



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

MOTOR COHETE CICLO PRESURIZADO

TRABAJO 3

PROPULSION ESPACIAL Y LANZADORES

Author: Romane Busato
Rafael Luque López
Diego Mataix Caballero
Ana Isabel Soria Carro

Professor: Luis Sánchez de León Peque

MADRID, 5 DE DICIEMBRE, 2020

Índice

1. Objetivo	2
2. Gastos másicos y áreas de garganta	3
3. Tanque de propulsante	4
4. Sistema de presurización	5
4.1. Volumen del depósito	6
4.2. Masa de gas de presurización	7
4.3. Masa del depósito	8
5. Conclusiones	9
Appendices	
A. Matlab Code	11

1. Objetivo

Se quiere diseñar el sistema de presurización de dos motores cohete, que utilizan la misma hidracina almacenada en un tanque, para realizar el mantenimiento orbital de un satélite de comunicaciones.

El sistema de propulsión está compuesto por un depósito, que contiene el gas de presurización, un regulador de presión que mantiene la presión en el tanque constante, un tanque de hidracina, y dos toberas convergente-divergentes, una principal (1) que suministra un empuje de 8 N, y una secundaria (2) que suministra un empuje de 0,7 N.

El objetivo de este sistema de propulsión es mantener la órbita de un satélite de comunicaciones (se supone que se encuentra en el vacío) de 1500 kg.

Se deben considerar varias configuraciones del gas de presurización utilizado, del material del depósito y de la presión inicial del depósito y elegir la mejor opción para optimizar este sistema de presurización para esta misión.

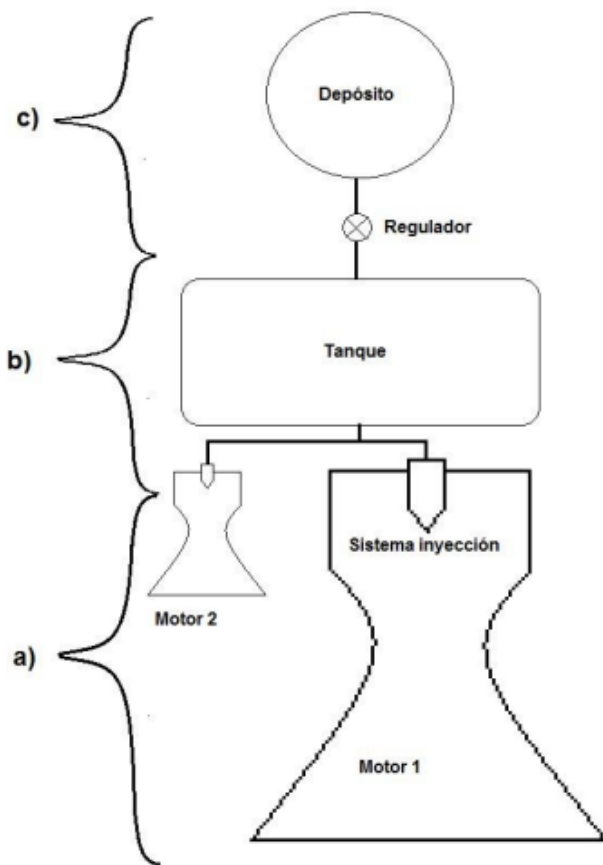


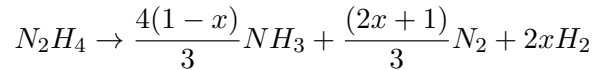
Figura 1: Sistema de propulsión

Datos	Sistema Internacional
M_{cp}	1500 kg
M_p	118 kg
E_1	8 N
E_2	0,7 N
x	0.4
Π_{tobera}	80
P_c	10×10^5 Pa
$\rho_{N_2H_4}$	1032 kg/m^3
δP_{iny}	0.1
α	0,15
T_{ref}	298,15 K
R_u	$8,31446 \text{ J/molK}$
Mm_N	$14 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
Mm_H	$1 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
C_{p,H_2}	$29,9 \text{ J/molK}$
C_{p,N_2}	$32,1 \text{ J/molK}$
C_{p,NH_3}	$54,0 \text{ J/molK}$
C_{p,N_2H_4}	$98,8 \text{ J/molK}$
$\Delta H^\circ_{f,N_2H_4}$	$50,6 \times 10^3 \text{ J/mol}$
$\Delta H^\circ_{f,NH_3}$	$-45,9 \times 10^3 \text{ J/mol}$

