

# ESTUDIO DE DINAMICA DE SISTEMAS DE ARTILLERIA

## DYNAMIC STUDY OF ARTILLERY SYSTEMS

Pablo I. Mari Thomsen<sup>a</sup>, Pablo J. Vilar<sup>b</sup> y Elvio A. Heidenreich<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*pmarithomsen@fie.undef.edu.ar*

<sup>b</sup>*pvilar@fie.undef.edu.ar*

<sup>c</sup>*elvioh@fie.undef.edu.ar*

<sup>a-b-c</sup> *Universidad Nacional de la Defensa, Facultad de Ingeniería del Ejército, Cabildo 15 CABA*

**Palabras clave:** Artillería de Tubo, dinámica de disparo, dinámica de cuerpo rígido.

**Resumen.** Los cañones de artillería son un sistema dinámico que abarca ciencias de varias ramas como la resistencia estructural, resistencia de materiales, la fluidodinámica. Este estudio comprensivo del sistema en su totalidad abarca la verificación, validación, instrumentación y rediseño parcial y/o de ciertos elementos que actúan durante el retroceso que se produce en el disparo. Esto servirá de base para cualquier nuevo diseño, modificación y/o rediseño que se pretenda realizar dado que provee las bases sobre las cuales se puede proceder a realizar el dimensionamiento de los vínculos elásticos (freno de tiro, recuperador, equilibrador) y de los elementos que transmitirán el esfuerzo del tiro hacia su destino último, que es el suelo, a través de su vínculo que son las flechas y uñas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de artillería es un elemento que está destinado a enviar un proyectil que contendrá lo que denominaremos una carga útil. El fin de esta carga será el de tener un efecto sobre un blanco dado. Si bien los estudios de la balística terminal no son el objeto de esta publicación es importante tener el contexto del estudio. En este caso particular nos centraremos en el estudio de un cañón de artillería calibre 155 milímetros cuya longitud del tubo, expresada en calibres, es de 33. Este cañón en particular, como veremos en la figura 1, es material de origen francés y luego rediseñado en Argentina bajo el nombre de CITER L33.



Figura 1: Cañón SOFMA, modelo F3. Fuente: Autor

Las capacidades de este material son las de lanzar un proyectil de aproximadamente  $43,750kgf$  de peso a una distancia de 20 kilómetros. Para tal fin utiliza una carga de pólvora que le conferirá una velocidad inicial en el plano de boca tal que, con ese impulso inicial, el proyectil vuela libremente hasta alcanzar su blanco a los 20 kilómetros.

### 1.1. Balística Interior

La balística interior es el estudio del movimiento del proyectil dentro de la boca de fuego, estará caracterizado por un estudio del desarrollo de la presión, o más apropiadamente la variación de la presión, a medida que el proyectil se desplaza dentro del tubo. Este fenómeno estará gobernado por diferentes modelos, en este caso particular utilizaremos el modelo de balística exterior expuesto por Chabornier-Sugot en el cual plantean un sistema de ecuaciones para modelar el quemado de pólvora y considerar parámetros geométricos de la recámara, la geometría de la pólvora, su composición química, parámetros termodinámicos, la geometría del proyectil y su peso, entre otros. Para ello empleamos el sistema de ecuaciones de Chabornier Sugot, *Roberto A. Corti -2017*

$$\mu \cdot \frac{dv}{dt} = P \cdot \sigma \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dt} = A \cdot P^\alpha \cdot \varphi(z) \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} \cdot m u \cdot v^2 = \frac{f \omega z}{\gamma - 1} - \frac{P}{\gamma - 1} \cdot \left[ c - \frac{\omega}{\delta} - \omega z \cdot \left( \nu - \frac{1}{\delta} \right) \right] \quad (3)$$

