentes e divergentes. Esses estudos têm por característica analisar variações de áreas sutis, geometrias que se assemelham a cones. Por outro

lado, o sistema da AEG possui uma redução abrupta de área que se pode observar no desenho 2D da Figura 10, abaixo, aonde o escoamento sai da área A_1 para área A_0 .

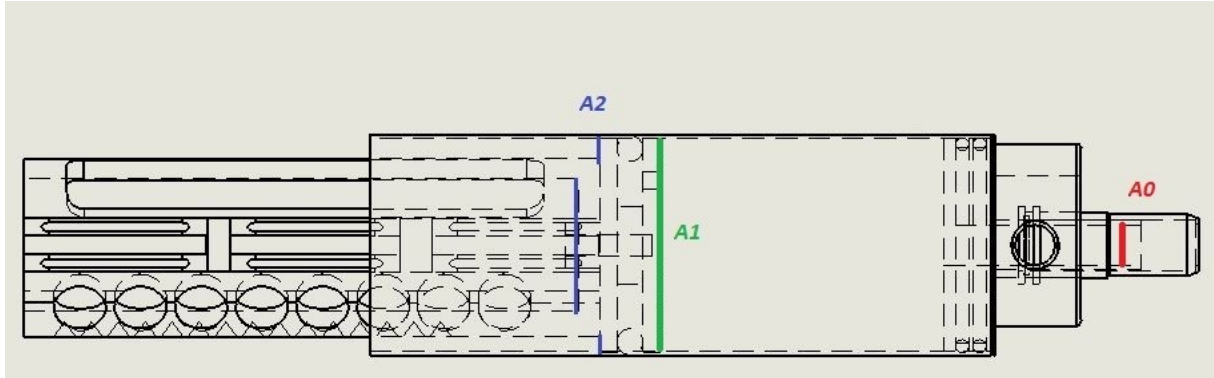


Figura 10: 2D pistão Cilindro – Diferença de áreas.

Fonte: (HALSOE, 2015)

Nesse caso, o sistema se aproxima muito de sistemas pneumáticos industriais, pois o mesmo trabalha com altas velocidades em escoamentos que passam por orifícios com variações abruptas de área. Assumindo o gás como sendo ideal e sofrendo uma expansão isentrópica (sem atrito e adiabática), através do orifício, tem-se as seguintes expressões para a vazão mássica de acordo com (KLUEVER, 2015).

$$w = C_d A_0 P_1 \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma - 1)RT_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (1)$$

$$w = C_d A_0 P_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_1} C_r^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}} \quad (2)$$

Para ajudar também no entendimento das equações, observe a Figura 11 abaixo:

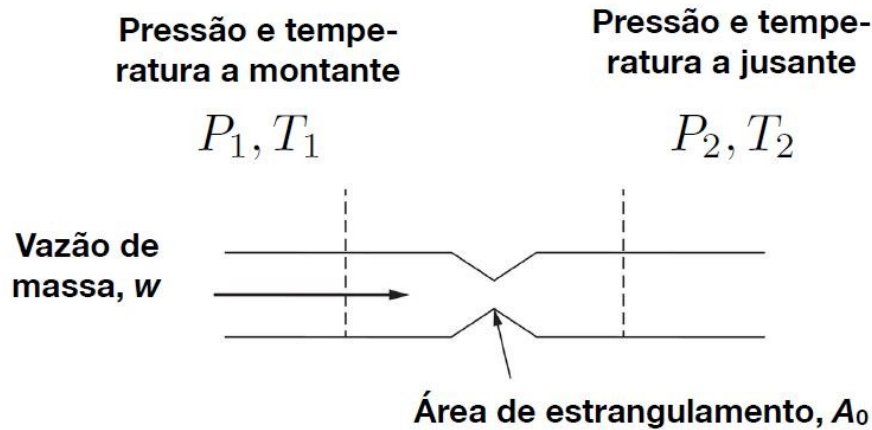


Figura 11: Pressões e Temperaturas – Jusante e Montante

Fonte: (KLUEVER, 2015)

na qual $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ é a razão dos calores específicos, para o ar $\gamma = 1,4$, C_d é o coeficiente de descarga associado a perdas no escoamento ao longo do orifício, R é a constante universal dos gases, T_1 e P_1 são respectivamente a temperatura e pressão a montante, T_2 e P_2 a temperatura e pressão à jusante e A_0 é a área do estrangulamento.

A utilização das equações acima, depende da razão $\frac{P_2}{P_1}$. Essa razão é justamente a diferença de pressões que causa o escoamento. Logo, se a razão $\frac{P_2}{P_1}$ for maior ou igual a C_r , onde C_r é:

$$C_r = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3)$$

O escoamento é dito desbloqueado, e nesse caso, utiliza-se a Equação (1), caso contrário o escoamento é dito bloqueado e utiliza-se a Equação (2). Para entender melhor sobre esses conceitos, destaca-se a Figura 12 abaixo.

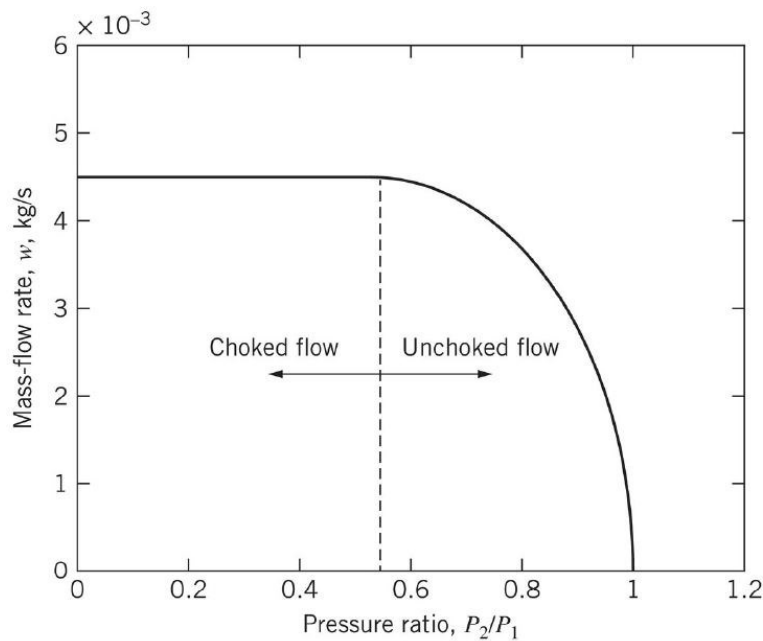


Figura 12: Gráfico fluxo de massa versus razão de pressão

Fonte: (KLUEVER, 2015)

Quando a razão $\frac{P_2}{P_1}$ é igual a 1, não existe escoamento através do bocal, pois só existe escoamento com diferença de pressão. Contudo, quando a pressão P_1 aumenta ou a pressão P_2 diminui a razão $\frac{P_2}{P_1}$ diminui, iniciando dessa forma o escoamento através do bocal. Conforme a razão $\frac{P_2}{P_1}$ diminui a vazão mássica aumenta, em forma de uma meia parábola até atingir um certo limite e esse limite é atingido quando $\frac{P_2}{P_1}$ é igual a C_r . Isso significa que por mais que se aumente P_1 ou diminua P_2 , a vazão mássica vai continuar constante, por isso existem duas possíveis equações para a tratativa desse tipo de escoamento.

Outra equação para a modelagem de sistemas pneumáticos é derivada a partir da conservação de massa em torno de um volume de controle.

$$w_{vc} = \sum w_{in} - \sum w_{out} \quad (4)$$

A massa total em um volume de controle (VC) em qualquer instante é constante e igual a $m_{vc} = \rho V$ e derivando em relação ao tempo se chega ao seguinte resultado:

$$w_{vc} = \dot{m}_{vc} = \dot{\rho}V + \rho\dot{V} \quad (5)$$

Relembrando conceitos de termodinâmica, o processo de expansão de um gás pode ser a temperatura constante (isotérmico), pressão constante (isobárico) ou a entropia constante (isoentrópico), que podem ser modelados através de um processo politrópico onde:

$$P = a\rho^n$$

Tomando a derivada no tempo do processo de expansão politrópico do gás, obtém-se:

$$\begin{aligned} \dot{P} &= an\rho^{n-1}\dot{\rho} \\ \dot{P} &= \frac{na\rho^n\dot{\rho}}{\rho} \\ \dot{\rho} &= \frac{\dot{P}\rho}{na\rho^n} \end{aligned} \quad (6)$$

Substituindo $P = a\rho^n$, tem-se que:

$$\dot{\rho} = \frac{\rho\dot{P}}{nP} \quad (7)$$

Substituindo a Equação (7) na Equação (5) e usando a lei ideal dos gases, onde $\rho = \frac{P}{RT}$, tem-se:

$$w_{vc} = \frac{V\dot{P}}{nRT} + \frac{P\dot{V}}{RT} = \sum w_{in} - \sum w_{out} \quad (8)$$

Como em sistemas pneumáticos, é de interesse avaliar a variação da pressão, rearrumando a Equação (8) se tem:

$$\dot{P} = \frac{nRT}{V} \left(w_{liq} - \frac{P\dot{V}}{RT} \right) \quad (9)$$

Na qual $w_{liq} = \sum w_{in} - \sum w_{out}$. A Equação (9) será de suma importância para avaliar a pressão dentro do cilindro, pois esta é a equação fundamental para a modelagem de sistemas pneumáticos.

4. MODELAGEM BASE

4.1. MODELO

Para a modelagem inicial do sistema descrito no capítulo 2, foi usado como base o sistema 4.20 do capítulo 4 do (KLUEVER, 2015) mostrado a seguir. A Figura 13 ilustra o sistema pneumático de uma embreagem de caminhões que, apesar de não ser o mesmo sistema da AEG, assemelha-se muito no que tange à redução abrupta entre a área (A_1) e a área de estrangulamento, como se pode perceber na Figura 13 e também na ordem de grandeza das áreas de estrangulamento entre os sistemas.

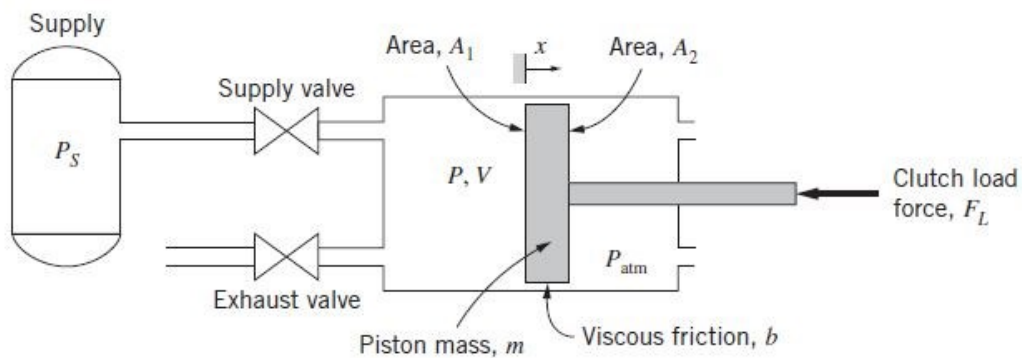


Figura 13: Modelo Base

Fonte: (KLUEVER, 2015)

Como visto, a Equação (9) descreve a pressão na câmara, porém, para modelar o sistema é preciso fazer algumas modificações, pois se observa na figura acima que o volume da câmara varia de acordo com a posição do pistão. Por isso $V = V_0 + A_1x$ e $\dot{V} = A_1v$.

$$\dot{P} = \frac{nRT_1}{V_0 + A_1x} \left(w_{liq} - \frac{P}{RT} A_1v \right) \quad (10)$$

w_{liq} depende do estado das válvulas de admissão e exaustão. Se a válvula de admissão estiver aberta, a variação da pressão dentro do cilindro aumenta, pois está havendo suprimento de ar para dentro do cilindro. Já com a válvula de exaustão

aberta, a variação de pressão dentro do cilindro diminui pois sai ar de dentro do cilindro. Portanto:

$$w_{liq} = w_{in} , \text{ se a válvula de admissão estiver aberta}$$

$$w_{liq} = -w_{out} , \text{ se a válvula de exaustão estiver aberta}$$

Na qual:

$$w_{in} = \begin{cases} C_d A_0 P_s \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)RT_1} \left[\left(\frac{P}{P_s}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P}{P_s}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} , \text{ se } \frac{P}{P_s} > C_r \\ C_d A_0 P_s \sqrt{\frac{\gamma}{RT_1} C_r^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}} , \text{ se } \frac{P}{P_s} \leq C_r \end{cases}$$

$$w_{out} = \begin{cases} C_d A_0 P \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)RT_1} \left[\left(\frac{P_{atm}}{P}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_{atm}}{P}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} , \text{ se } \frac{P_{atm}}{P} > C_r \\ C_d A_0 P \sqrt{\frac{\gamma}{RT_1} C_r^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}} , \text{ se } \frac{P_{atm}}{P} \leq C_r \end{cases}$$

Percebe-se que a única diferença entre as equações de w_{in} e w_{out} é justamente a razão de pressões que está dentro da raiz quadrada e a pressão que multiplica o termo da raiz quadrada. No caso em que há fornecimento de ar para o cilindro a pressão a montante é a pressão P_s e a pressão à jusante P . Já no caso em que há saída de ar de dentro do cilindro a pressão a montante é a pressão P e a pressão à jusante é a pressão P_{atm} .

Para o subsistema mecânico, pistão e forças que atuam no mesmo, será feito o diagrama de corpo livre e logo em seguida o somatório das forças. Observa-se a Figura 14 abaixo:

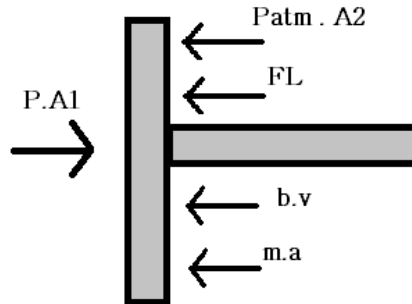


Figura 14: Diagrama de Corpo Livre

Fonte: Compilação do autor

$$\sum f_i = PA_1 - P_{atm}A_2 - F_L - bv - ma = 0$$

$$a = -\frac{b}{m}v + \frac{A_1}{m}P - \frac{A_2}{m}P_{atm} - \frac{F_L}{m} \quad (11)$$

Para modelar completamente o sistema, também se faz necessária a força da embreagem F_L , onde a mesma é uma função que depende da posição do pistão (x).

$$F_L = 4000[1 - \exp(-500x)] - 20000x \quad (12)$$

4.2. DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

Para implementar o modelo descrito acima, foi usado o software MATLAB juntamente com o SIMULINK e, para o mesmo, serão necessários os dados que estão destacados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Dados do Modelo Base

Fonte: (KLUEVER, 2015)

Nome variável	Valor	Unidade	Descrição
m	10	kg	Massa do pistão mais haste
b	2000	kg/s	Coeficiente de atrito viscoso
gamma	1,4		Razão de calores específicos
A1	0,0123	m ²	Área 1
A2	0,0115	m ²	Área 2
A0	7×10^{-6}	m ²	Área do estrangulamento
Cd	0,8		Coeficiente de descarga
V0	$1,48 \times 10^{-4}$	m ³	Volume inicial da câmara
n	1		Expoente da politrópica (Processo Isotérmico)
R	287	J / (kg K)	Constante universal dos gases
T	298	K	Temperatura da fonte
Patm	$1,013 \times 10^5$	Pa	Pressão atmosférica
Ps	$9,5 \times 10^5$	Pa	Pressão da fonte
P0	$Patm \times (A2/A0)$	Pa	Pressão inicial na câmara

A modelagem no MATLAB/SIMULINK foi dividida em subsistemas, cada subsistema a seguir é um conjunto de equações, um para a variação da pressão no interior do cilindro (\dot{P}), outro para a vazão mássica (w) e finalmente o último para a aceleração (a), que tem origem a partir do somatório de forças. Todos esses blocos interligados formam o sistema dinâmico e possibilitam que seja possível analisar as condições do sistema de acordo com entradas dadas. Essas entradas são sinais que representam abertura e fechamento das válvulas, se o sinal vale +1 significa que a válvula de admissão está aberta, se o sinal vale -1 significa que a válvula de exaustão está aberta e se o sinal vale 0 significa que ambas as válvulas estão fechadas.

4.2.1. Subsistema Variação da Pressão

O primeiro subsistema a ser apresentado é o subsistema da variação da pressão na câmara (\dot{P}). A Figura 15 abaixo ilustra exatamente a Equação (10), porém feita em diagrama de blocos.