Cuadro 1: Datos del enunciado

2. Gastos máficos y áreas de garganta

En primer lugar, se definen ambas toberas, calculando sus áreas de garganta y los gastos máficos de hidracina en ambas. Se comienza escribiendo la ecuación de combustión de la hidracina, combinándola con la ecuación de descomposición del NH_3 .



Se utilizara los coeficientes para definir de forma más simple la ecuación:

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= \frac{4(1-x)}{3} \\ C &= \frac{(2x+1)}{3} \\ D &= 2x \end{aligned}$$

Con las siguientes expresiones se pueden calcular las propiedades de los productos de la combustión, la masa molecular media de los productos (Mm_{prod}) y C_p medio de los productos ($C_{p,prod}$).

$$\begin{aligned} Mm_{prod} &= \frac{B \times (Mm_N + 3 \times Mm_H) + C \times (2 \times Mm_N) + D \times (2 \times Mm_H)}{B + C + D} \\ &= \mathbf{14,54 \times 10^{-3} kg/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{p,prod} &= \frac{B \times C_{p,NH_3} + C \times C_{p,N_2} + D \times C_{p,H_2}}{B + C + D} \\ &= \mathbf{39,26 \times 10^{-3} J/molK} \end{aligned}$$

A partir de los resultados de Mm_{prod} y $C_{p,prod}$, se calcula el parámetro $\gamma = 1,27$, lo que da $\Gamma(\gamma) = 0,662$.

Con el dato de la relación de expansión de la tobera, $\frac{P_s}{P_c} = \frac{1}{\Pi_{tobera}}$, se obtiene la relación de áreas de las toberas :

$$\epsilon = \frac{\Gamma(\gamma)}{\left(\frac{P_s}{P_c}\right)^{1/\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_s}{P_c}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}} = \mathbf{8,756}$$

Dado que se trata de un satélite de comunicaciones ya en órbita (algunos de ellos operan incluso en órbitas GEO) se asumirá que el sistema opera en vacío.

$$C_{Evac} = \Gamma(\gamma) \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_s}{P_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} + \epsilon \frac{P_s}{P_c} = \mathbf{1,6903}$$

$$= \frac{E}{P_c \times A_g}$$

Se despejan las áreas de garganta de cada tobera, conociendo el empuje suministrado por cada tobera para dimensionarlas:

$$A_{g,1} = \mathbf{4,73mm^2}$$

$$A_{g,2} = \mathbf{0,414mm^2}$$

Para calcular los gastos másicos se debe tener el c^* , que se obtiene mediante la temperatura de combustión. Considerando la ecuación de combustión de la hidracina (2), se procede a calcular T_c :

$$T_c = \frac{A \times \Delta H_{f,N_2H_4} - B \times \Delta H_{f,NH_3}}{B \times C_{p,NH_3} + C \times C_{p,N_2} + D \times C_{p,H_2}} + T_{ref} = \mathbf{1309K}$$

$$c^* = \frac{\sqrt{R_p \times T_c}}{\Gamma(\gamma)} = \frac{P_c \times A_g}{\dot{m}}$$

Finalmente, se obtienen los gastos másicos de hidracina en ambas tobera que se indican a continuación:

$$\dot{m}_1 = \mathbf{3,62g/s}$$

$$\dot{m}_2 = \mathbf{0,318g/s}$$

3. Tanque de propulsante

En este apartado se definirá el tanque de propulsante. Es decir, se calcularán tanto la presión en el tanque y como su volumen. Se sabe que el salto de presión entre el tanque y la cámara de combustión es igual a δP_{iny} (se supone que no hay perdidas de presión, así que la presión del tanque es la presión de inyección), y se conoce P_c .