Este sistema de ecuaciones vincula el movimiento del proyectil, con la velocidad de quemado de la pólvora y en última instancia una denominada ecuación de equivalencia que contendrá parámetros termodinámicos de la pólvora y la presión. El conjunto de estas ecuaciones dará como resultado una predicción de la velocidad inicial del proyectil. Pero, más importante para nuestro estudio, nos brindará la presión que se desarrolla dentro del cañón en función del tiempo. Es decir, obtendremos una presión  $P(t)$  que al multiplicarla por  $\sigma$ , obtendremos la fuerza que de reacción en el cañón. Vale aclarar que para todos los casos, además de la presión mientras el proyectil se mueve por el tubo, se debe tener en cuenta el efecto del vaciado del tubo cañón. Este efecto es, en magnitud mucho mejor, pero de mayor duración. Mientras que la balística interior actúa por 11 milésimas de segundo, este efecto de vaciado perdura hasta la décima. Utilizando un modelo de vaciado que contempla la evacuación del gas en “paquetes” se puede obtener una curva de vaciado en el tiempo la cual se empalma perfectamente con la que surge de la balística interior. Obteniéndose así la curva de presión completa, tal cual se observa en la figura 2.

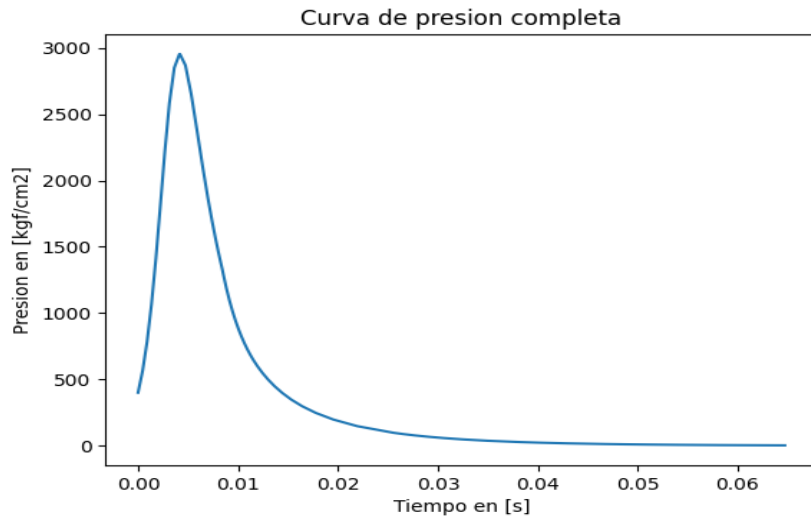


Figura 2: Curva de presiones completa del cañón F3 Carga 9bis. Fuente: Autor

## 2. MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD

Tal cual se mencionó en el título, se pretende realizar un modelo de tres grados de libertad del movimiento del cañón. Para ello, tomaremos como referencia el siguiente modelo, propuesto en el libro (([Army, 1990](#))). Este modelo servirá de base, pero nos tomaremos ciertas libertades de modificar los elementos que actúan frente al tiro. Más precisamente, en este modelo se observa que el retroceso es soportado por un resorte de coeficiente variable con el tiempo. Nosotros lo modelaremos más aproximado a la realidad teniendo en cuenta los elementos que intervienen en el retroceso, a continuación los presentaremos de acuerdo a lo indicado en (([Argentino, 1987](#))).

En primera instancia se modela un sistema de un grado de libertad, modelando únicamente el retroceso del cañón sometido a los esfuerzos debido a la balística interior, el freno de tiro, recuperador y moderador de vuelta en batería.

## 2.1. Recuperador

El recuperador es el órgano encargado de acumular y volver a posición inicial a la masa que retrocede. Es, esencialmente, un resorte. En el caso particular, este resorte tiene un funcionamiento utilizando fluido hidráulico y gas nitrógeno. Convirtiéndolo en un resorte a gas. Para este existe una expresión analítica, considerando su precarga (dado que debe ser capaz de sostener al cañón en el caso de elevación máxima).

## 2.2. Freno de Tiro

El freno de tiro es el órgano encargado de, como su nombre lo indica, frenar el cañón durante su retroceso, para lograr este fin aprovecha el fenómeno de la pérdida de carga a través de un orificio de sección variable. Este freno está diseñado para ofrecer un esfuerzo de frenado lo más constante posible a lo largo del retroceso del cañón de tal manera que se evitan picos de esfuerzo que de otra manera si sucederían. Para este caso particular se realizó un estudio analítico, en base a los esfuerzos, masas y dimensiones del tubo y se obtuvo un esfuerzo del freno de tiro a ángulo de elevación igual  $0^\circ$  de  $20,000kgf$ .