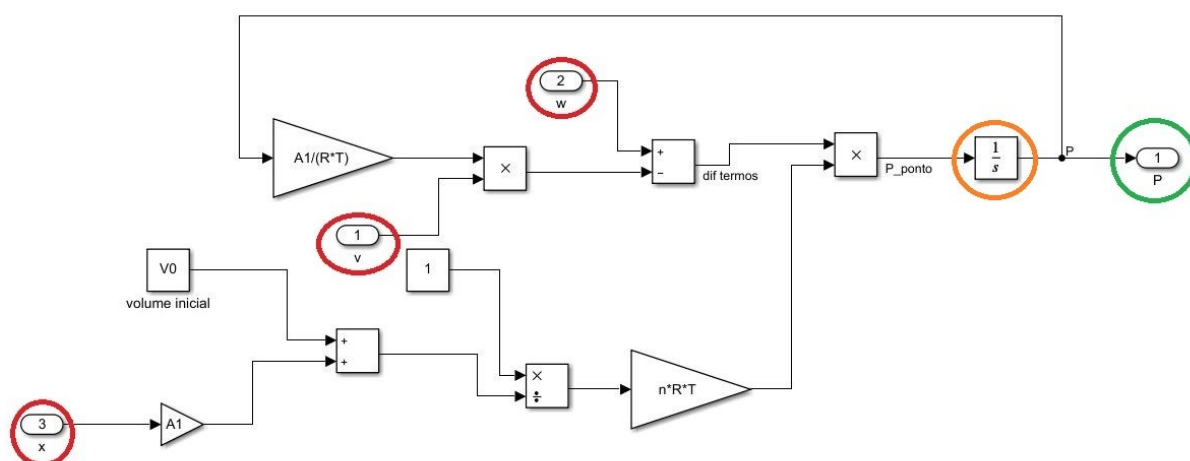


Figura 15: Subsistema Variação da Pressão

Fonte: Compilação do Autor

É possível observar a partir da Figura 15 acima e da Equação (10), que as entradas desse subsistema são as variáveis circuladas em vermelho, vazão mássica, velocidade do pistão e posição do pistão. A saída está circulada em verde, mas atenção, a saída não é a variação da pressão na câmara (\dot{P}) e sim a pressão na câmara, pois verifica-se que existe um bloco que integra o sinal da variação da pressão, destacado em laranja. É importante frisar que os outros valores, como: $A1, R, T, n, V0$ são as constantes do sistema, dados que podem ser vistos na Tabela 2.

4.2.2. Subsistema Vazão Mássica

O segundo subsistema a ser mostrado é o subsistema da vazão mássica (w), o mesmo está destacado na Figura 16 abaixo.

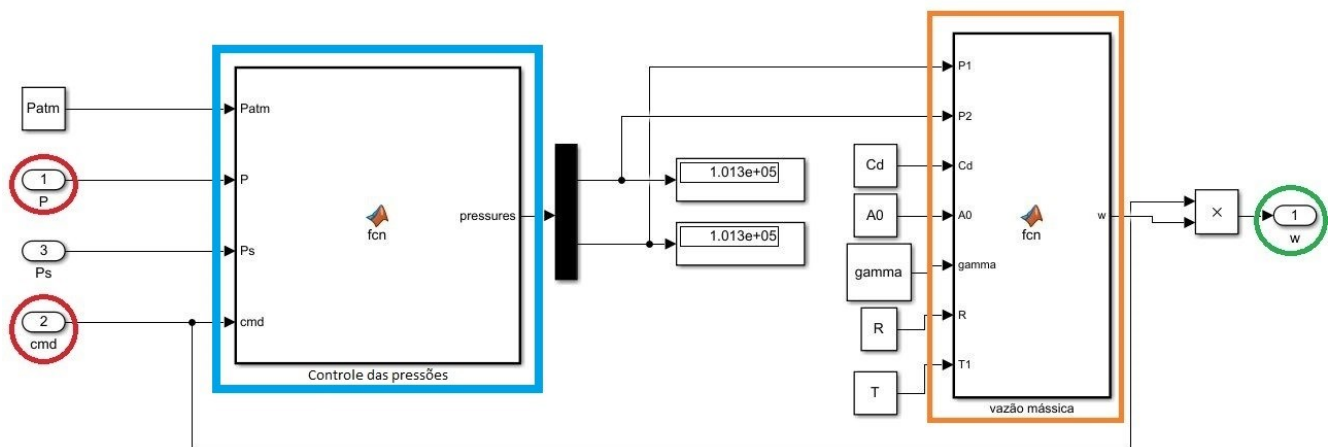


Figura 16: Subsistema Vazão Mássica – Modelo Base

Fonte: Compilação do Autor

Novamente, destacado em vermelho se tem as entradas do subsistema e em verde a saída do mesmo. Nesse caso, não é tão aparente a equação da vazão mássica, pois a mesma está “escondida” dentro da Matlab *Function*, destacada em laranja, conforme apêndice A.1.

Esse bloco contém o cálculo da vazão mássica, juntamente com a lógica para saber qual das duas equações de vazão mássica será utilizada. Vale ressaltar que as equações de vazão mássica dependem da razão $\frac{P_2}{P_1}$ ser maior que C_r ou menor ou igual ao mesmo. Também se observa que P_2 sempre será a pressão à jusante e P_1 a montante, a escolha dessas pressões será melhor explicada por meio do bloco de Controle das Pressões.

A Matlab *Function*, destacada em azul (Ver em A.2), representa uma função que lida com sinais de entrada. Se o valor do sinal de entrada, chamado cmd, for +1 o *output* da função é P e P_s significando que a válvula de admissão está aberta, se o valor do sinal de entrada for -1, a válvula de exaustão está aberta e a função tem seu *output* como sendo P_{atm} e P . Por fim, quando ambas as válvulas estão fechadas, com cmd valendo 0 o *output* da função é P_{atm} e P_{atm} .

Pode-se observar na Figura 16 que a saída da Matlab *Function* de controle das pressões é diretamente conectada à entrada da Matlab *Function* da vazão mássica

justamente nas pressões P_1 e P_2 isso por que quando a válvula de admissão está aberta, por exemplo, a pressão a montante é a pressão P_s e a pressão à jusante é a pressão P . Nesse caso, o bloco de Controle das Pressões retornará um vetor com os valores das pressões em questão, como se observa na linha 4 do código no apêndice A.2 e as conexões mostradas Figura 16 farão com que a pressão P_s seja conectada à entrada P_1 e P seja conectada a entrada P_2 da Matlab *Function* de vazão mássica.

4.2.3. Subsistema Aceleração

Por fim, para o subsistema mecânico/aceleração se destaca a Figura 17 abaixo.

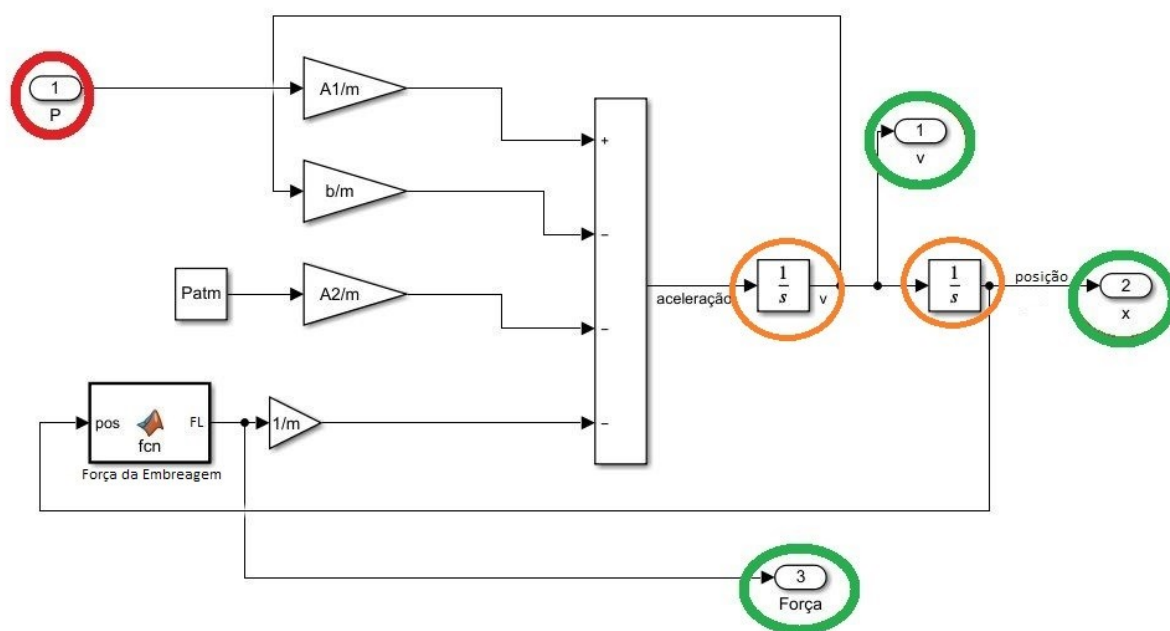


Figura 17: Subsistema Aceleração

Fonte: Compilação do Autor

Da mesma maneira, a entrada está destacada em vermelho e as saídas, em verde. A Equação (11) é a equação montada em forma de diagrama de blocos onde sua saída é a aceleração pistão, contudo, o sinal da aceleração do pistão não se faz necessário para interação com os demais blocos. Por isso é necessário integrar uma vez para obter a velocidade do pistão e integrar pela segunda vez para resultar na posição do pistão, os blocos integradores foram destacados em laranja. A Equação

(12) foi escrita dentro da Matlab *Function* identificada no apêndice A.3, onde sua entrada é a posição do pistão (pos) e saída a força FL.

4.2.4. Sistema Completo

Na Figura 18 abaixo, pode-se observar o sistema completo, com todos os subsistemas explicados anteriormente devidamente conectados entre si e mais dois conjuntos de blocos que não foram explicados anteriormente. O conjunto de blocos destacado em amarelo é a entrada do sistema, o cmd, como comentado anteriormente e o bloco destacado em roxo, é o *scope*, ele irá mostrar os gráficos gerados, nele se colocam as variáveis de interesse a serem analisadas.

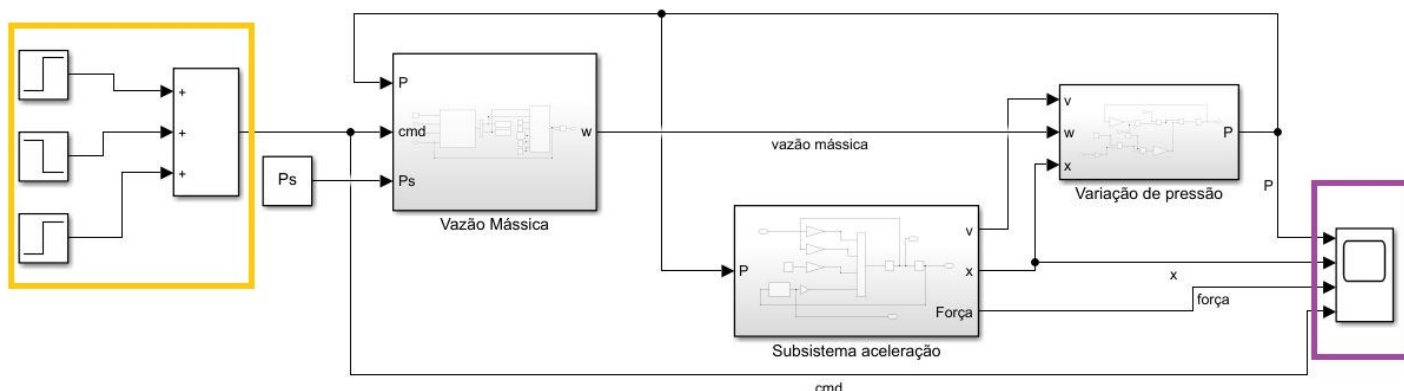


Figura 18: Sistema Completo

Fonte: Compilação do Autor

4.2.5. Resultados

Pode-se observar que quando a válvula de admissão está aberta, entre 0s e 0,1s (segundo gráfico da Figura 20) a pressão, a força e a posição dentro do cilindro sobem, o que já era de se esperar, pois a pressão proveniente do tanque está gerando uma força no pistão, induzindo dessa maneira, um deslocamento no mesmo para a direita e por conseguinte aumentando a força da embreagem. Porém, entre o segundo 0,1 e o segundo 0,2 quando a válvula de exaustão é aberta e a de admissão fechada se observa uma queda na pressão e na posição do pistão (Figura 19) significando que ele está se deslocando para a esquerda, isso se deve ao fato da pressão no interior do cilindro (P) ser maior que a pressão do meio externo P_{atm} gerando assim, um

escoamento para fora do cilindro. No final, quando ambas as válvulas estão fechadas, tem-se P_{atm} a montante e à jusante, por isso não há mais escoamento e as variáveis tendem a se estabilizar após frações de segundo.

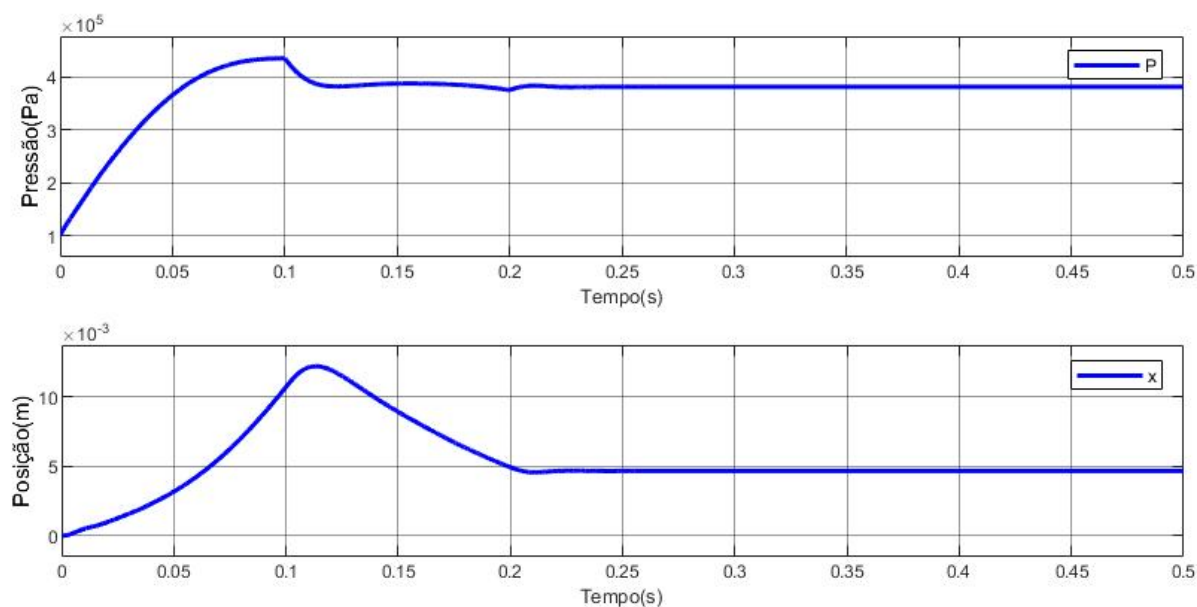


Figura 19: Gráfico Pressão na Câmara e Posição do Pistão – Modelo Base

Fonte: Compilação do Autor

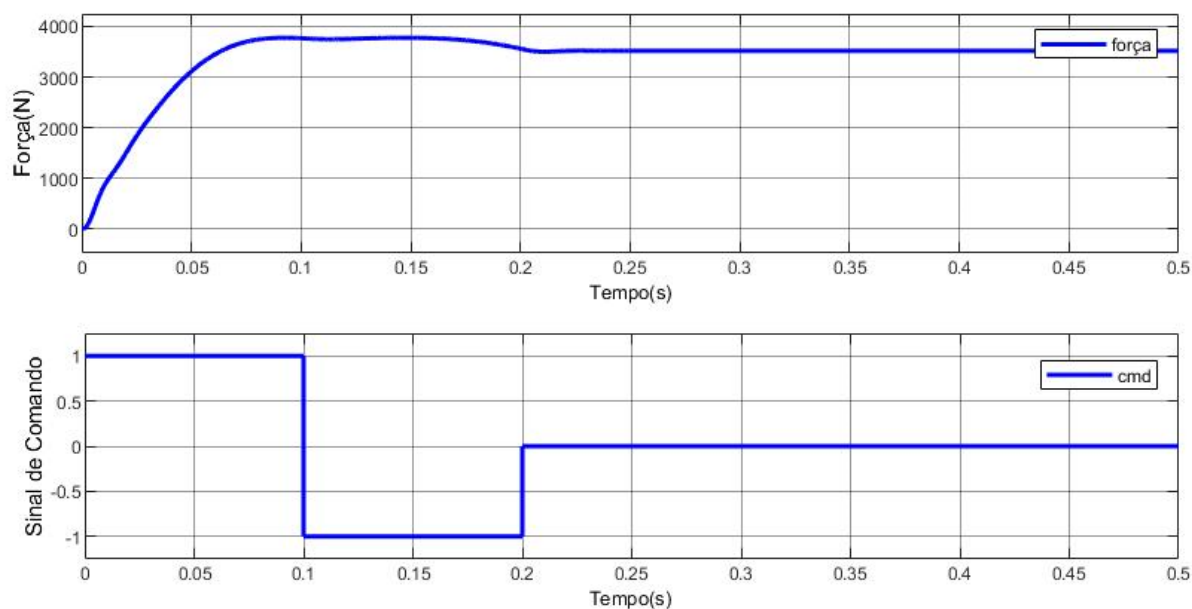


Figura 20: Gráfico Força e Sinal de Comando – Modelo Base

Fonte: Compilação do Autor

5. MODELO AEG PRIMÁRIO

Agora que já foi visto e explicado o modelo base na seção anterior, precisa-se adaptar o mesmo para as condições mecânicas do armamento a ser estudado. O sistema da AEG possui uma válvula que faz o papel de ambas as válvulas mostradas na Figura 13, substituindo tanto a (*Supply valve*) quanto a (*Exhaust valve*). O sistema não possui o tanque (*Supply*) e o pistão na Figura 13 não está submetido à força causada pela embreagem (*Cluth load force*) e sim pela força causada pela ação da mola. Portanto, com as adaptações acima, pode-se chegar na Figura 21 abaixo que representa o sistema da AEG.