Se conoce la densidad de la hidracina líquida, y se supone que la hidracina ocupa la totalidad del tanque en el instante inicial. Además, se sabe que el motor cohete dispone de 118 kg de propulsante.

Con estos datos, se definen ambos parámetros (presión y volumen) mediante las siguientes relaciones:

$$P_T = P_c + \delta P_{iny} \times P_c = \mathbf{11bar}$$

$$V_t = \frac{M_p}{\rho_{N_2H_4}} = \mathbf{0,114m^3}$$

4. Sistema de presurización

Por último, se diseña el sistema de alimentación por gas presurizado. Se pide considerar varias combinaciones de gas de presurización y de material de depósito y elegir la mejor opción, estudiando la masa del sistema de alimentación y el volumen del depósito, frente a la misión.

Aplicando el primer principio en un volumen de control igual al volumen ocupado por el gas de presurización en el depósito y en el tanque y considerando que la presión en el tanque (P_T) es constante, ya que el sistema de alimentación cuenta con un regulador de presión, se obtiene:

$$U(t) - U_0 = q_{ot} + \tau_{0t}$$

Teniendo en cuenta que la evolución del gas es adiabática y sin aporte de calor, y empleando la ecuación de estado del gas perfecto, se obtiene la ecuación:

$$\gamma_g P_T V_{gT} + (P_D - P_{D0}) V_D = 0$$

Se aplica esta expresión en el instante final, cuando el tanque se encuentra lleno de gas de presurización: $V_{gT} = V_T$. Para asegurar que la presión en el tanque se mantenga constante hasta el instante final, se debe cumplir:

$$P_{Df} \geq (1 + \alpha) P_T$$

Para el cálculo del instante final se toma el valor límite, $P_{Df} = (1 + \alpha) P_T$, quedando la siguiente relación:

$$V_D = \frac{\gamma_g P_T V_T}{P_{D0} (1 - (1 + \alpha) \frac{P_T}{P_{D0}})}$$

Se puede calcular la masa de gas empleado (W_g), la masa del depósito (W_m), considerándolo esférico de pared delgada, y la masa total del sistema de presurización (W_D):

$$W_g = \frac{P_{D0} V_D}{R_g T_{D0}} \quad (1)$$

$$W_m = \frac{3}{2} P_{D0} V_D \frac{\rho_m}{\sigma_u} \quad (2)$$

$$W_D = W_g + W_m$$

Se puede observar que el volumen del depósito y la masa de gas solo dependen del gas de presurización utilizado, en cambio la masa del depósito dependerá del gas y del material del depósito.

En los siguientes apartados se estudiarán 15 combinaciones, considerando 5 gases de presurización y 3 materiales para el depósito, propuestos en la teoría. Se tomará una temperatura inicial del depósito igual a 20°C.

Gas	M (g/mol)	R (J/kg.K)	γ
H ₂	2,014	4128,3	1,41
H _e	4,002	2077,6	1,66
Aire	28,97	287,0	1,4
CO ₂	44,01	188,9	1,3
A _r	39,94	208,2	1,67

Cuadro 2: Gases de estudio

Material	$\rho_m(kg/m^3)$	$\sigma_u(GPa)$
Aluminio	2810	0,45
Acero inox.	8190	0,54
Material Comp	1600	3,8

Cuadro 3: Materiales del depósito de estudio

Se considera un rango de presión inicial del depósito de 15 valores, empezando con un valor $P_{D0,min}$ tal que:

$$P_{D0,min} > P_{Df} = 12,7Pa$$

4.1. Volumen del depósito

P_{D0} (bar)	H ₂	H _e	Aire	CO ₂	A _r
13	5,067	5,965	5,031	4,672	6,001
14	1,314	1,547	1,304	1,211	1,556
15	0,755	0,889	0,749	0,696	0,894
16	0,529	0,623	0,526	0,488	0,627
17	0,408	0,480	0,405	0,376	0,483
18	0,332	0,390	0,329	0,306	0,393
19	0,279	0,329	0,277	0,258	0,331
20	0,241	0,284	0,240	0,223	0,286
21	0,212	0,250	0,211	0,196	0,252
22	0,190	0,223	0,188	0,175	0,225
23	0,171	0,202	0,170	0,158	0,203
24	0,156	0,184	0,155	0,144	0,185
25	0,144	0,169	0,143	0,132	0,170
26	0,133	0,156	0,132	0,123	0,157
27	0,124	0,146	0,123	0,114	0,146