## 2.3. Moderador de Vuelta en Batería

Debido a la acción del recuperador, el cañón tenderá a volver a su posición original, sin embargo, resulta imprescindible que este fenómeno sea controlado, si lo hiciera muy rápido y se encontrase con el tope físico, generaría un impulso que podría hacer que el cañón en su totalidad “caiga de boca” hacia adelante. Para ello existe este elemento, que limita la velocidad de vuelta en batería a aproximadamente  $0,7 \text{ m/s}$ .

Como hemos visto, el retroceso es bastante más complicado e intervienen otros componentes que no podemos modelar de manera directa utilizando un resorte. Sino que emplearemos el siguiente criterio de funcionamiento:

$$\begin{aligned}\text{Freno de tiro: } R &= \begin{cases} R & \text{para } v < 0 \\ 0 & \text{para } v > 0 \end{cases} \\ \text{Moderador Vuelta en Batería: } F &= \begin{cases} 0 & \text{para } v < 0 \\ C \cdot v & \text{para } v > 0 \end{cases} \\ \text{Recuperador: } F &= T_0 + K \cdot x \quad \text{para } v > 0 \\ \text{Impulso } B(t) : B(t) &= \begin{cases} B(t) & \text{para } t < t_{\max} \\ 0 & \text{para } t > t_{\max} \end{cases}\end{aligned}$$

Tomando como referencia los esfuerzos, y sistemas expuestos y sus rangos de acción, se ha podido determinar los siguientes resultados, representando la velocidad y posición del centro de masa del cañón.

Esta será la base de referencia para estudios posteriores, que al momento se están llevando a cabo. Como se observa en los resultados, se pudieron recrear los movimientos del cañón. Se verificó la velocidad máxima de  $12 \text{ m/s}$  de retroceso, además también se pudo obtener la longitud máxima de retroceso del orden del  $1,4 \text{ metros}$ . Para poder hallar las constantes dinámicas se empleó un algoritmo iterativo de dinámica inversa, es decir conociendo la cinemática del cañón, se obtuvieron las constantes  $C$  y  $K$  que representaban de mejor manera este movimiento

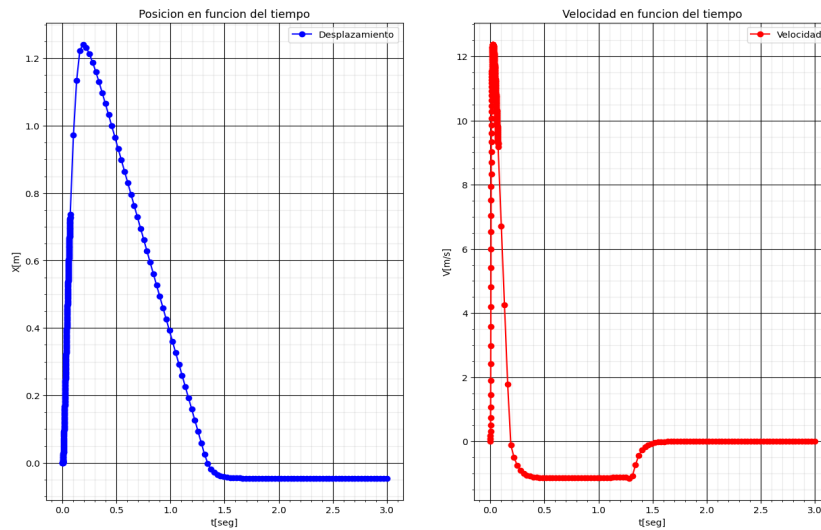


Figura 3: Resultados de posición y velocidad de la masa que retrocede. Fuente: Autor

### 3. MODELO DE TRES GRADOS DE LIBERTAD

El modelo de tres grados de Libertad nos permitirá analizar no solo el movimiento de retroceso del cañón, sino que además veremos los movimientos angulares en la estructura que a posterior tendrán efecto en la puntería y movimiento del cañón. para referencia, utilizaremos el mismo esquema que el planteado por el US Army en su libro Handbook *Nº 785 Design of Towed Artillery Systems*, ver figura 4