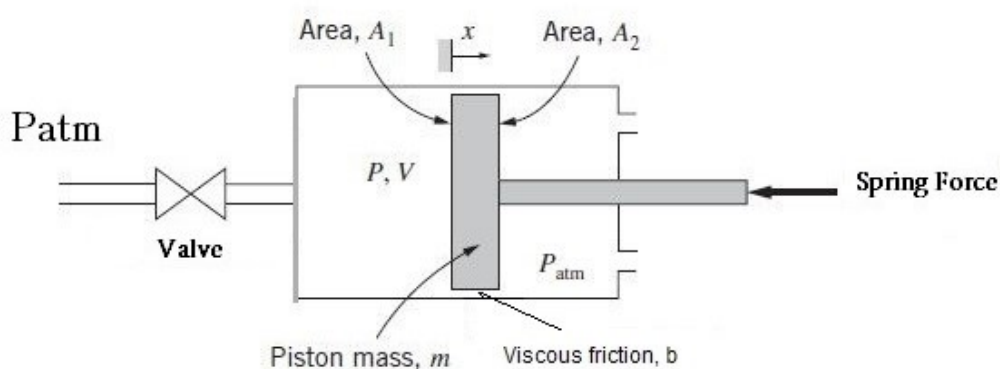


Figura 21: Modelo Base – Adaptado

Fonte: (KLUEVER, 2015)

Também é importante destacar as diferenças de funcionamento entre o sistema explicado anteriormente e o modelo da AEG. No exemplo do (KLUEVER, 2015) o pistão recuava devido ao crescimento da pressão no interior do cilindro, no caso a ser estudado a engrenagem puxa para trás o pistão através do motor, e outro ponto importante é que o pistão ele não para devido ao equilíbrio de pressões dentro do cilindro e sim porque ele chega em seu final de curso, batendo na cabeça do cilindro.

Para entender melhor o desenho esquemático acima, destaca-se desenho 2D do modelo real da uma AEG (Figura 22) abaixo com as devidas áreas e eixo de referência já destacados para guiar a modelagem do sistema.

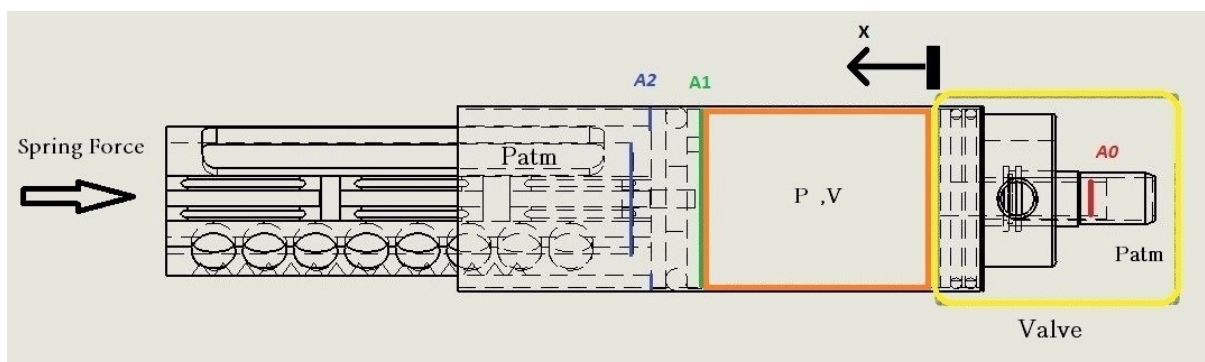


Figura 22: 2D Pistão – Cilindro – Cabeça do Cilindro – Nozzle

Fonte: (HALSOE, 2015)

As áreas A_1 (destacada em verde) e A_2 (destacada em azul) são analogamente, as mesmas áreas mostradas na Figura 21, a área A_0 apesar de não estar evidenciada na Figura 21 é a área de estrangulamento do escoamento. A cabeça do cilindro será modelada como a válvula (valve) destacado na figura em amarelo, pois é nela que ocorre o estrangulamento do escoamento e em laranja a câmara com ar a ser comprimida pelo pistão. Finalmente P é a pressão dentro do cilindro e P_{atm} é a pressão após a cabeça do cilindro.

5.1. PREMISSAS ASSUMIDAS

Para a modelagem primária, algumas premissas foram assumidas:

- 1- Para fins de um modelo dinâmico, pode-se considerar que os componentes estão sujeitos a deformações infinitesimais que podem ser desprezadas, pois o objetivo desta análise é puramente dinâmico, portanto, para o caso a ser modelado, serão considerados corpos rígidos, isto é, as distâncias dos pontos em um mesmo corpo, permanecem constantes.
- 2- Como não é possível medir a velocidade do escoamento ao longo da cabeça do cilindro, a velocidade do escoamento a ser considerada é a velocidade de disparo da BBs de gramatura 0,12g, sendo essa a menor gramatura existente no mercado para as BBs de *Airsoft*. Como se trata da modelagem de um armamento real, consegue-se medir a velocidade da BBs com um equipamento chamado cronógrafo. Até a presente modelagem, não foram medidas as

velocidades de disparo com BBs 0,12g com o armamento a ser modelado, porém já se tem uma previsão, como mostrado na Tabela 1.

- 3- O disparo da BBs ocorre quando o pistão chega em seu final de curso, essa é uma boa premissa para uma primeira análise, pois como o armamento tem uma cadência de aproximadamente 22 disparos por segundo o tempo de disparo de um projétil depois do aperto do gatilho vale $\frac{1}{22} = 0,04545s$, ou seja, é um tempo muito curto.
- 4- O escoamento a ser considerado é um escoamento isentrópico, sem atrito e troca de calor, cujo expoente da politrópica vale $n = 1,4$. Essa consideração é interessante, tendo em vista que o escoamento acontece de maneira muito rápida como mostrado na premissa 3 e os componentes possuem dimensões pequenas.
- 5- Não foi considerada na modelagem o subsistema mecânico do pistão e forças que atuam no mesmo.
- 6- Não foi considerada a Equação (1) para o cálculo da vazão mássica durante o recuo do pistão pela ação do motor.

5.2. MODELO COMPUTACIONAL

Para implementar o modelo descrito acima, foi usado o software MATLAB juntamente com o SIMULINK. Para o mesmo, serão necessários os dados que estão destacados na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3: Dados do Modelo Primário

Fonte: Compilação do Autor

Nome variável	Valor	Unidade	Descrição
gamma	1,4		Razão de calores específicos
A1	$4,37 \times 10^{-4}$	m ²	Área 1
A0	$16,62 \times 10^{-6}$	m ²	Área do estrangulamento
Cd	0,8		Coeficiente de descarga
V0	1×10^{-6}	m ³	Volume inicial da câmara
n	1,4		Expoente da politrópica (Processo isentrópico)
R	287	J / (kg K)	Constante universal do gases
T	298	K	Temperatura a montante
Patm	$1,013 \times 10^5$	Pa	Pressão atmosférica
rho	1,1839	kg / m ³	Densidade do ar a 25°C

Verifica-se que há menos dados do que no modelo base mostrado na Tabela 2, isso porque, nesse caso não está sendo modelado o pistão e as forças que atuam no mesmo. Alguns valores nesse caso também são diferentes nos destacados anteriormente, como os valores para as áreas A0 e A1, as mesmos correspondem aos valores reais das áreas no armamento. Vale destacar que para fins de modelagem, o valor de V0 deveria ser $0m^3$ pois o pistão começa o ciclo encostado na cabeça do cilindro, porém se V0 fosse igual a $0m^3$, matematicamente existiria um erro de divisão por 0. Observe o termo que divide o termo entre parênteses na Equação (10), $V_0 + A_1x$, como $x = 0m$ em $t = 0s$, se V_0 fosse $0m^3$ o modelo teria uma divisão por 0 e o mesmo não faria o cálculo das variáveis nem sequer para o instante 0s. O valor de V0 escolhido é o suficiente para não afetar nos resultados da modelagem.

5.2.1. Subsistema Vazão Mássica.

Em primeiro lugar, foi colocado o bloco que representa a vazão mássica (w), mantendo a lógica, as variáveis destacadas em vermelho correspondem às entradas do sistema, e em verde a saída do mesmo as outras que não foram circuladas são as constantes do modelo.

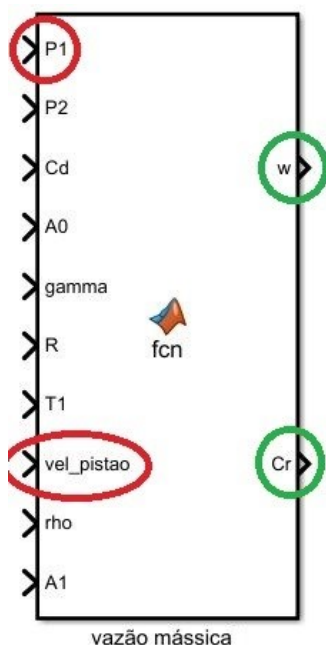


Figura 23: Bloco da Vazão Mássica – Modelo Primário

Fonte: Compilação do autor

Pode-se reparar que a velocidade do pistão, a área A_1 e a densidade ρ não fazem parte dos dados necessários das Equações (1) e (2), mas o motivo de estarem presentes será explicado abaixo.

Dentro desse bloco, tem-se um código (ver apêndice A.4) que rege a sua lógica juntamente com o cálculo da vazão mássica e o cálculo de C_r para que o programa saiba quando usar qual das duas equações de vazão mássica e isso ocorre através da segunda sentença lógica “if” / “else”.

Além disso, pode-se observar que as equações de vazão mássica vistas anteriormente só serão utilizadas quando o pistão estiver em direção a direita, ou seja, quando sua velocidade for menor que zero, de acordo com o sistema de referências adotado na Figura 22. Isso porque quando o pistão está recuando, ele está “puxando” ar para dentro do cilindro, através do bocal, porém não de forma a causar compressibilidade no escoamento, nesse caso em bocal divergente (área A_0 para área A_1). Portanto, quando o pistão está recuando a equação para a vazão mássica é dada por $w = \rho \times vel_{pistao} \times A_1$, observa-se que esse tratamento ocorre na primeira sentença lógica “if” / “else”. Os sinais de (-) na frente das duas primeiras equações de

vazão mássica remetem ao que foi explicado no modelo base relacionado a w_{in} e w_{out} .

Outra observação importante a ser feita no cálculo da vazão mássica é que para a razão $\frac{P_2}{P_1}$ ser diferente da unidade ou qualquer valor muito próximo a ela, teve de ser adicionado um valor arbitrário de 50 unidades a P_1 para que dessa maneira o valor dentro da raiz não fosse negativo ou zero. Em termos de modelagem e de resultado final, esse valor é pequeno, pois as pressões de trabalho são na ordem da pressão atmosférica para cima, ou seja, $\geq 101,3 \times 10^3 [Pa]$.

5.2.2. Subsistema Variação da Pressão

O subsistema que permaneceu inalterado em relação ao modelo base para o modelo primário foi o subsistema variação da pressão, portanto, a explicação anterior vale também para o modelo primário.

5.2.3. Entrada do Sistema

No modelo primário, será dedicada uma seção para explicar sobre a entrada do sistema. Diferentemente do que foi visto anteriormente, neste modelo a entrada é a posição do pistão, que varia entre $0mm$ e $58,50mm$, valores esses retirados do valor real do armamento, como se pode ver na Figura 24 e Figura 25 adiante.

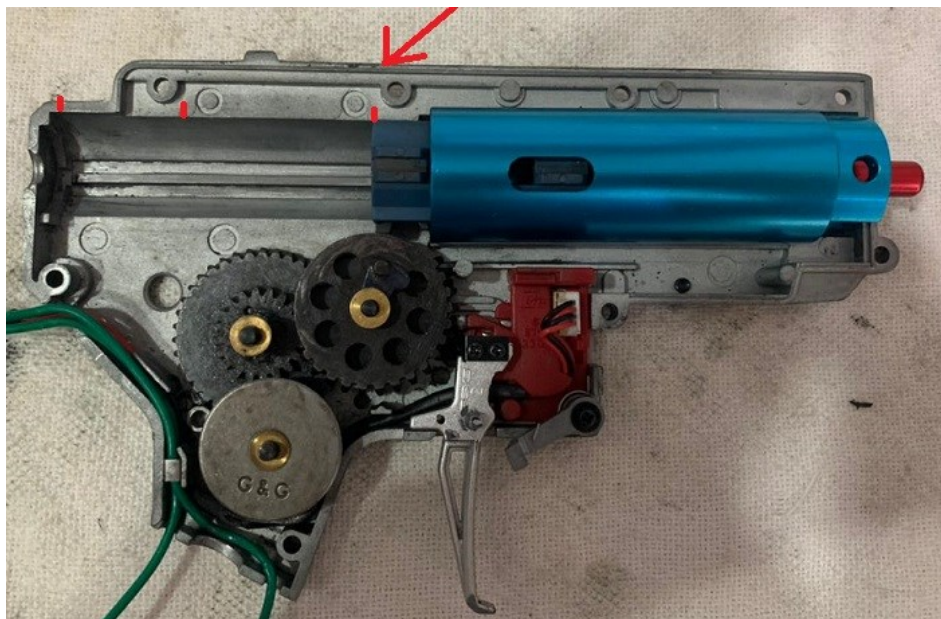


Figura 24: Posição do Pistão $x = 0\text{mm}$

Fonte: Compilação do Autor



Figura 25: Posição do Pistão $x = 58,5\text{mm}$

Fonte: Compilação do Autor

Para realizar essa medida, marcou-se em vermelho a posição inicial do pistão, posteriormente a posição final do mesmo e a distância foi medida com um paquímetro.

Com a distância entre a posição inicial e final do pistão juntamente com a velocidade de recuo do pistão, consegue-se calcular o tempo de recuo do mesmo,

contudo, será necessário medir o raio de contato da *Sector Gear* com os dentes do pistão, que foi considerado o raio interno, pois o mesmo é mais fácil de ser mensurado manualmente e comparado com o desenho 3D disponível. O valor do raio interno medido com um paquímetro foi de $13,54mm$ já o disponível no desenho do (HALSOE, 2015) foi de $13,6mm$ como os valores são muito próximos, pode-se considerar que a medida é confiável, tendo isso em vista, será utilizado o valor de $13,54mm$. Além do valor do raio interno da *Sector Gear*, também será necessário o valor da velocidade angular da *Sector Gear*, que vale: $\omega = 22 \frac{rotações}{s} \times 60s = 1320rpm$, isso porque está sendo considerado que a arma realiza 22 disparos por segundo. Por fim, para calcular a velocidade linear da *Sector Gear*, basta realizar o seguinte cálculo:

$$\begin{aligned} v &= \omega \times r \\ \omega &= 1320 \frac{\pi}{30} rad/s \\ r &= 13,54mm \\ v &= 1871,6mm/s \end{aligned}$$

Portanto, o tempo necessário para o pistão recuar é:

$$t = \frac{58,5mm}{1871,6mm/s} = 0,03125s$$

É razoável pensar que o tempo para o pistão avançar é o tempo total subtraído do tempo de recuo do pistão $0,04545s - 0,03125s = 0,0142s$, portanto, tal fato não se revela verdadeiro, pois o pistão encosta em seu final de curso antes da engrenagem estar preparada para puxar o pistão novamente. Logo, o tempo de disparo é igual ao tempo de recuo do pistão mais o tempo de avanço do pistão acrescido ainda do tempo em que a *Sector Gear* leva para engrenar novamente ao pistão depois que o mesmo chega em seu final de curso pela ação da mola. Para chegar nos dois últimos valores da soma acima, basta ter a constante elástica da mola, com a mesma, descobre-se a velocidade de avanço e a partir daí o tempo de avanço, depois o tempo ocioso, pois o mesmo é a variável que resta.

$$t_{disparo} = t_{recuo} + t_{avanço} + t_{ocioso} \quad (13)$$

Para a modelagem primária, o tempo de avanço será considerado o tempo de disparo menos o tempo de recuo, pois até o presente momento não se tem o valor da constante elástica da mola. Tendo isso em vista, percebe-se que o modelo está sobre dimensionando o tempo de avanço, o que consequentemente subdimensiona a velocidade de avanço e, por fim, altera os dados que dependem da velocidade de avanço do pistão.

5.2.4. Sistema Completo

Na Figura 26 abaixo, pode-se observar o sistema completo, com todos os subsistemas explicados anteriormente devidamente conectados entre si. A entrada do sistema contextualizada na seção anterior e o bloco que deriva à entrada transformando o sinal em velocidade, estão destacados em amarelo e os demais blocos em roxo são os blocos necessários para fazer o *plot* da velocidade do escoamento na área de estrangulamento, que vale $v_{esc} = \frac{w}{\rho A_0}$ e a razão de pressões para comparar com o valor de C_r .