Cuadro 4: Volumen del depósito (m^3)

En el Cuadro 4 se puede observar que el volumen del depósito no varía mucho de un gas a otro. Esto es debido a que el volumen es función del coeficiente de dilatación γ y este se mueve en un rango de

1,3 a 1,7. Sin embargo se puede observar la gran disminución que sufre el volumen al incrementar la presión inicial del depósito, P_{D_0} .

Finalmente se obtiene que el CO_2 , el cual tiene el menor coeficiente γ , proporciona los volúmenes óptimos, dado que para un mismo valor de presión inicial en el depósito es el que ocupa menos volumen.

4.2. Masa de gas de presurización

P_{D_0} (bar)	H_2	He	Aire	CO_2	A_r
13	5,427	12,70	77,51	109,3	127,5
14	1,515	3,545	21,64	30,53	35,59
15	0,933	2,182	13,32	18,79	21,91
16	0,698	1,633	9,967	14,06	16,39
17	0,571	1,336	8,156	11,50	13,41
18	0,492	1,150	7,021	9,904	11,55
19	0,437	1,023	6,244	8,808	10,27
20	0,398	0,930	5,679	8,010	9,339
21	0,368	0,860	5,248	7,404	8,631
22	0,344	0,804	4,910	6,927	8,075
23	0,325	0,760	4,637	6,542	7,627
24	0,309	0,723	4,413	6,225	7,257
25	0,296	0,692	4,224	5,959	6,947
26	0,285	0,666	4,064	5,733	6,684
27	0,275	0,643	3,927	5,539	6,457

Cuadro 5: Masa de gas de presurización (kg)

En la ecuación (1) se puede observar como varia el peso en función de la presión inicial del depósito, el volumen, la temperatura y la constante R del gas.

Si se compara los diferentes gases a temperatura constante y a una presión inicial dada se puede observar que el peso del gas viene marcado por la constante R, dado que se ha visto en el apartado anterior que el volumen no variará mucho. Así pues, debido a que la R es inversamente proporcional al peso molecular del gas, para gases de bajo peso molecular (H_2 y He) la masa de gas será muy baja y en cambio conforme se aumenta el peso molecular, la masa del gas irá creciendo notoriamente.

También se puede observar en el Cuadro 5 que el peso disminuye cuando la presión inicial del depósito aumenta, así que para minimizar el peso se deberá elegir un gas de baja masa molecular y una presión del depósito alta.

4.3. Masa del depósito

Depósito de Aluminio						Depósito de Acero inoxidable					
P_{D0} (bar)	H_2	H_e	Aire	CO_2	A_r	P_{D0} (bar)	H_2	H_e	Aire	CO_2	A_r
13	61,70	72,64	61,26	56,89	73,08	13	149,9	176,4	148,8	138,2	177,5
14	17,23	20,28	17,10	15,88	20,40	14	41,84	49,26	41,54	38,58	49,56
15	10,60	12,48	10,53	9,776	12,56	15	25,75	30,32	25,57	23,74	30,50
16	7,934	9,340	7,877	7,315	9,397	16	19,27	22,69	19,13	17,77	22,82
17	6,492	7,643	6,446	5,985	7,689	17	15,77	18,56	15,66	14,54	18,67
18	5,589	6,580	5,549	5,153	6,619	18	13,57	15,98	13,48	12,52	16,08
19	4,970	5,852	4,935	4,583	5,887	19	12,07	14,21	11,99	11,13	14,30
20	4,520	5,322	4,488	4,167	5,354	20	10,98	12,92	10,90	10,12	13,00
21	4,178	4,918	4,148	3,852	4,948	21	10,15	11,95	10,07	9,355	12,02
22	3,909	4,602	3,881	3,604	4,629	22	9,493	11,18	9,426	8,753	11,24
23	3,691	4,346	3,665	3,403	4,372	23	8,966	10,56	8,902	8,266	10,62
24	3,513	4,135	3,488	3,239	4,160	24	8,531	10,04	8,471	7,866	10,10
25	3,363	3,959	3,339	3,100	3,983	25	8,167	9,615	8,109	7,530	9,673
26	3,235	3,809	3,212	2,983	3,832	26	7,858	9,251	7,802	7,245	9,307
27	3,125	3,680	3,103	2,882	3,702	27	7,591	8,937	7,537	6,999	8,991