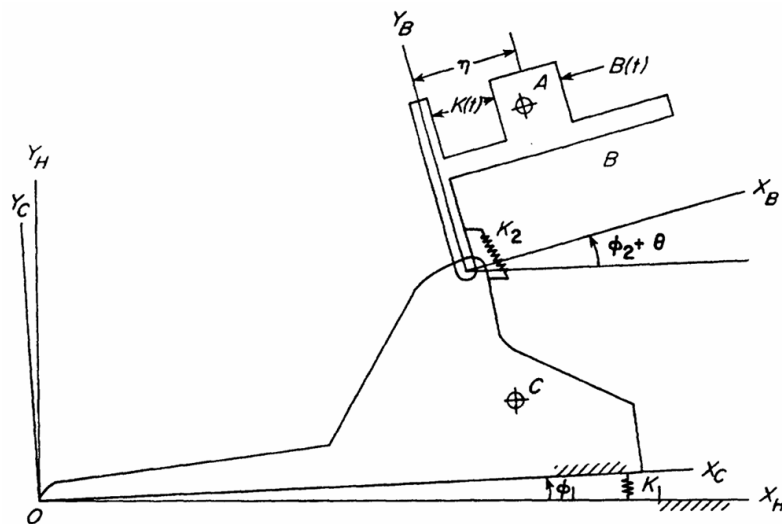


Figura 4: Modelo de tres grados de libertad para estudio de dinámica. Fuente: US Army, Military Handbook, Design of Towed Artillery Weapon Systems, Marzo 1990

#### 3.1. Ecuaciones de Transformación

Para expresar un sistema en función de otro, se pueden utilizar las matrices de transformación homogénea. Su finalidad es la de expresar un punto en un sistema de coordenadas en función de otro. La transformación homogénea que se plantea a continuación es la genérica correspondiente a una rotación en el eje X y contempla la traslación del eje ordenado.

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & p_x \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Aplicando esa matriz se puede obtener las coordenadas del punto  $P_x$  y  $P_y$  con respecto al sistema de referencia base. De esta matriz se puede derivar una expresión para obtener la posición, a manera de ejemplo describiremos la posición del centro de masa A con respecto al sistema de referencia global.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_A = & [\eta \cos(\phi + \theta) - \xi_1 \sin(\phi + \theta) + b_T \cos \phi - c_T \sin \phi] \mathbf{i}_H \\ & + [\eta \sin(\phi + \theta) + \xi_1 \cos(\phi + \theta) + b_T \sin \phi + c_T \cos \phi] \mathbf{j}_H \end{aligned} \quad (5)$$

La expresión anterior indica la posición del punto A de la figura, correspondiente al centro de masa de la masa que retrocede, con respecto al suelo. Si a su vez derivamos esto respecto al tiempo obtendremos la velocidad, que tendrá la siguiente expresión

$$\begin{aligned} v_r = \frac{d\mathbf{r}_A}{dt} = & \left\{ \dot{\eta} \cos(\phi + \theta) + \dot{\phi} [-\eta \sin(\phi + \theta) - \xi_1 \cos(\phi + \theta)] - b_T \sin \phi - c_T \cos \phi \right\} \mathbf{i}_H \\ & + \left\{ \dot{\eta} \sin(\phi + \theta) + \dot{\phi} \cos(\phi + \theta) - \xi_1 \sin(\phi + \theta) + b_T \cos \phi - c_T \sin \phi \right\} \mathbf{j}_H \end{aligned} \quad (6)$$

Una expresión de la aceleración resulta inconveniente de derivar analíticamente, por eso se procederá al estudio utilizando el lenguaje simbólico de python

### 3.2. Hipótesis Simplicativas

Aquí plantearemos las hipótesis simplificativas del modelo matemático a resolver, Este sistema como consecuencia contemplará las siguientes simplificaciones:

- Fuerzas colineales: asumiremos que todas las fuerzas y reacciones se aplican dentro de la misma línea de acción y en el centro de masa de la masa que retrocede.
- El cañón se modelara como un plano.
- El freno de tiro actúa en el retroceso y a valor constante.
- El cañón no cuenta con freno de boca.
- Se desprecian los rozamientos.

### 3.3. Parámetros Geométricos

Para la obtención del modelo en CAD del cañón completo se implementaron técnicas de escaneo 3D. Con la nube de puntos, se procedió mediante software a generar los sólidos para verificar las masas de cada componente, sus momentos de inercia y ubicación de centros de masa. En la figura, se distinguieron con colores los elementos que serán objeto de estudio. Las condiciones iniciales se referirá a la figura del modelo, los colores fueron asociados entre el modelo 3D y el modelo simplificado dinámico a fines de comprensión.