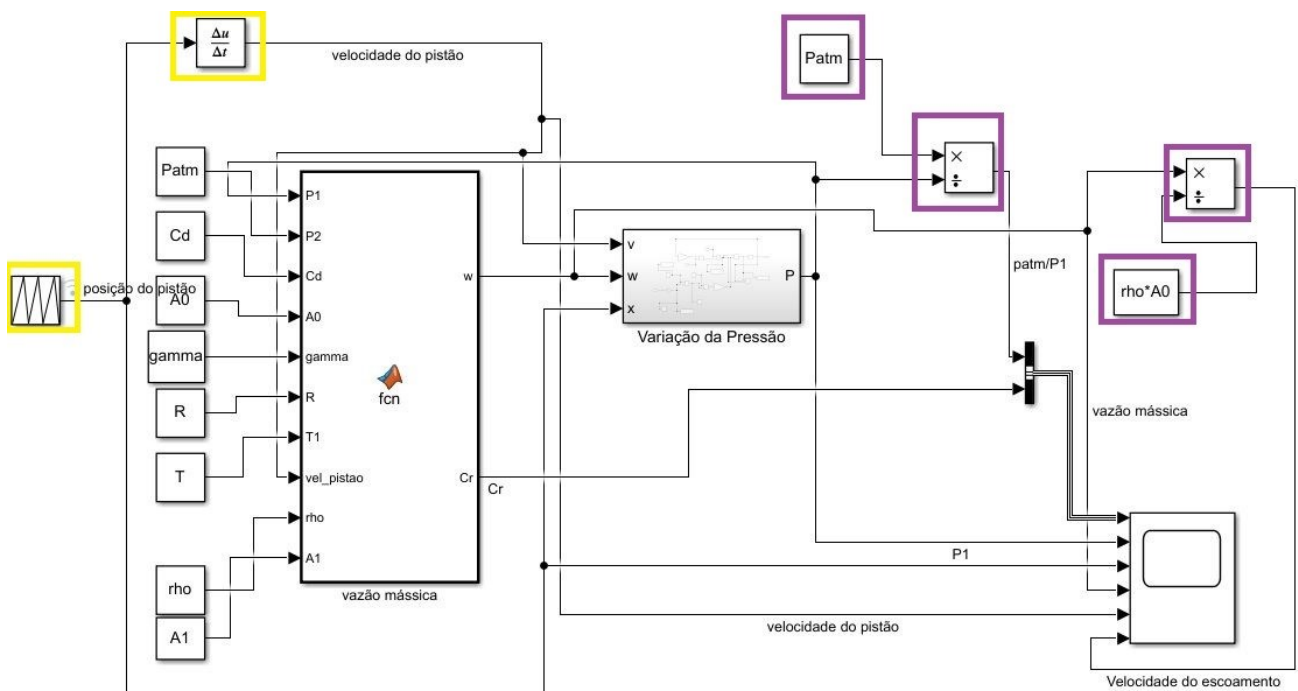


Figura 26: Sistema Completo – Modelo Primário

Fonte: Compilação do Autor

5.2.5. Resultados

Pode-se observar que a simulação foi feita para o intervalo de tempo de um segundo, na Figura 27 se observa vinte e dois ciclos de recuo e avanço da posição do pistão dentro dessa janela de tempo, o que já era de se esperar, pois a entrada foi proposital para que isso acontecesse.

Analisando qualitativamente os gráficos, pode-se observar que o comportamento dos mesmos têm coerência com o sistema mecânico, tendo em vista que quando o pistão se desloca para a direita a pressão no interior do cilindro sobe, como se observa no gráfico da Figura 28, a razão de pressões cai, porém não atinge o valor de C_r , como se observa na Figura 29, a vazão mássica aumenta, pois a velocidade do pistão aumenta como mostrado na Figura 30 e Figura 31 respectivamente e por essa razão a velocidade do escoamento aumenta, como se pode ver na Figura 32. Já quando o pistão se desloca para a esquerda, todas as variáveis seguem o sentido contrário, a pressão dentro do cilindro cai, a razão de pressões aumenta, a vazão mássica diminui e consequentemente a velocidade do escoamento também.

Analisando o sistema quantitativamente, pode-se observar que o gráfico da velocidade do escoamento possui a mesma ordem de grandeza do valor que foi visto na tabela Tabela 1, porém não está próximo ao valor da velocidade da BBS de 0,12g, isso porque a velocidade do escoamento está subdimensionada, pois a velocidade de avanço do pistão está subdimensionada, como mencionado anteriormente. A velocidade de avanço do pistão está diretamente ligada à variação da pressão como se pode observar na Equação (10) e por conseguinte, a pressão está ligada à vazão mássica, como se observa na Equação (1).

Outra análise quantitativa que pode ser feita, diz respeito à pressão de estagnação do sistema. Trata-se da pressão que a câmara atinge quando o pistão chega ao seu final de curso. Novamente, utilizando a última linha da tabela Tabela 1, o valor de Mach vale 0,44, entrando na tabela E.1 de escoamento isentrópico do (FOX,

MCDONALD e PRITCHARD) com o valor de Mach = 0,44 , o valor de $\frac{P}{P_0}$ que no caso estudado corresponde a $\frac{P_{atm}}{P_0}$ vale 0,8755, portanto o valor de P_0 vale:

$$\frac{P_0}{P_{atm}} = 1,1422$$

$$P_0 = 1,1422 \times 101,3 \times 10^3 = 115,7 kPa$$

No gráfico da Figura 28 o valor encontrado para pressão de estagnação é o valor no ponto mais alto do gráfico, que é próximo ao valor calculado através da pressão de estagnação.

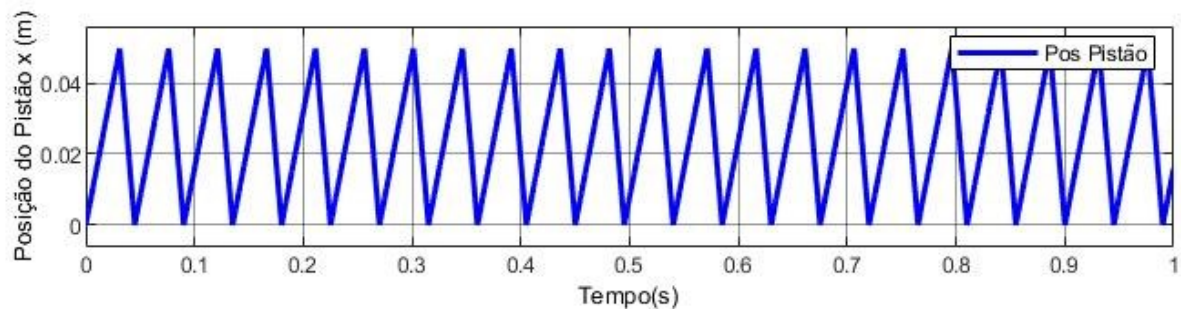


Figura 27: Gráfico Posição do Pistão – Modelo Primário

Fonte: Compilação do Autor

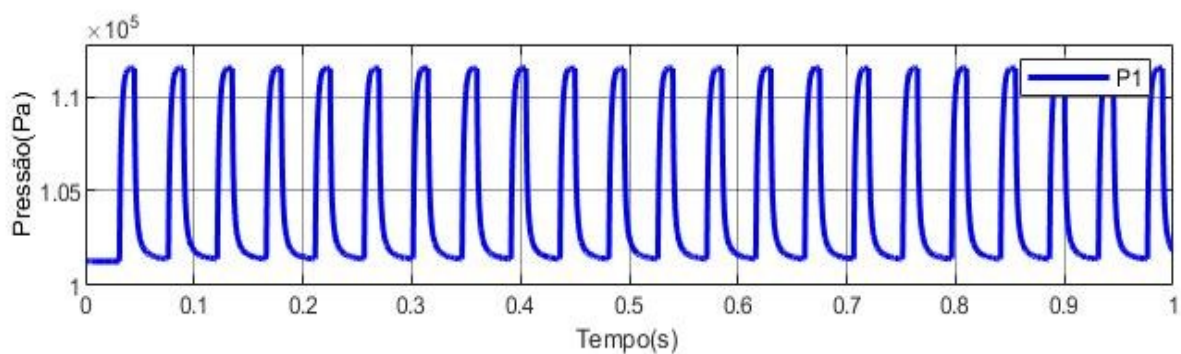


Figura 28: Gráfico Pressão na Câmara – Modelo Primário

Fonte: Compilação do Autor

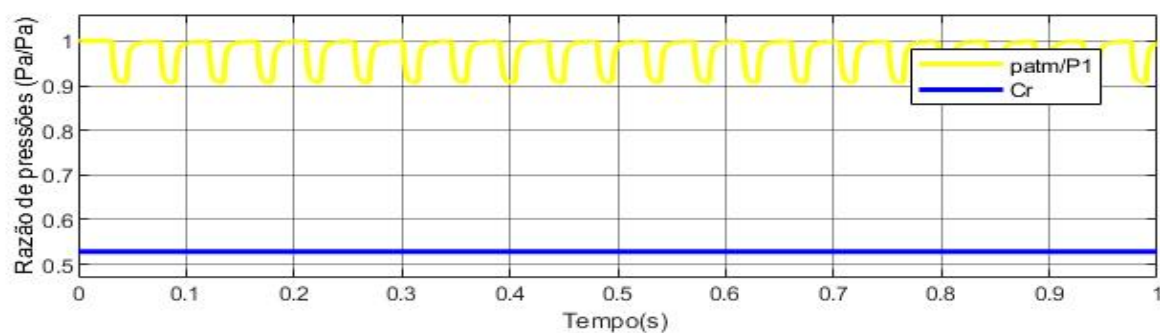


Figura 29: Gráfico Razão de Pressões – Modelo Primário

Fonte: Compilação do Autor

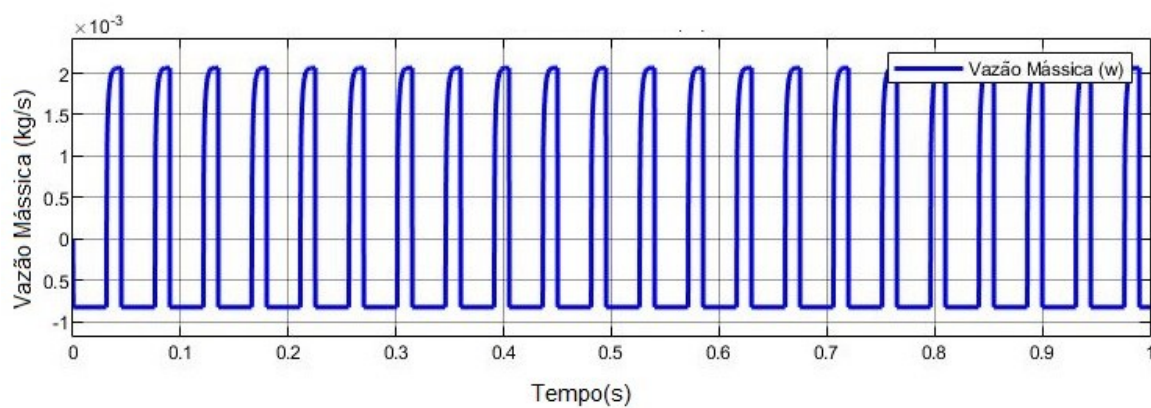


Figura 30: Gráfico Vazão Mássica – Modelo Primário

Fonte: Compilação do Autor

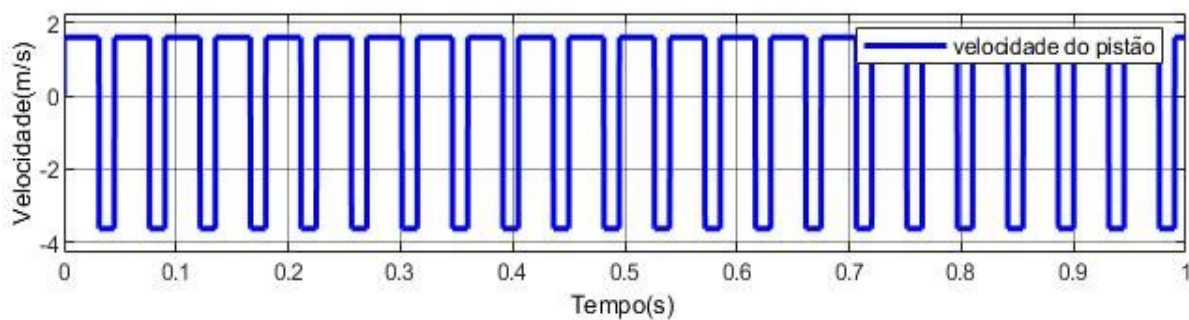


Figura 31: Gráfico Velocidade do Pistão – Modelo Primário

Fonte: Compilação do Autor

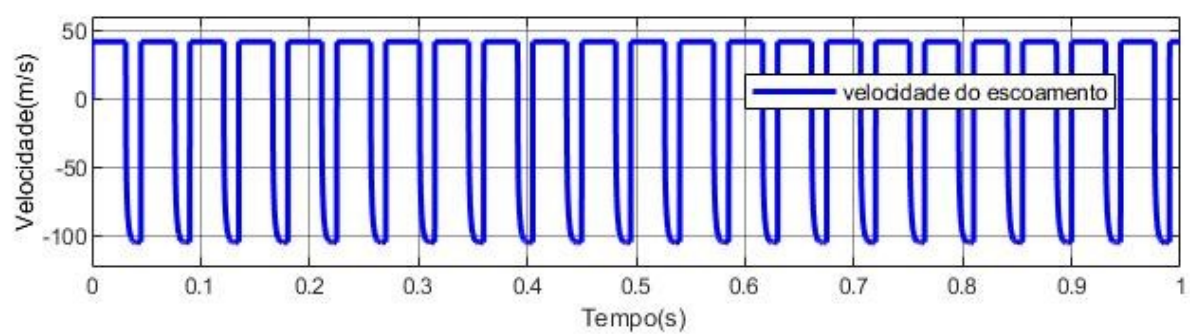


Figura 32: Gráfico Velocidade do Escoamento – Modelo Primário

Fonte: Compilação do Autor

6. CONSTANTE ELÁSTICA DA MOLA

Como o valor da constante elástica da mola não é disponibilizado pelo fabricante e a mesma é de suma importância para o modelo da AEG, realizou-se um projeto de um aparelho no *SolidWorks* e após isso o mesmo foi impresso em uma impressora 3D para calcular experimentalmente a constante elástica da mola.

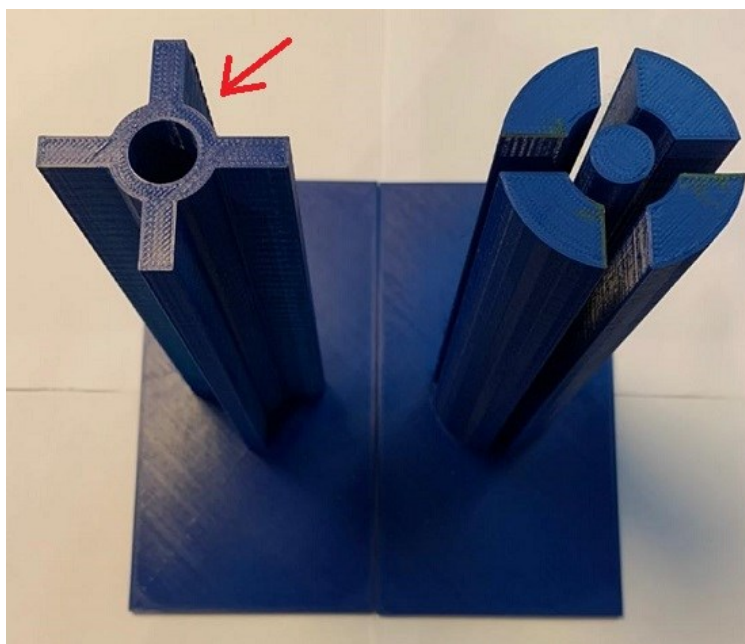


Figura 33: Aparato experimental

Fonte: Compilação do Autor

O aparelho tem a sua geometria simples, mas projetada para evitar ao máximo imperfeições na medição da constante elástica como, por exemplo, o cilindro interno onde a mola é encaixada, assinalado com uma seta vermelha, tem seu diâmetro próximo ao diâmetro da mola para evitar que a mesma flambe. Outro ponto a se destacar é que as duas peças se encaixam de modo que uma tenha equilíbrio em relação à outra durante o experimento e, por último, ambas foram lixadas para evitar que o atrito interfira na medição da constante elástica.

Para o experimento, foram utilizados pesos calibrados do laboratório de mecânica dos fluidos do Instituto Militar de Engenharia (IME) e assim obtidos dados experimentais da deformação da mola pela força que estava sendo exercida na mesma, observa-se abaixo a Figura 34 e Figura 35, que mostram o aparato

experimental sem a mola em seu interior e em seguida com a mola em seu interior e os pesos em cima.