Cuadro 6: Masa del depósito de Aluminio (kg)

Cuadro 7: Masa depósito de Acero inoxidable (kg)

Depósito de Material Compuesto					
P_{D0} (bar)	H_2	H_e	Aire	CO_2	A_r
13	4,160	4,898	4,131	3,836	4,927
14	1,162	1,368	1,153	1,071	1,376
15	0,715	0,842	0,710	0,659	0,847
16	0,535	0,630	0,531	0,493	0,634
17	0,438	0,515	0,435	0,404	0,518
18	0,377	0,444	0,374	0,347	0,446
19	0,335	0,395	0,333	0,309	0,397
20	0,305	0,359	0,303	0,281	0,361
21	0,282	0,332	0,280	0,260	0,334
22	0,264	0,310	0,262	0,243	0,312
23	0,249	0,293	0,247	0,230	0,295
24	0,237	0,279	0,235	0,218	0,281
25	0,227	0,267	0,225	0,209	0,269
26	0,218	0,257	0,217	0,201	0,258
27	0,211	0,248	0,209	0,194	0,250

Cuadro 8: Masa del depósito de material compuesto (kg)

Se puede observar que la masa del depósito no presenta grandes variaciones con el gas de presurización.

La alta densidad del acero inoxidable hace que el peso del depósito sea mucho más elevado en caso de elegir este material. En cambio, el material compuesto es el óptimo, dado que tiene una densidad baja y un límite elástico muy alto, lo que aumenta su capacidad de resistir grandes presiones de gas con un espesor mucho más bajo que los otros dos. En la ecuación 2 se puede observar que con estas características, la masa del depósito será menor.

5. Conclusiones

En este apartado se presentan las conclusiones del análisis del sistema de ciclo presurizado y se justifican las decisiones de diseño.

Los valores del volumen del depósito para cada gas varían ligeramente entre sí por lo que este parámetro no ha sido escogido como criterio de optimización para el sistema de presurización. En cambio, otro criterio más práctico a la hora de optimizar las actuaciones de un lanzador es la masa del sistema, ya que el satélite de comunicaciones al que pertenece este motor de ciclo presurizado podría reducir su coste de lanzamiento o dedicar un mayor peso a otros sistemas. Por lo tanto, este informe pretende estudiar la masa del sistema completo, es decir, la masa del depósito más la del gas que lo contiene, para cada configuración.

Con el objetivo de poder analizar las diferentes configuraciones usadas se presentan los datos de la masa del sistema de presurización para todas las combinaciones, escogiendo una única presión inicial del depósito, P_{D0} ya que para todos sus valores la tendencia de los datos es la misma. Se ha escogido el valor mínimo ($P_{D0} = 13\text{bar}$) ya que las mayores diferencias entre los sistemas se dan para este caso. Estos datos se muestran en el Cuadro 9.