Tomando como referencia el elemento anterior, se plantea el siguiente sistema matemático siguiente.

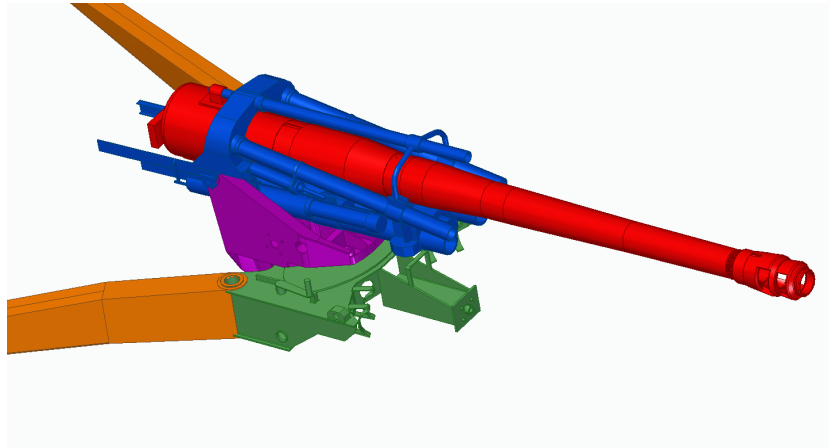


Figura 5: Modelo 3D resultado del escaneo del cañón real. Fuente: Autor

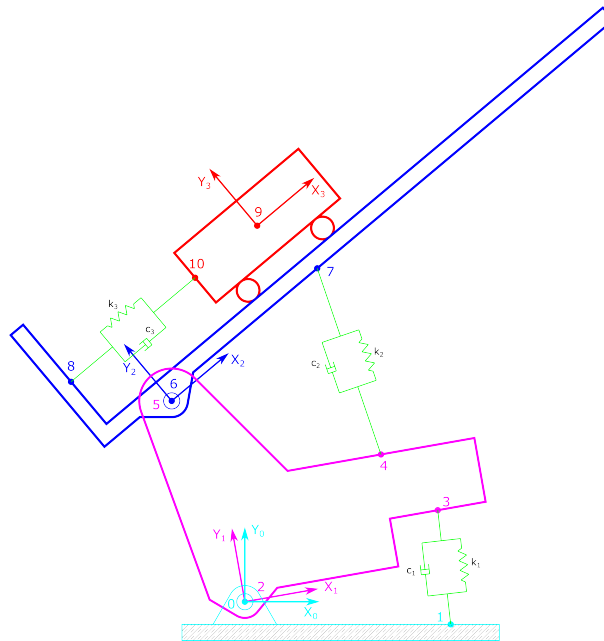


Figura 6: Modelo 2D de la dinámica y vínculos entre las masas. Fuente: Autor

### 3.4. Posiciones de los Sistemas de Referencia

Cada uno de los sistemas de coordenadas que se presentaron en la figura 6 tienen una correspondencia entre los ángulos y coordenadas, dentro de la suposición del sistema plano que se planteo para este modelo.

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

En primera instancia se ha logrado simular el movimiento del tubo cañón de manera independiente a los demás órganos que intervienen. Actualmente se esta trabajando en realizar un modelo de más grados de libertad para obtener un comportamiento dinámico que contemple movimientos más complejos en el primera instancia no son considerados. Como se observó en el desarrollo de las expresiones de velocidad y posición, las mismas pueden escalar en tamaño y complejidad enormemente, con lo cual este desafío planteo la necesidad de incursionar en resoluciones mediante lenguaje simbólico

	Coordenada x[m]	Coordenada y[m]
Sistema X0,Y0	0,00	0.00
Sistema X1,Y1	0,00	0.00
Sistema X2,Y2	-0.31	0.63
Sistema X3,Y3	0.66	0.75

Tabla 1: Ubicación inicial de los sistemas de Referencia (suponiendo elevación 0°).

## REFERENCIAS

Argentino E. *Cañón Argentino Cal. 155mm L33*, volumen I. Instituto Geografico Militar, 1987.  
Army U. *Military Handbook Design of Towed Artillery Systems*, volumen I. US Army, 1990.