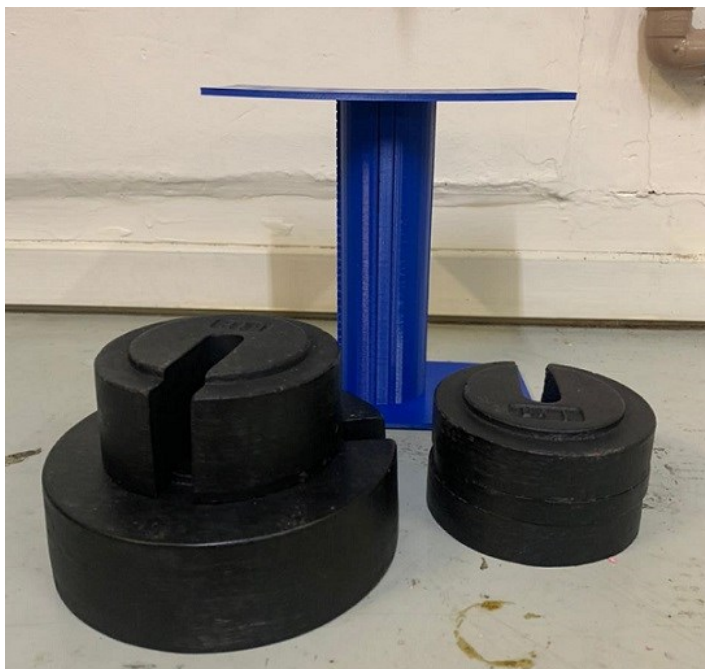


Figura 34: Aparato Experimental e Pesos Utilizados

Fonte: Compilação do Autor



Figura 35: Aparato Experimental –
Realização da Medição

Fonte: Compilação do Autor

Alterando a massa que estava exercendo a força sobre a mola com os pesos calibrados e somando com a massa da base azul, que vale $0,127\text{kg}$, tem-se os valores da massa e da força exercida na mola, juntamente com a deformação referente, na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Dados Experimentais para Cálculo do K da mola

Fonte: Compilação do Autor

Deformação (m)	Massa (kg)	Força (N)
0,0195	1,127	11,05587
0,027	1,627	15,96087
0,036	2,127	20,86587
0,044	2,627	25,77087
0,0495	3,127	30,67587
0,059	3,627	35,58087
0,067	4,127	40,48587
0,075	4,627	45,39087
0,085	5,127	50,29587
0,0975	6,127	60,10587
0,1195	7,127	69,91587
0,128	8,127	79,72587
0,136	9,127	89,53587

Sabe-se que a força da mola respeita a Lei de Hooke onde:

$$F = Kx \quad (14)$$

Essa é uma função linear onde o coeficiente angular é justamente a constante elástica da mola que multiplica a deformação da mesma. Utilizando o Microsoft Excel para plotar os pontos experimentais e aproximando uma reta por mínimos quadrados, assim como forçando o coeficiente linear ser igual a zero, tem-se o seguinte resultado mostrado na Figura 36, na qual $615,9\text{ N/m}$ é a constante elástica da mola.

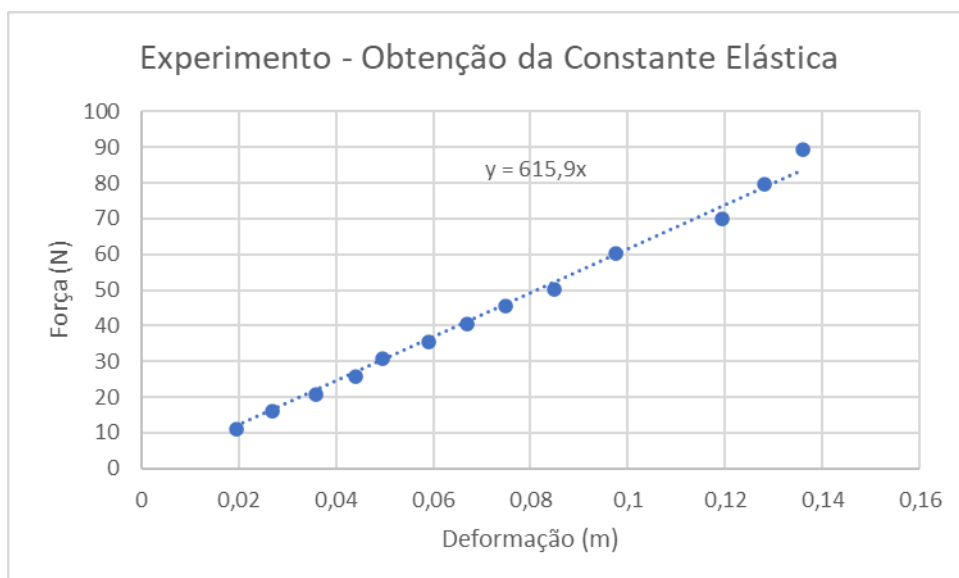


Figura 36: Gráfico Obtenção da Constante Elástica da Mola

Fonte: Compilação do Autor

7. MODELAGEM AEG FINAL

Para a modelagem final, está sendo considerada apenas o avanço do pistão, pois é durante o avanço do mesmo que se obtém informações relevantes para estudar o disparo da BBs. Um ponto que não foi abordado na modelagem primária, mas para o modelo final é de considerável relevância é o volume morto, este nada mais é do que um volume que não é comprimido pelo pistão. Pode-se observar que entre a posição do pistão em $x = 58,5mm$ mostrado na Figura 25 e a posição do pistão em $x = 36mm$ mostrado na Figura 37 existe um rasgo no cilindro, o mesmo é colocado nesse ponto propositalmente, de modo a impedir que a pressão dentro do cilindro cresça mais que a pressão atmosférica. Portanto, o aumento da pressão dentro do cilindro somente é verificada para $x < 36mm$.

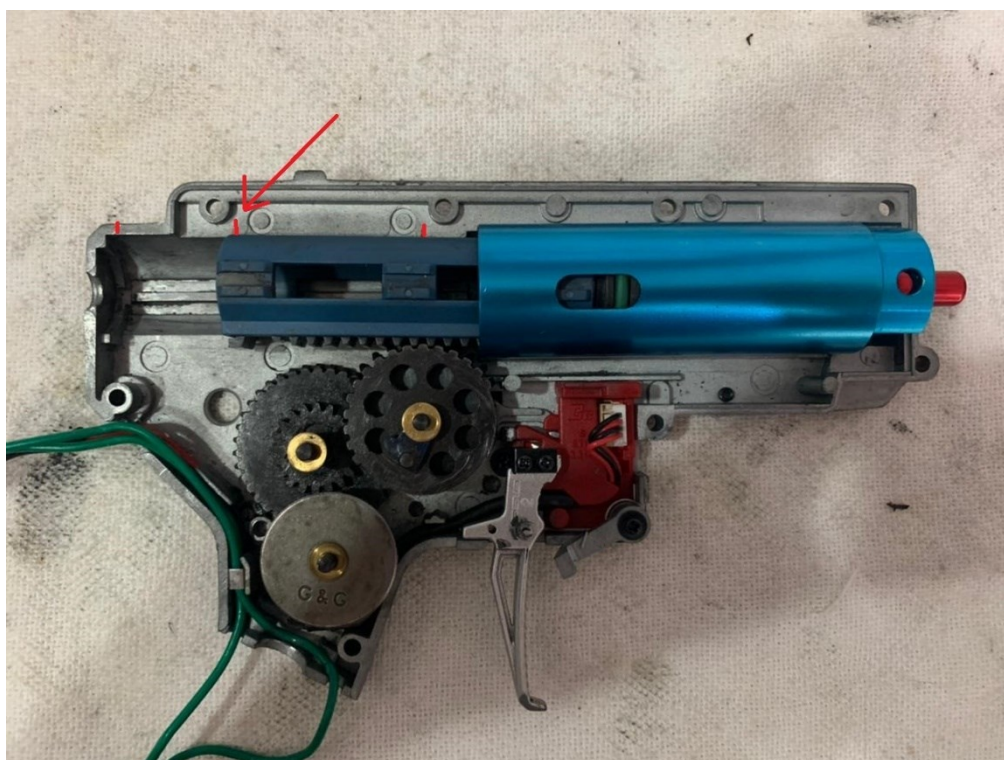


Figura 37: Posição do Pistão $x = 36mm$

Fonte: Compilação do Autor

Para a presente modelagem, fez-se valer o que foi analisado acerca da Figura 21 e Figura 22 no modelo primário. No que diz respeito às premissas assumidas para o modelo primário descritas no capítulo 5.1, para o presente modelo, mantém-se o que foi assumido na premissa 1 e 4. Com relação às premissas 2 e 3, ambas serão discutidas ao longo do modelo final. A premissa 5, por sua vez, passa a ser inválida,

pois no modelo final é considerado o pistão e forças que atuam no mesmo, assim como a premissa 6, pois, nesse caso, está sendo modelado somente o avanço do pistão.

7.1. MODELO COMPUTACIONAL

Para implementar o modelo final, utilizou-se o software MATLAB juntamente com o SIMULINK. Para os mesmos, serão necessários os dados que estão descritos na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Dados do Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

Nome variável	Valor	Unidade	Descrição
gamma	1,4		Razão de calores específicos
m	$19,52 \times 10^{-3}$	kg	Massa do pistão mais cabeça do pistão
b	0,1	kg/s	Coeficiente de atrito viscoso
A1	$4,37 \times 10^{-4}$	m ²	Área 1
A0	$16,62 \times 10^{-6}$	m ²	Área do estrangulamento
A2	$3,61 \times 10^{-4}$	m ²	Área 2
Cd	0,8		Coeficiente de descarga
V0	1×10^{-6}	m ³	Volume inicial da câmara
n	1,4		Expoente da politrópica (Processo isentrópico)
D_cano	$6,08 \times 10^{-3}$	m	Diâmetro interno do cano
A_cano	$2,9033 \times 10^{-5}$	m ²	Área da seção transversal do cano
R	287	J / (kg K)	Constante universal dos gases
T	298	K	Temperatura a montante
k	615	N/m	Constante elástica da mola
Patm	$1,013 \times 10^5$	Pa	Pressão atmosférica
rho	1,1839	kg / m ³	Densidade do ar a 25°C

Vale destacar que dentre todos os modelos mostrados ao longo deste trabalho, esse é o modelo que possui mais dados. Vale registrar que as variáveis m, A0, A1, A2, D_cano e k são informações reais dos componentes do armamento. Além disso, as explicações dadas para V0 nos dados do modelo primário, também valem para o modelo final, ou seja, visam evitar erros de divisão por zero no programa, por isso foi adotado $V0 \neq 0$. Apesar de existir um coeficiente de atrito viscoso, tem-se em mente

que o mesmo é muito pequeno, tendo em vista que não existe uma película grande de filme de fluido entre o pistão e a carcaça da *Gear Box* e entre a cabeça do pistão e o cilindro, por isso o coeficiente de atrito viscoso foi considerado $0,1 \text{ kg/s}$.

7.1.1. Subsistema Vazão Mássica

Em primeiro lugar, colocou-se o bloco que representa a vazão mássica (w), o mesmo está inserido dentro do subsistema Vazão mássica.

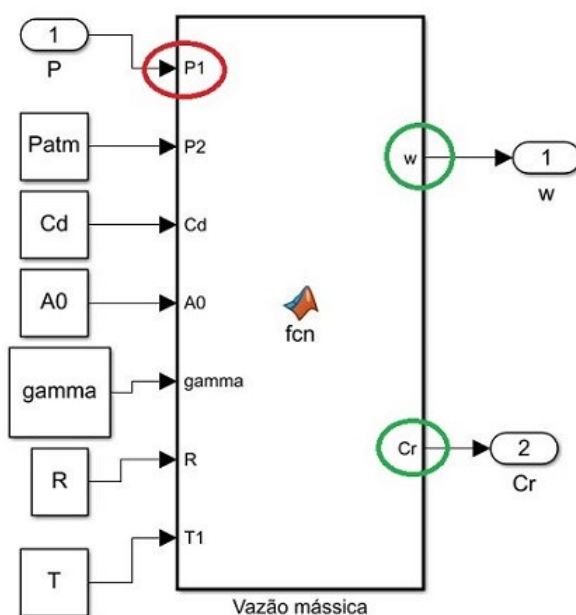


Figura 38: Subsistema Vazão Mássica – Modelo final

Fonte: Compilação do Autor

O que está circulado em vermelho é a entrada do subsistema, o que está circulado em verde é a saída do mesmo e o que não foi circulado são as constantes do modelo apresentadas na Tabela 5. Para o caso do modelo final, não se tem como constantes, desse subsistema, a velocidade do pistão, a área $A1$ nem a densidade do ar, pois, para esse caso, não será tratado o recuo do pistão.

Dentro desse bloco, tem-se o código (ver apêndice A.5) que rege a sua lógica juntamente com o cálculo da vazão mássica e o cálculo de C_r . O mesmo se difere do que foi visto no modelo primário, pois para este, existe uma lógica tratada na segunda sentença de “if” / “else”, que elimina a possibilidade de existirem números negativos

dentro da raiz quadrada, não sendo mais necessário adicionar 50 Pa como foi feito para o modelo primário.

7.1.2. Subsistema Variação da Pressão

O subsistema de Variação da pressão é o mesmo que o do capítulo 4.2.1 para o modelo base. Todo o raciocínio feito anteriormente também vale para o modelo atual, porém com duas ressalvas. A primeira foi a adição de uma Matlab *Function*, chamada Controle da Pressão, (ver apêndice A.6) que impede que a pressão seja menor que a pressão atmosférica dentro do cilindro, o que vai de acordo com a física do problema. A segunda, foi a adição de uma Matlab *Function*, que reseta o integrador, (ver apêndice A.7) quando a posição do pistão passa a ser menor do que 36mm, pois como dito anteriormente, existe um volume morto na qual o pistão não comprime o ar dentro do cilindro, por isso, o integrador que calcula a pressão dentro do cilindro precisa ser resetado para sua condição inicial, que é a pressão atmosférica. Portanto, para $x < 36mm$ a Matlab *Function* Reset do Integrador enviará um sinal de valor constante igual a 1 para o integrador e ele resetará. Destaca-se essas funções em roxo na Figura 39 abaixo.

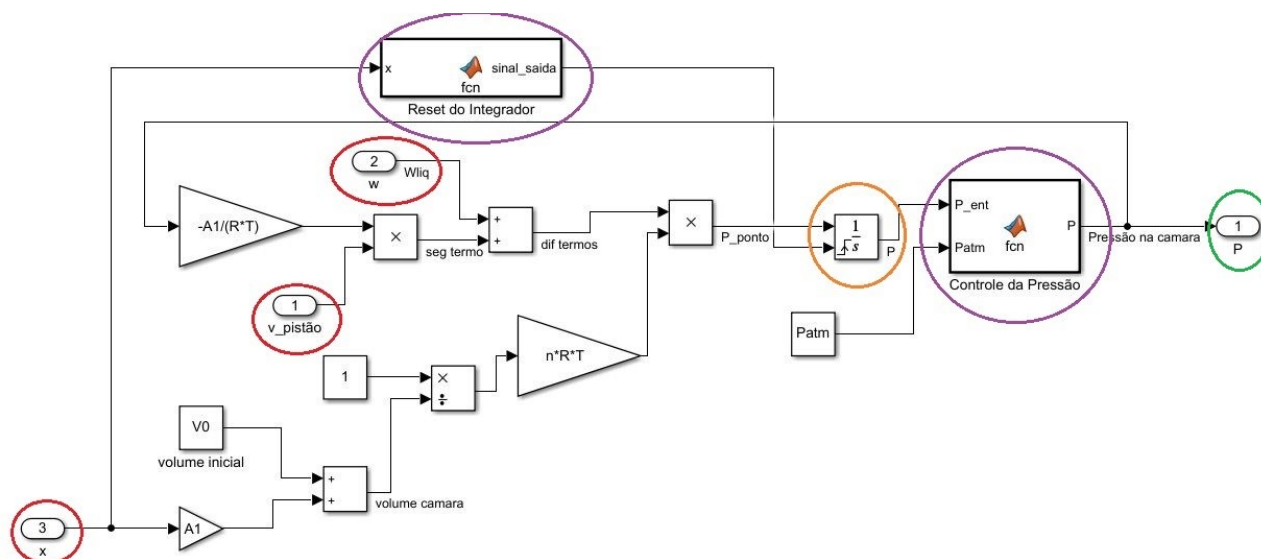


Figura 39: Subsistema Variação da pressão – Modelo final

Fonte: Compilação do Autor

7.1.3. Subsistema Modelagem Pistão

Para o subsistema mecânico (pistão e forças que atuam no mesmo), será desenvolvido o somatório das forças a partir do diagrama de corpo livre. Diferentemente do modelo base, para esse caso é necessário adicionar a força causada pela pré-carga na mola, que não foi necessária para o modelo base destacado na Figura 14.

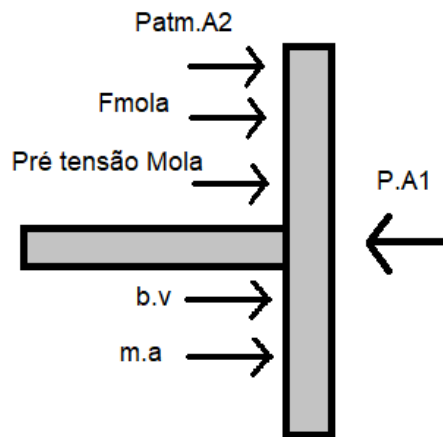


Figura 40: Diagrama de Corpo Livre – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

Na Figura 40 acima, tem-se as forças que atuam no pistão, vale lembrar que o eixo de referências está para a esquerda, basta observar a Figura 22. As diferenças entre o modelo base e o modelo da AEG e algumas ressalvas importantes são discutidas no capítulo 5 , onde a Figura 21 e Figura 22 são de extrema importância para entender o que foi discutido e adotado. Para o diagrama de corpo livre mostrado, tem-se o seguinte somatório de forças.

$$\sum f_i = PA_1 - P_{atm}A_2 - F_{mola} - bv - ma - F_{pré-tensão} = 0 \quad (15)$$

$$a = -\frac{b}{m}v + \frac{A_1}{m}P - \frac{A_2}{m}P_{atm} - \frac{k \cdot x}{m} - \frac{0,062 \cdot k}{m}$$

Onde 62mm é a deformação da mola antes da mesma ser comprimida pela *Sector Gear*, ou seja, é a deformação da pré-carga na mola. Para descrever esse

sistema, destaca-se o diagrama de blocos da Figura 41 abaixo, que nada mais é do que a equação (15) acima em diagrama de blocos.