	Aluminio	Acero Inox.	Mat. Comp.
H_2	67,13	155,3	9,587
He	85,33	189,1	17,59
Aire	138,77	226,3	81,64
CO_2	166,23	247,5	113,2
A_r	200,55	305,0	132,4

Cuadro 9: Masa del sistema de presurización (kg)

Se puede observar como la configuración óptima para el sistema presurizado es la de un depósito de hidrógeno hecho de material compuesto, dando una masa total del sistema de alrededor de 9,6 kg. Si nos fijásemos solo en estos datos podríamos concluir que escogeríamos esta combinación de gas y material del depósito, pero dado que en combinación con la Hidracina, el hidrógeno se puede comportar como un oxidante y por tanto se reserva para sistemas que utilizan Hidrógeno como combustible. Nos fijamos en la segunda mejor configuración, la del caso de un depósito de material compuesto con Helio como gas presurizante. Aún así, dado el bajo coste y las facilidades en términos de disponibilidad del aire respecto a cualquier otro gas, es común su uso como gas de presurización.

Finalmente, es necesario destacar que el análisis del ciclo ha sido realizado para un rango de presiones iniciales de depósito relativamente bajas, de entre 13 y 27 bares. No obstante, como observamos que el peso del depósito se reduce para todos los gases al aumentar la presión inicial del depósito, es deseable

que ésta sea lo más alta posible. De todas formas, también hay que tener en cuenta que a partir de una presión inicial alrededor de diez veces mayor que la del tanque se empieza a observar que la reducción del peso que conlleva no merece la pena dado el sobredimensionado del sistema.

A. Matlab Code

```

1  %% DATOS
2
3  masa_cp = 1500;           %[kg]
4  masa_prop = 118;         %[kg]
5
6  emp_1 = 8;               %[N], motor principal
7  emp_2 = 0.7;             %[N], motor secundario
8
9  x = 0.4;
10
11 rho_N2H4 = 1032;          %[kg/m^3]
12 P_c = 10*10^5;           %[Pa]
13 Pi_tobera = 80;          %Pc/Ps
14
15 DeltaP_iny = 0.1;
16
17 Cp_H2 = 29.9;             %[J/mol*K]
18 Cp_N2 = 32.1;             %[J/mol*K]
19 Cp_NH3 = 54.0;           %[J/mol*K]
20 Cp_N2H4 = 98.8;          %[J/mol*K]
21
22 Hf_N2H4 = 50.6*10^3;      %[J/mol]
23 Hf_NH3 = -45.9*10^3;     %[J/mol]
24
25 M_N = 14*10^(-3);        %[kg/mol]
26 M_H = 1*10^(-3);         %[kg/mol]
27
28 T_ref = 298.15;          %[K]
29 T_iny = T_ref;
30 R_u = 8.31446;           %[J/mol*K]
31
32
33 %% Apartado a
34
35 %ecuacion de combustion y decomposicion del N2H4
36 A = 1;                   %N2H4
37 B = (4*(1-x))/3;         %NH3
38 C = (2*x+1)/3;          %N2
39 D = 2*x;                 %H2
40
41 M_prod = (B*(M_N + 3*M_H) + C*2*M_N + D*2*M_H)/(B+C+D);      %Masa
    molecular de los productos [kg/mol]
42 Cp_p = (B*Cp_NH3 + C*Cp_N2 + D*Cp_H2)/(B+C+D);              %Cp medio

```

```

    [J/mol*K]
43 Cp_p_m = Cp_p / M_prod;                                     %Cp medio
    [J/kg*K]
44 R_p = R_u / M_prod;                                         %R
    productos [J/kg*K]
45 Gamma = 1/(1-(R_p/Cp_p_m));
46 G_Gamma = sqrt(Gamma)*(2/(Gamma+1))^( (Gamma+1)/(2*(Gamma-1)) );
47
48 DeltaT = (Hf_N2H4 - B*Hf_NH3)/(B*Cp_NH3 + C*Cp_N2 + D*Cp_H2);
49 T_c = DeltaT + T_ref;
50
51 c_star = sqrt(R_p*T_c)/G_Gamma;
52
53 %Tobera
54 epsilon = G_Gamma / (((1/Pi_tobera)^(1/Gamma))*sqrt((2*Gamma/(Gamma-1))*(1-((1/
    Pi_tobera)^((Gamma-1)/Gamma)))));
55 %satelite de comunicacion : actua en el vacio
56 Ce = G_Gamma*sqrt((2*Gamma/(Gamma-1))*(1-((1/Pi_tobera)^((Gamma-1)/Gamma)))) + epsilon
    *(1/Pi_tobera);
57
58 %Gastos masico y Areas de garganta
59 Ag_1 = emp_1/(P_c*Ce);                                       %Area de
    garganta motor principal [m^2]
60 Ag_2 = emp_2/(P_c*Ce);                                       %Area de
    garganta motor secundario [m^2]
61
62 m_1 = (P_c*Ag_1)/c_star;                                     %gasto
    masico motor principal [kg/s]
63 m_2 = (P_c*Ag_2)/c_star;                                     %gasto
    masico motor secundario [kg/s]
64
65
66 %%Apartado b
67 P_t = P_c + DeltaP_iny*P_c;                                   %presion
    en el tanque [Pa]
68 V_t = masa_prop / rho_N2H4;                                  %volumen
    del tanque [m^3]
69
70
71 %%Apartado c
72 m_out = m_1 + m_2;                                           %gasto
    masico que sale del tanque
73 alpha = 0.15;
74
75 %Propiedades de gas de presurizacion y del deposito (diferentes configuraciones)

```

```

76  %(Aluminio, Acero, Material Compuesto)
77  rho_dep = [2810 8190 1600];                                %[kg/m^3]
78  sigma_dep = [0.45*10^9 0.540*10^9 3.8*10^9];              %[Pa]
79
80  %(H2, He, Aire, CO2, Ar)
81  M_gas = [2.014*10^(-3) 4.002*10^(-3) 28.97*10^(-3) 44.01*10^(-3) 39.94*10^(-3)];    %
      [kg/mol]
82  Gamma_gas = [1.41 1.66 1.4 1.3 1.67];
83  R_gas = [0 0 0 0 0];                                        %
      inicializacion R_gas
84
85  T_d0 = 294;                                                %
      temperatura del deposito al instante inicial
86  %! si cambia la temperatura cambian todas las propiedades
87  N = 15;                                                    %numero de
      valores de P_d0
88  P_d0_min = (1+alpha)*P_t;                                  %valor
      minimal en el linspace de P_d0
89  P_d0 = linspace(13*10^5,27*10^5,N);                       %Presion
      del deposito al instante inicial, P_d0 min = (1+alpha+Gamma_gas*V_tt/vd)*P_t
90
91  gases = 5;                                                  %gas de
      presurizacion considerado (H2, He, Aire, CO2, Ar)
92  masa_gas = zeros(gases, N);
93  Vd = zeros(gases, N);
94
95  masa_alu = zeros(gases, N);
96  masa_t_alu = zeros(gases, N);
97  masa_acero = zeros(gases, N);
98  masa_t_acero = zeros(gases, N);
99  masa_mc = zeros(gases, N);
100 masa_t_mc = zeros(gases, N);
101
102 for j = 1:N
103     for i = 1:gases
104         R_gas(i) = R_u/M_gas(i);
105
106         Vd(i,j) = Gamma_gas(i)*P_t*V_t/(P_d0(j)*(1-(1+alpha)*P_t/P_d0(j)));
107
108         masa_gas(i,j) = P_d0(j)*Vd(i,j)/(R_gas(i)*T_d0);    %masa del
      gaz en funcion del gaz y de P_d0
109
110
111         masa_alu(i,j) = 3*P_d0(j)*Vd(i,j)*rho_dep(1)/(2*sigma_dep(1));
112         masa_t_alu(i,j) = masa_gas(i,j) + masa_alu(i,j);

```

```
113
114     masa_acero(i,j) = 3*P_d0(j)*Vd(i,j)*rho_dep(2)/(2*sigma_dep(2));
115     masa_t_acero(i,j) = masa_gas(i,j) + masa_acero(i,j);
116
117     masa_mc(i,j) = 3*P_d0(j)*Vd(i,j)*rho_dep(3)/(2*sigma_dep(3));
118     masa_t_mc(i,j) = masa_gas(i,j) + masa_mc(i,j);
119
120     end
121 end
```