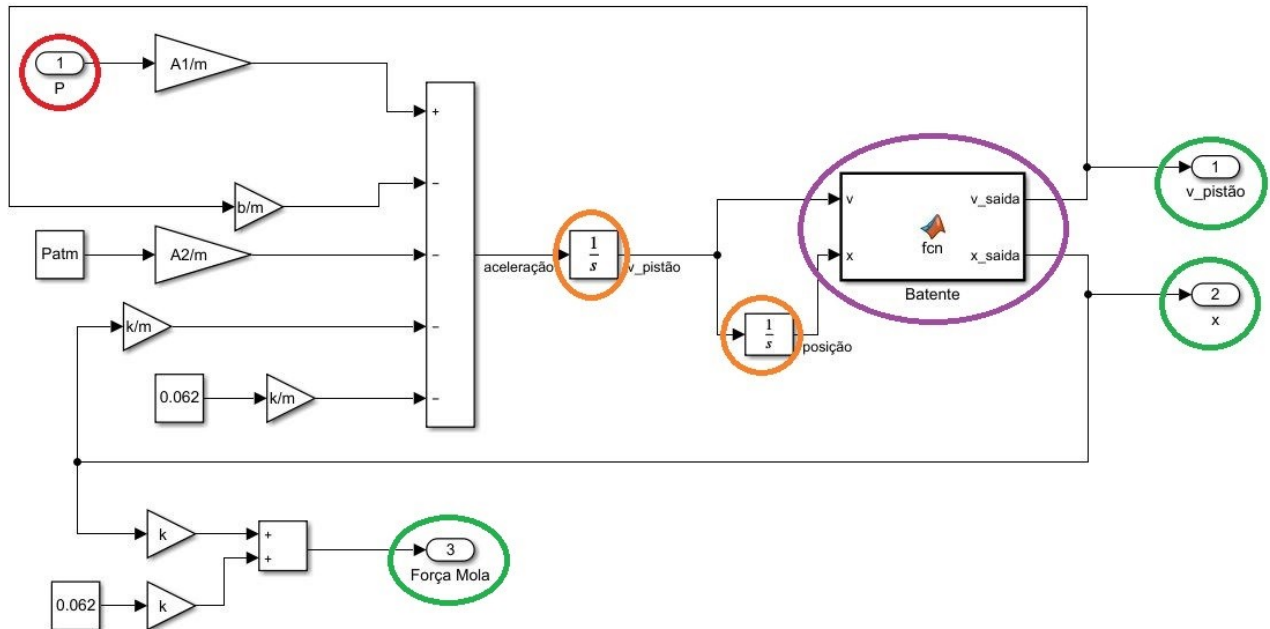


Figura 41: Subsistema Aceleração – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

Destacado em verde, tem-se as saídas do sistema, pode-se observar a saída da força da mola, que nada mais é do que a soma da força da pré-carga da mola com a força da mola que depende da posição do pistão, a velocidade e posição do pistão. Também é possível observar os integradores destacados em laranja discutidos no capítulo 4.2.3 e a entrada da pressão na câmara destacada em vermelho. A maior diferença que se observa entre esse sistema e o do modelo base é a Matlab *Function* batente, que nada mais é do que um bloco de código que recebe as variáveis provindas da equação da aceleração e trata elas de maneira que quando a posição do pistão chegar a zero, tanto a velocidade quanto a posição se mantenham em 0, conforme se destaca no apêndice A.8

7.1.4. Entrada do sistema

Não será observado nenhum bloco responsável pela entrada do modelo, assim como foi visto na modelagem primária e no modelo base. A “entrada” desse modelo é dada escolhendo uma condição inicial para o integrador da posição do subsistema

Modelagem pistão. O mesmo possui o valor inicial em $0,0585m$, que na prática é o pistão iniciando seu avanço em $0,0585m$ e a mola comprimida de $0,0585m + 0,062m = 0,1205m$.

7.1.5. Sistema Completo

Na Figura 42 abaixo, pode-se observar o sistema completo, com todos os subsistemas acima abordados devidamente conectados entre si e mais alguns blocos destacados em roxo que representam o cálculo da razão de pressões, Matlab *Function* Patm/P (ver apêndice A.9), velocidade do escoamento no cano do armamento e no *Nozzle*/cabeça do cilindro calculados pela Matlab *Function* Velocidades (ver apêndice A.10) e finalmente a Matlab *Function* Volume Morto que mantém a pressão dentro da câmara igual a pressão atmosférica para $x > 0,036m$, ver apêndice A.11.

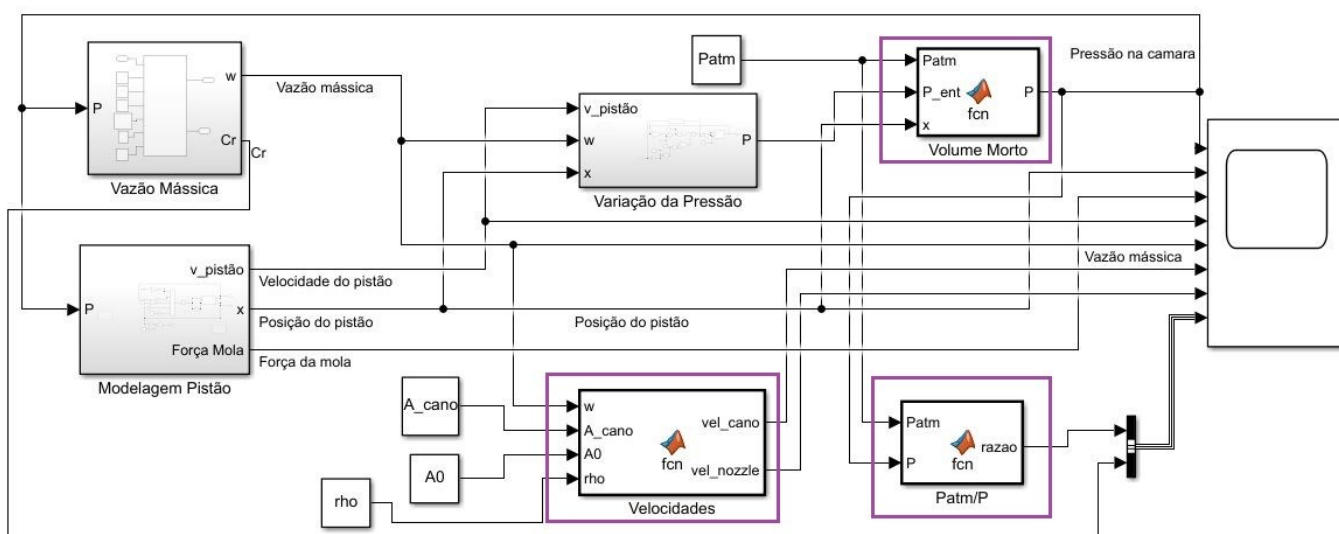


Figura 42: Sistema Completo – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

7.1.6. Resultados

Analisando qualitativamente os gráficos obtidos, percebe-se que os mesmos têm coerência com o sistema mecânico, tendo em vista que ao disparar, a pressão no interior do cilindro aumenta, como se observa na Figura 45. Logo, a mesma só passa a aumentar para $x < 0,036m$ como se pode observar na Figura 43.

Como a vazão mássica depende da pressão na câmara, os gráficos de ambas têm o formato parecido. O escoamento só se inicia ao longo do cilindro e da cabeça do cilindro para $x < 0,036m$ o que se torna evidente já que a pressão para $x > 0,036$ é igual a pressão atmosférica, conforme a Figura 44 e Figura 47. Nota-se que a velocidade do escoamento no *Nozzle/Cabeça* do cilindro e no cano do armamento dependem somente de uma variável, que é a vazão mássica, por isso seus gráficos tem o mesmo formato, porém com valores no eixo das ordenadas diferente, pois a área do *Nozzle/Cabeça* do cilindro é menor que a área do cano do armamento, observe a Figura 46 e Figura 48.

Adicionalmente, o pistão acelera devido à força da mola e ganha velocidade à medida que a força da mola decresce devido a sua descompressão, até que a posição do pistão atinja $0m$ em $6,5ms$, observe a Figura 51 e Figura 50, cabe lembrar que a força da mola não atinge $0N$ pois a mesma possui uma pré-tensão. A velocidade do pistão aumenta em módulo à medida que o pistão se move para a direita, porém percebe-se que o pistão começa a frear em torno de $5ms$, isso ocorre ao passo que a pressão no interior da câmara cresce desacelerando o pistão e impedindo que a sua velocidade aumente ainda mais em módulo até que o pistão atinge a cabeça do cilindro (batente) e a velocidade cai instantaneamente para $0m/s$, destaca-se a Figura 49.

Como explicado no capítulo 3.2, caso a razão de pressões que envolvem o escoamento, ou seja, $\frac{P_{atm}}{P}$ fosse menor que C_r a princípio a vazão mássica ficaria constante, como mostrado na Figura 12, porém para o caso estudado isso não acontece pois cabe lembrar que o pistão está caminhando para a direita, gerando escoamento do ar de dentro para fora do cilindro. Através da equação (10), consegue-se perceber que a variação de pressão dentro do cilindro depende da velocidade do pistão, portanto, enquanto a velocidade estiver crescendo a variação da pressão também estará crescendo e com isso a pressão também estará crescendo, resultando no aumento da vazão mássica mesmo para $\frac{P_{atm}}{P} < C_r$. Cabe salientar que o termo entre parênteses da equação (10) para o avanço do pistão vale $\left(-w_{out} + \frac{P}{RT} A_1 v\right)$, pois a velocidade é negativa, logo, a mesma contribui para o aumento da pressão enquanto

a vazão mássica (w_{out}) contribui para a diminuição da pressão dentro mesmo. Observe a Figura 52.

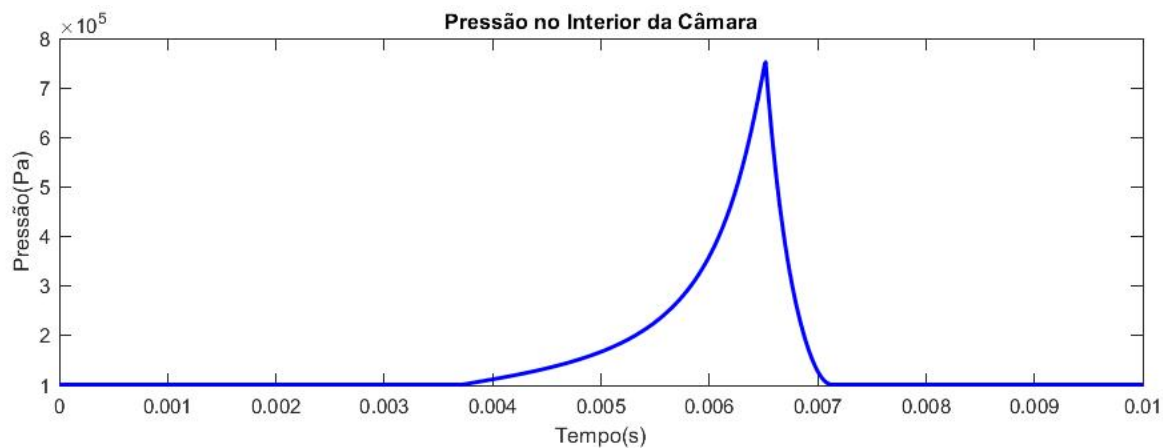


Figura 45: Pressão na Câmara – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

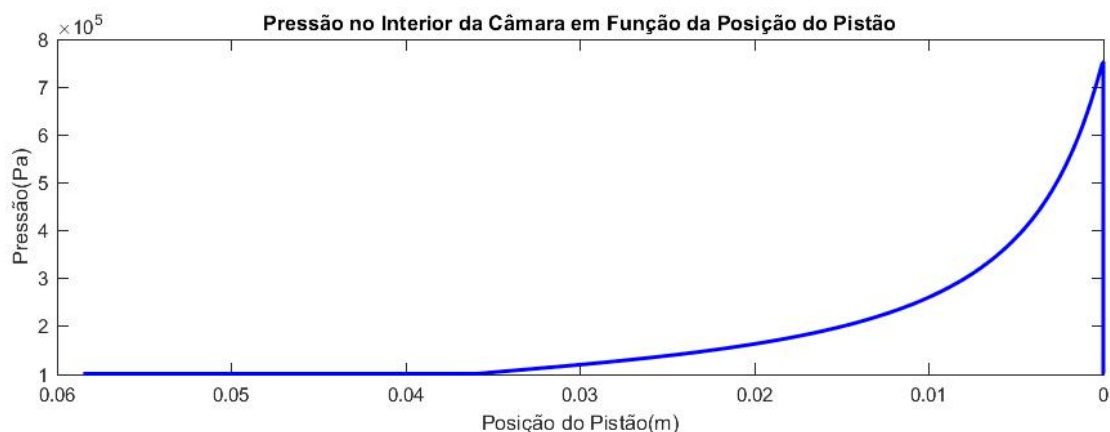


Figura 43: Pressão na Câmara em Função da Posição do Pistão – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

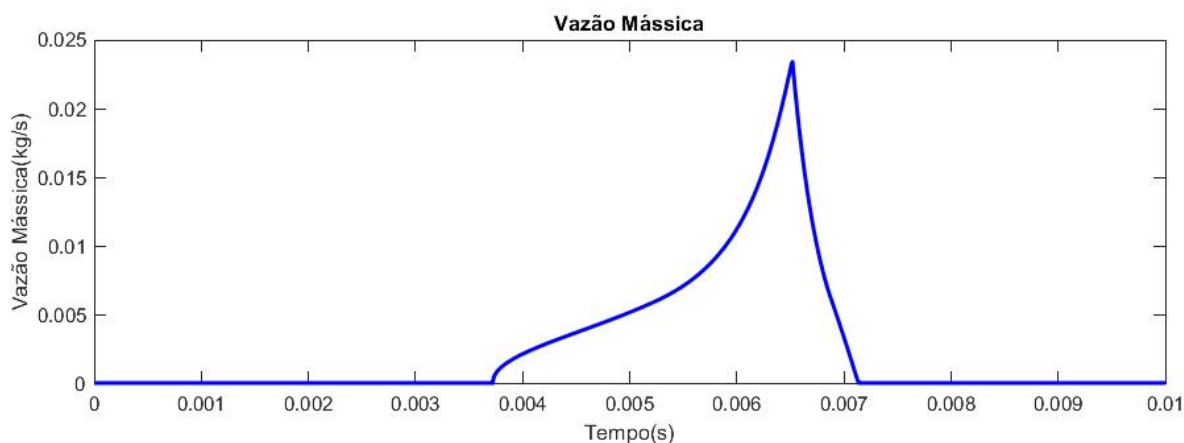


Figura 44: Vazão Mássica – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

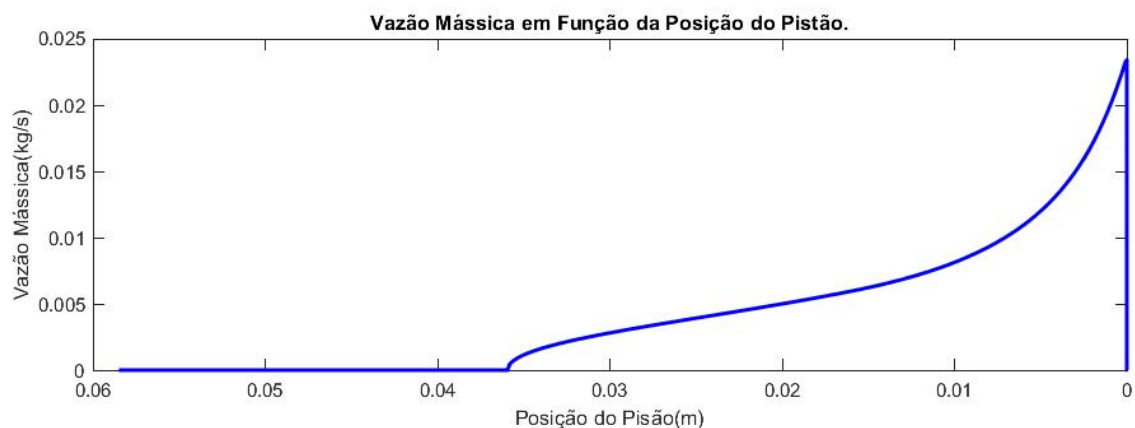


Figura 47: Vazão Mássica em Função da Posição do Pistão – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

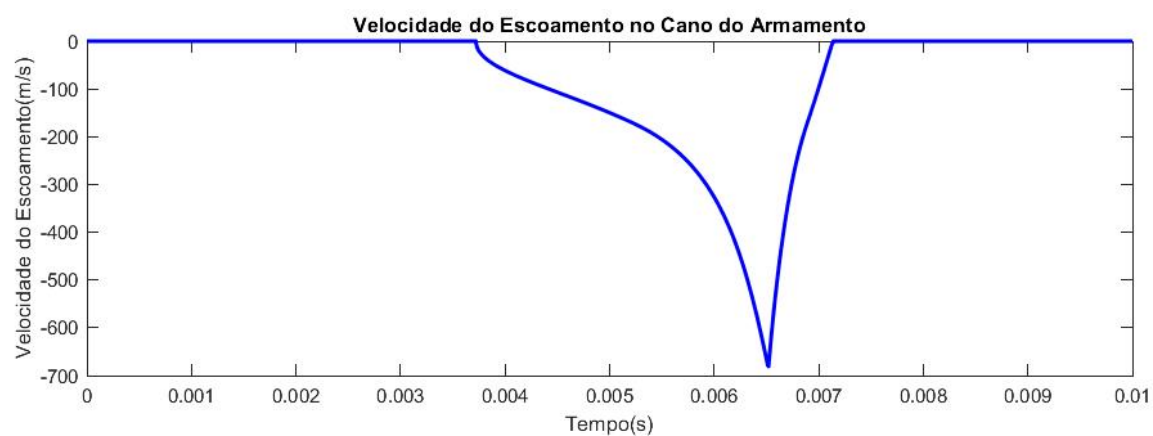


Figura 46: Velocidade do Escoamento no Cano – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

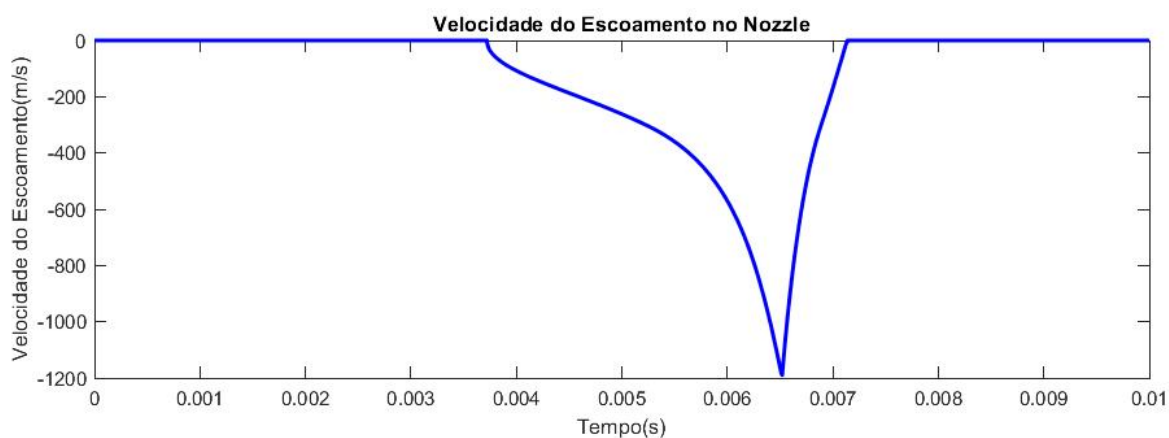


Figura 48: Velocidade do Escoamento no Nozzle – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

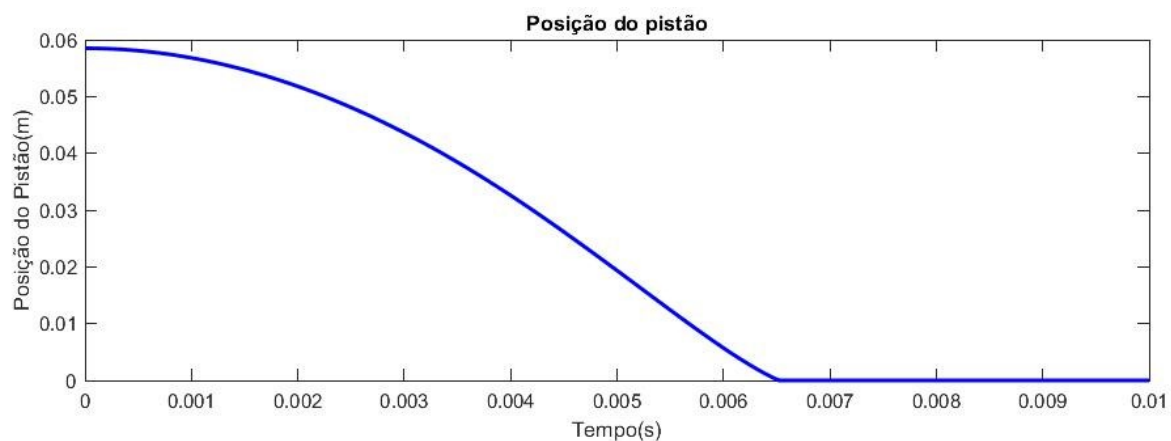


Figura 51: Posição do Pistão – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

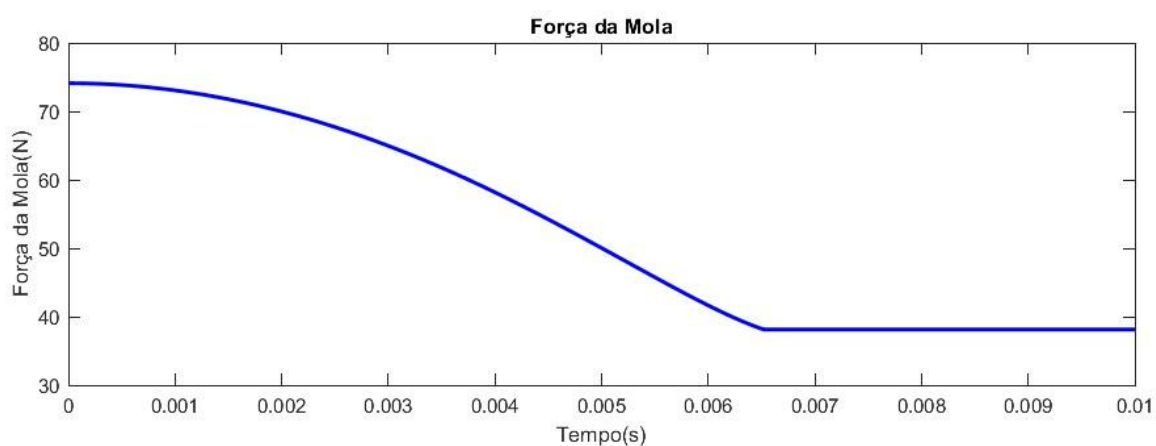


Figura 50: Força da Mola – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

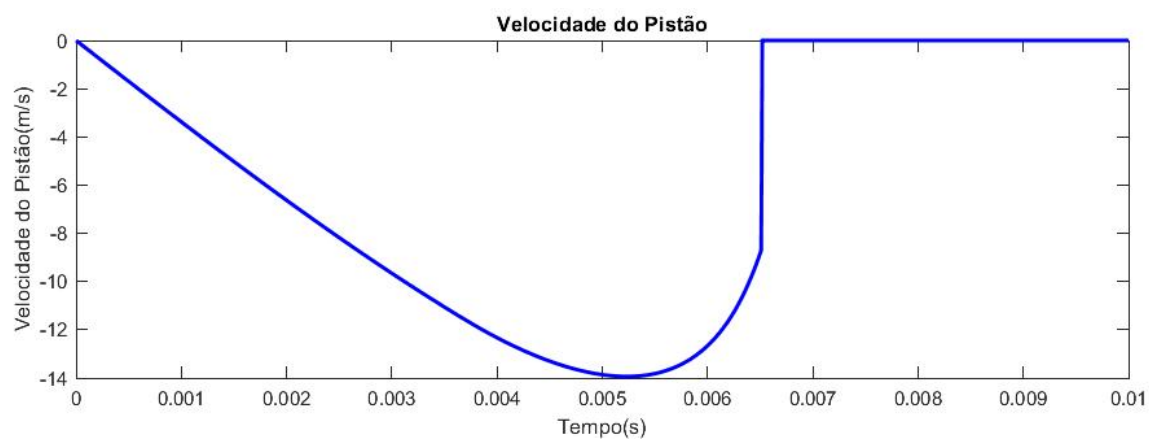


Figura 49: Velocidade do Pistão – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

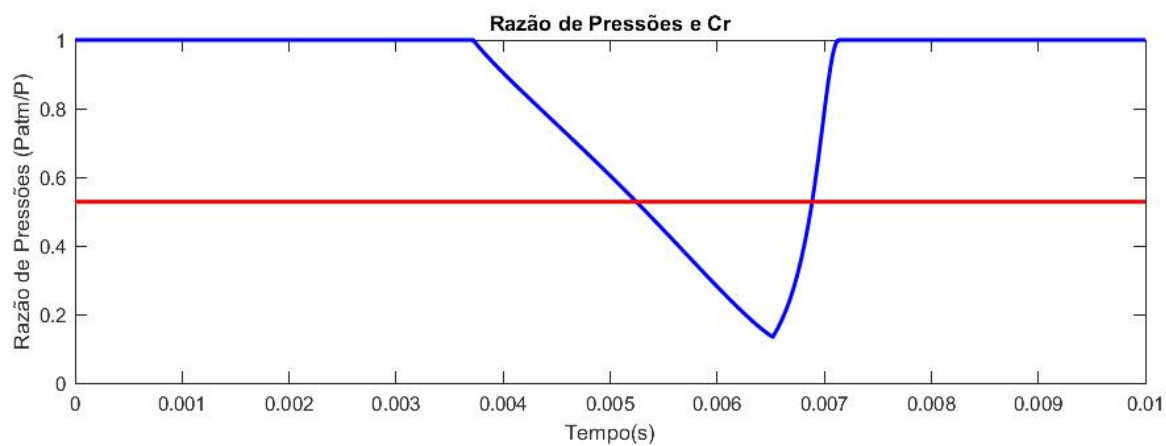


Figura 52: Razão de Pressões – Modelo Final

Fonte: Compilação do Autor

8. TESTES NO ARMAMENTO E OUTRAS ANÁLISES

Com a constante elástica da mola calculada foi possível montar o armamento com a mola e realizar os testes de velocidade final da BBs e cadência de tiro. Vale lembrar que para a realização do teste foi utilizado óculos de segurança para evitar qualquer possibilidade de ricochete das BBs no olho de quem fez o experimento. Além disso, para constatar que a velocidade final da BBs foi medida da forma mais confiável possível, foram utilizados dois cronógrafos de modelos diferentes para saber se as velocidades finais estavam se equiparando e também foi utilizado o RIFLE DE AIRSOFT M4 CM16 PREDATOR - G&G.



Figura 53: Armamento e Cronógrafos

Fonte: Compilação do Autor

Para a realização do experimento, foram usados dois tipos de gramaturas de BBs, de 0,25g e de 0,12g. É importante frisar que antes dos valores serem coletados e apresentados no trabalho, as medidas dos cronógrafos para uma mesma gramatura foram aferidas e comparadas para ver se estavam próximas, e sim, estavam com uma variação pequena em torno de um fps, o que torna as medições mais confiáveis como dito no parágrafo anterior. Além disso, os dados apresentados mostram os maiores valores de velocidade em vinte disparos para cada gramatura, isso porque, apesar de estar sendo abordado um sistema mecânico único, onde para a BBs de 0,25g a

variação entre as medições é em torno de cinco fps, para a BBs de 0,12g isso não acontece pois por ser muito leve, a mesma pode ter perdas relacionadas à sua trajetória no interior do cano como por exemplo se chocar com o cano, o que possibilita que entre um disparo e outro haja uma diferença de 100 fps. Por fim, vale lembrar que a velocidade da BBs é medida na saída do cano do armamento, o cronógrafo fica na ponta do armamento para que a BBs passe em seu interior.

Tabela 6: Dados Experimentais de Velocidade da BBS

Fonte: Compilação do Autor

Massa (g)	Velocidade (fps)	Velocidade (m/s)	Energia (J)
0,25g	327,3	99,76104	1,24403314
0,12g	462	140,8176	1,18977579

Confirmou-se a hipótese de que a velocidade da BBs de 0,12g é maior do que a velocidade da BBs de 0,25g, como comentado no capítulo 3.1, porém se observa que a energia da BBs de 0,25g não é a mesma da BBs de 0,12g, fato esse que a princípio pode causar estranhamento, tendo em vista que os componentes (mola, pistão, cilindro, redução, etc..) do armamento utilizados para cada gramatura são os mesmos. Contudo, quando se analisa o tempo em que as BBs demoram para sair do cano se conclui o motivo da BBs de 0,12g ter uma energia menor do que a BBs de 0,25g. Observe os cálculos aproximados abaixo:

$$t = \frac{s}{v}$$

Onde t é o tempo, $s = 0,26m$ é o tamanho do cano e v é a velocidade medida pelo cronógrafo, portanto, para a BBs de 0,12g o tempo de saída do cano vale $t_{0,12} = 0,00185s$, já para a BBs de 0,25g o tempo de saída do cano vale $t_{0,25} = 0,00260$. Nos cálculos acima, está sendo considerado que as BBs têm uma velocidade constante ao longo do cano, o que não é verdade e, caso fosse verdade, o fato que está sendo tratado não aconteceria. O que se pretende demonstrar com os tempos calculados é que pela BBs de 0,25g ficar mais tempo dentro do cano a mesma tem mais tempo para ganhar energia pelo aumento da pressão no interior da câmara, que como se observa no gráfico da Figura 45, varia ao longo do tempo.

Considerando que ambas as BBs começam a acelerar em $3,7ms$, instante de tempo onde o pistão passa do ponto de volume morto e começa a comprimir a câmara, pode-se considerar os seguintes cálculos:

$$3,7ms + 1,85ms = 5,55ms$$

Onde $1,85ms$ é o tempo que a BBs de $0,12g$ leva para sair do cano após o pistão passar do volume morto, pois o tempo total que a BBs leva para sair do cano é $5,5ms$. Em $5,5ms$, observa-se que o gráfico da pressão no interior da câmara ainda não atingiu seu ponto máximo e a BBs já saiu do cano, ou seja, a BBs de $0,12g$ não aproveita toda a pressão no interior da câmara. A Figura 54 abaixo demonstra o intervalo de tempo que BBs de $0,12g$ permaneceu no cano.

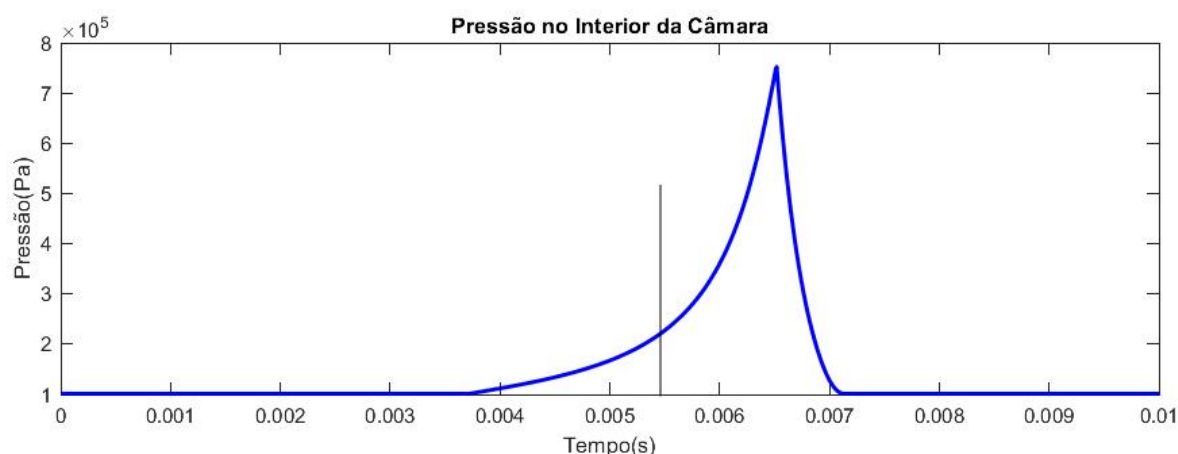


Figura 54: Tempo de Saída do Cano da BBs $0,12g$

Fonte: Compilação do Autor

Para a BBs de $0,25g$ se tem o seguinte cenário:

$$3,7ms + 2,6ms = 6,3ms$$

Onde $2,6ms$ é o tempo que a BBs de $0,25g$ leva para sair do cano após o pistão passar do volume morto, pois o tempo total que a BBs leva para sair do cano é $6,3ms$. Em $6,3ms$ se observa que o gráfico no interior da câmara está mais próximo de atingir seu ponto máximo, ou seja, a BBs de $0,25g$ aproveita mais a pressão no interior da câmara

e por isso ganha mais energia. A Figura 55 abaixo demonstra o intervalo de tempo que a BBs de 0,25g permaneceu no cano.

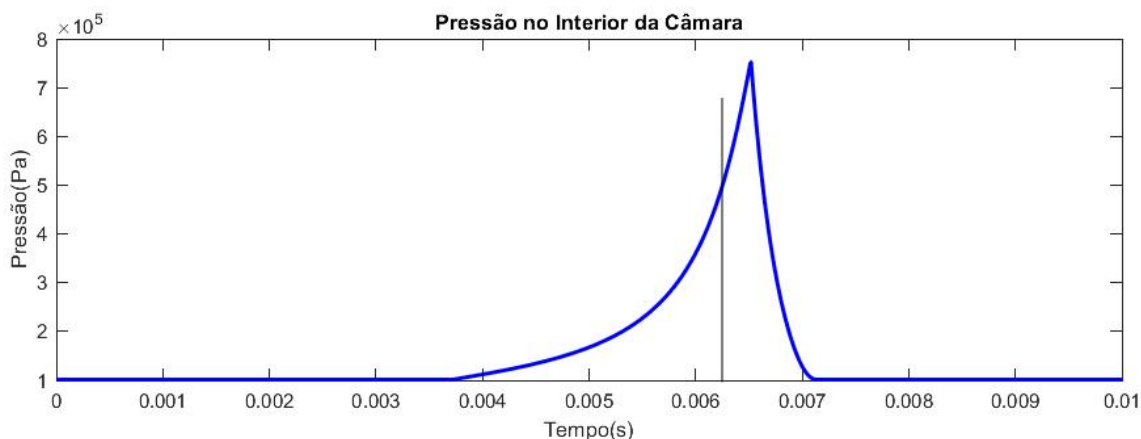


Figura 55: Tempo de Saída do Cano da BBs de 0,25g

Fonte: Compilação do Autor

Toda essa explicação referente à energia da BBs vai de encontro ao tópico 3 das premissas assumidas para o modelo primário mostrado no capítulo 5.1, isso porque se a BBs só fosse disparada quando o pistão chegasse em seu final de curso, não existiria essa diferença de energia demonstrada pelos experimentos e explicadas nos parágrafos anteriores.

Para a cadência de tiro, foram encontrados dois resultados, 22,2 disparos por segundo e 22,6 disparos por segundo, fazendo uma média desses resultados, obtém-se 22,4 disparos por segundo. Portanto, o tempo de um ciclo de disparo, ou seja, pistão recuando mais o pistão avançando mais o tempo ocioso vale $\frac{1}{22,4} = 0,0446s$ aproximadamente 0,04545s assumido no modelo primário. Refazendo os cálculos para a velocidade de recuo do pistão vistos no capítulo 5.2.3, tem-se que a velocidade de recuo do pistão vale:

$$v = \omega \cdot r$$

$$\omega = 22,4 \cdot 2\pi = 140,74 \text{ rad/s}$$

$$r = 13,54 \text{ mm}$$

$$v = 1905,6 \text{ mm/s}$$

Portanto, o tempo necessário para o pistão recuar é:

$$t = \frac{58,5mm}{1905,6mm/s} = 0,03069s$$

Como o tempo de avanço foi encontrado através da simulação que vale $6,5ms$, o tempo de disparo vale $44,6ms$ e o tempo de recuo do pistão vale $30,69ms$, para calcular o tempo ocioso basta observar a equação (13). Portanto, o tempo ocioso vale:

$$t_{ocioso} = t_{disparo} - t_{recuo} - t_{avanço}$$

$$t_{ocioso} = 44,6ms - 30,69ms - 6,5ms = 7,41ms$$

Isso significa que a *Sector Gear* leva $7,41ms$ para começar a puxar novamente o pistão para trás depois que o mesmo chega em seu final de curso, lembre-se quanto menor o tempo ocioso, mais disparos por segundo a arma vai ter.

No tópico 2 das premissas assumidas para o modelo primário, mostrado no capítulo 5.1 foi dito que a velocidade da BBs de $0,12g$ seria considerada a velocidade do escoamento. Com o modelo final pode-se perceber que a velocidade máxima do escoamento dentro do cano mostrado na Figura 46 está em torno de 4,3 vezes maior que a velocidade medida no cronógrafo para a BBs de $0,12g$, o que a princípio torna a premissa fora da realidade, porém, vale lembrar que o modelo não considera as perdas inerentes ao sistema mecânico, que possui perdas grandes principalmente relacionadas à vedação entre a cabeça do cilindro e o cilindro que é feita por encaixe com anéis de vedação de borracha. Essas perdas influem diretamente na perda de ar dentro do cilindro, que afeta consequentemente a perda de pressão dentro da câmara afetando por fim a velocidade do escoamento no interior do cano. Ademais, vale destacar que a velocidade da BBs nunca vai ser a velocidade do escoamento, tendo em vista que a BBs possui uma inércia inerente a sua massa. No modelo primário, foi considerada a velocidade do escoamento na área de estrangulamento (A0) para ser comparado com a velocidade final da BBs, essa comparação é um erro pois a BBs percorre o cano e não a área de estrangulamento, portanto, a velocidade do

escoamento no cano está sendo comparada com a velocidade final da BBs para a modelagem final.

Pode-se perceber que a pressão máxima no interior da câmara está em torno de 700kPa , veja a Figura 45, essa pressão é 200 vezes menor do que a pressão máxima, 140MPa , que se encontra na Figura 56 abaixo, que destaca a curva de pressão no interior de uma metralhadora Beretta 9mm. Essa diferença entre os valores de pressão no interior da câmara é coerente quando se pensa que o processo de disparo de um projétil 9mm envolve a combustão da pólvora, envolve um projétil que tem uma massa 30 vezes a massa da BBs de $0,25\text{g}$ e envolve uma velocidade inicial do projétil de 400m/s . Figura 56: Pressão em Função do Tempo

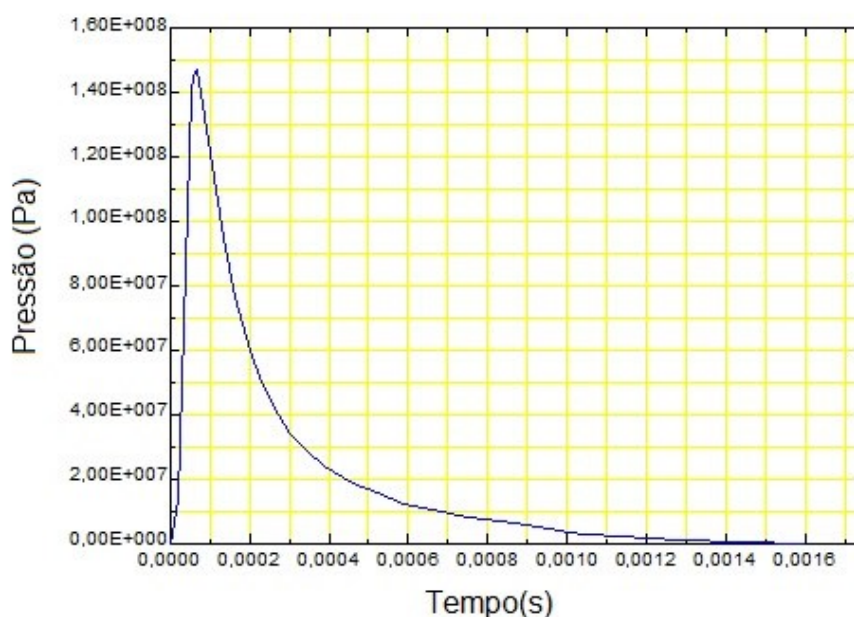


Figura 56: Pressão em Função do Tempo – Beretta 9mm

Fonte: (REZENDE, 1996)

No modelo primário a velocidade máxima que o pistão atingiu foi em torno de $3,8\text{m/s}$ para a velocidade de avanço e no próprio modelo foi dito que era uma velocidade subdimensionada, pois o tempo de avanço estava sobre dimensionado. De fato, essa afirmação foi confirmada com o modelo final, pois para o mesmo, a velocidade máxima de avanço está em torno de 14m/s , observe a Figura 49. Pode-se dizer que essa é uma velocidade confiável tendo em vista que a mesma depende da constante elástica da mola que foi calculada experimentalmente, da condição inicial de compressão da mola, que é fixa e do ponto de início de compressão da câmara,

que também é fixo. Como dito anteriormente, é possível que a pressão na câmara esteja sobre dimensionada o que faz com que a velocidade do pistão diminua e o impeça de atingir maiores velocidades, porém, por mais que essa pressão na câmara fosse menor, possibilitando dessa forma o pistão atingir maiores velocidades, em pouco tempo o pistão atingiria seu final de curso, portanto a velocidade se limitaria pelo fim de curso do pistão.

Outra forma de analisar a velocidade máxima do pistão é a comparando com a velocidade máxima do ferrolho da metralhadora Beretta 9mm. A metralhadora possui uma mola que acelera o ferrolho para frente após apertar do gatilho, na Beretta o ferrolho é o análogo ao pistão, alguns dados retirados do (REZENDE, 1996) mostram que a mola tem uma constante elástica de 300N/m e o ferrolho uma massa de 623g . Com esses dados em mente, já se pode imaginar que a velocidade de avanço do ferrolho será menor do que a velocidade de avanço do pistão, já que a constante elástica da mola da AEG é mais que duas vezes a constante elástica da metralhadora e a massa do pistão mais cabeça do pistão da AEG é 32 vezes menor que a massa do ferrolho. Na Figura 57 é possível perceber que entre 0s e $0,01\text{s}$ o pistão atinge sua velocidade máxima que está em torno de $4,5\text{m/s}$, portanto, a velocidade máxima do pistão está dentro da ordem de grandeza da velocidade máxima do ferrolho e vice versa.

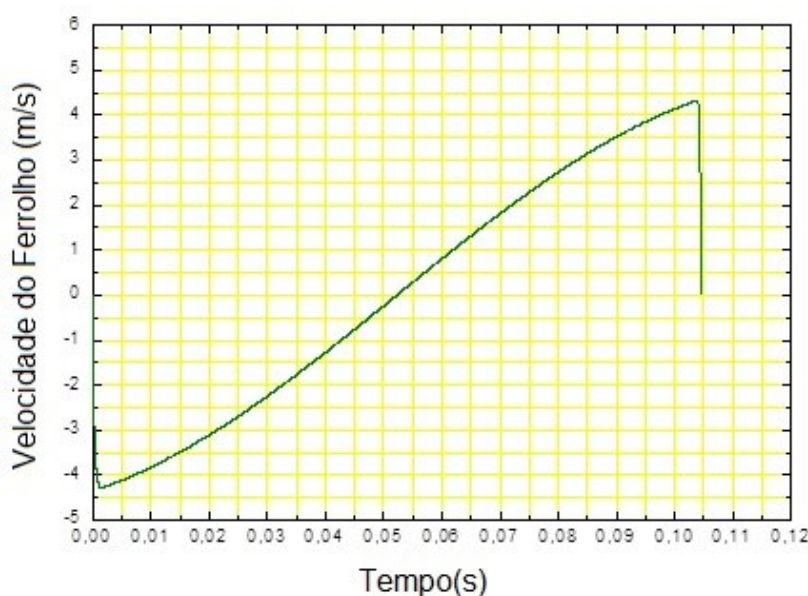


Figura 57: Velocidade do Ferrolho – Beretta 9mm

Fonte: (REZENDE, 1996)

9. CONCLUSÃO

Com poucos dados disponibilizados pelos fabricantes e na literatura sobre esse sistema mecânico, além de nenhuma referência em trabalhos acadêmicos encontrada, foi necessário realizar aproximações e simplificações todas feitas de maneira criteriosa, porém, perante a natureza altamente não linear do sistema e da sua dinâmica muito rápida erros são aceitáveis dentro do previsto. Apesar disso, para um primeiro modelo, obtiveram-se resultados bastante satisfatórios e promissores, principalmente no que se diz respeito aos testes feitos no armamento relacionando com as análises de pressão dentro do cilindro. Além disso, gráficos que têm coerência com o sistema mecânico e análises comparativas que podem contribuir para futuros trabalhos na área de armamentos de *Airsoft*.

10. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para modelos mais próximos da realidade, sugere-se que em trabalhos futuros seja feita a modelagem completa do armamento, pistão recuando e avançando, que precisariam das características inerentes ao motor e testar o mesmo atuando no sistema. Além disso, uma ótima forma de continuar com o trabalho e incluir modelos mais sofisticados seria instrumentando todo o armamento para que seja possível analisar experimentalmente todas as variáveis.

11. REFERÊNCIAS

ACTIONX AIRSOFT. RIFLE AIRSOFT G&G ARP-9. **ActionX Airsoft**. Disponível em: <<http://actionxairsoft.com.br/produto/rifle-airsoft-arp9-eletrico/>>. Acesso em: 1 Março 2021.

AZSPORTS. CARABINA DE PRESSÃO PCP M22 5.5 ARMAIS. **AZSPORTS**. Disponível em: <<https://azsports.com.br/carabina-de-pressao-artemis-pcp-m22-0044393887374>>. Acesso em: 1 Março 2021.

DISPROPIL. Carabina de Pressão Nitro X 1000 Oxidada 5.5mm 10003752 - CBC. **Dispropil**. Disponível em: <<https://www.dispropil.com.br/carabina-de-pressao-nitro-x-1000-oxidada-5-5mm-10003752-cbc-114900>>. Acesso em: 1 Março 2021.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8ª. ed. [S.l.]: gen.

HALSOE, J. Partial Airsoft V2 gearbox. **GRABCAD**, 2015. Disponível em: <<https://grabcad.com/library/partial-airsoft-v2-gearbox-1>>. Acesso em: 26 Novembro 2020.

KLUEVER, C. A. **Dynamic Systems: Modeling, Simulation, and Control**. 1ª. ed. [S.l.]: Wiley, 2015.

LOJA DA CARABINA. Pistola Airsoft GBB Glock R17 Blowback Green Gas. **Loja da Carabina**. Disponível em: <<https://www.lojadacarabina.com.br/pistola-de-airsoft-gbb-glock-r17-green-gas-blowback-6mm-army.html>>. Acesso em: 1 Março 2021.

MECHBOX. version 2 gearbox animation. **YouTube**, 2007. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qIW11m5d4Uk>>. Acesso em: 26 Novembro 2020.

NIECKELE, A. O. MEC 1328: Mecânica dos Fluidos II, 2020. Disponível em: <http://mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/MecFluII_Eng1707.html>. Acesso em: 25 Agosto 2020.

PAINTBALL SPORTS. DYNAMIC SPORTS GEAR SOFTRACK 2.0 PAINTBALL MARKER STAND WHT. **Paintball Sports**. Disponível em: <<https://www.paintballsports.co.uk/dynamic-sports-gear-softrack-2-0-paintball-markiererstaender-wht>>. Acesso em: 1 Março 2021.

REZENDE, A. L. T. **Avaliação de Esforços Reativos em uma Arma Automática**. IME. Rio de Janeiro. 1996.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGOS

A.1 – Matlab Function / Vazão Mássica - Modelo Base

```
function w = fcn(P1,P2,Cd,A0,gamma,R,T1)
%P1 = Pressão a montante
%P2 = Pressão a jusante

Cr = (2/(gamma+1))^(gamma/(gamma-1));

if P2/P1 > Cr
    %ilimitado
    w = Cd*A0*P1*sqrt(2*gamma/((gamma-1)*R*T1)*((P2/P1)^(2/gamma) -
(P2/P1)^((gamma+1)/gamma)));
else
    %limitado
    w = Cd*A0*P1*sqrt(gamma/(R*T1) * Cr^((gamma+1)/gamma));
end
```

A.2 – Matlab Function / Controle das pressões - Modelo Base

```
function pressures = fcn(Patm,P,Ps,cmd)

if cmd == 1 %válvula de admissão aberta
    pressures = [P;Ps];

    elseif cmd == -1 %válvula de exaustão aberta
        pressures = [Patm;P];

    elseif cmd == 0 %ambas as válvulas fechadas
        pressures = [Patm;Patm];

else
    pressures = [Patm;Patm];
end
```

A.3 – Matlab Function / Força da Embreagem - Modelo Base

```
function FL = fcn(pos)

FL = 4000*(1-exp(-500*pos)) - 20000*pos;
```

A.4 – Matlab Function / Vazão Mássica - Modelo Primário

```
function [w,Cr] = fcn(P1,P2,Cd,A0,gamma,R,T1,vel_pistao,rho,A1)
%P1 = Pressão na camara (variável)
%P2 = Pressão no nozzle = Patm(fixa)

Cr = (2/(gamma+1))^(gamma/(gamma-1));

if vel_pistao < 0
    if P2/P1 > Cr
        %ilimitado
        w = -Cd*A0*P1*sqrt(2*gamma/((gamma-1)*R*T1)*((P2/(P1+50))^(2/gamma)-(P2/(P1+50))^((gamma+1)/gamma)));
    else
        %limitado
        w = -Cd*A0*P1*sqrt(gamma/(R*T1) * Cr^((gamma+1)/gamma));
    end
else
    w = rho*vel_pistao*A1
end
```

A.5 – Matlab Function / Vazão Mássica - Modelo Final

```
function [w,Cr] = fcn(P1,P2,Cd,A0,gamma,R,T1)
%P1 = Pressão a montante (variável)
%P2 = Pressão a jusante (Constante = Patm)

Cr = (2/(gamma+1))^(gamma/(gamma-1));

if P2/P1 > Cr
    %ilimitado
    disp("ILIMITADO")
    if ((P2/P1)^(2/gamma) - (P2/P1)^((gamma+1)/gamma)) < 0

        w = -Cd*A0*P1*sqrt(2*gamma/((gamma-1)*R*T1)*((P2/P1)^((gamma+1)/gamma) - (P2/P1)^(2/gamma)));
    else

        w = -Cd*A0*P1*sqrt(2*gamma/((gamma-1)*R*T1)*((P2/P1)^(2/gamma) - (P2/P1)^((gamma+1)/gamma)));
    end
else
    %limitado
    disp("limitado")
    w = -Cd*A0*P1*sqrt(gamma/(R*T1) * Cr^((gamma+1)/gamma));
end
```


A.6 – Matlab Function / Controle da Pressão - Modelo Final

```
function P = fcn(P_ent,Patm)

if P_ent < Patm
    P = Patm;
else
    P = P_ent;
end
```

A.7 – Matlab Function / Reset do Integrador - Modelo Final

```
function sinal_saida = fcn(x)

if x < 0.036
    sinal_saida = 1;
else
    sinal_saida = -1;
end
```

A.8 – Matlab Function / Batente - Modelo Final

```
function [v_saida,x_saida] = fcn(v,x)

if 0.0585 >= x && x > 0
    v_saida = v;
    x_saida = x;

else
    v_saida = 0;
    x_saida = 0;

end
```

A.9 – Matlab Function / Patm/P - Modelo Final

```
function razao = fcn(Patm,P)

razao = Patm/P ;
```

A.10 – Matlab Function / Velocidades - Modelo Final

```
function [vel_cano,vel_nozzle] = fcn(w,A_cano,A0,rho)

vel_cano = w/(rho*A_cano);
vel_nozzle = w/(rho*A0);
```

A.11 – Matlab Function / Volume Morto - Modelo Final

```
function P = fcn(Patm,P_ent,x)

if x <= 0.036
    P = P_ent;
else
    P = Patm;
end
```