

PROOSIS | LPRES – clase 1ª – ciclos presurizados

Se pretende estudiar el sistema de presurización con gas inerte de un motor cohete de tipo *pressure-fed*, para lo que se modelará, en condiciones de banco (SLS), el sub-sistema formado por depósito + regulador de presión + tanque descargando al ambiente de la Figura 1.

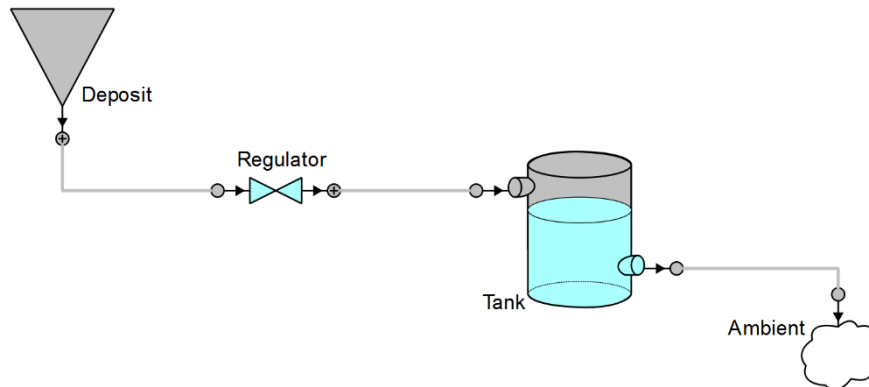


Figura 1 – diagrama del modelo a estudiar

El estudio de las actuaciones (fuera del punto de diseño) de dicho sub-sistema requiere del conocimiento de las áreas características de entrada del gas de presurización al tanque de propulsante y de descarga del propulsante líquido al ambiente.

Para calcularlas, se conocen los siguientes datos de funcionamiento en el punto de diseño:

- Depósito de gas de presurización:
 - He
 - $t_t = 273.15 \text{ K}$
 - $p_t = 250 \text{ bar}$
 - gasto másico desconocido
- Regulador de presión:
 - presión de salida: $p_{t_out} = 22 \text{ bar}$
 - caída mínima de presión: $dp_{min} = 1.5 \text{ bar}$
- Tanque de propulsante:
 - N_2H_4
 - temperatura de diseño: $t_d = 273.15 \text{ K}$
 - presión de diseño: $p_d = 18 \text{ bar}$
 - área de entrada del gas de presurización desconocida (modo de “diseño”)
- Descarga al ambiente:
 - altitud de vuelo = 0 m (SLS)
 - área de descarga del propulsante líquido desconocida (modo de “diseño”)

La condición de contorno necesaria para cerrar el problema de diseño será el gasto másico de propulsante líquido desalojado por unidad de tiempo, que se sabe que es de 100 kg/s para las condiciones de funcionamiento dadas anteriormente.

Generar la partición adecuada (ver Figura 2), y ejecutar un experimento estacionario para calcular dichas áreas de diseño, recordando quitar los *killpoints* de “on bad operation” y “on NaN/Inf” (ver Figura 3).

The figure consists of two screenshots of a software interface for creating a partition in the 'ej1_pressuriz_design' component.

Top Screenshot: PARTITION SETTINGS

The 'PARTITION SETTINGS' panel has a yellow header. Below it, there are tabs for 'Settings' and 'Advanced Settings'. Under 'Settings', there are two sections:

- Wizard panels:** Two checkboxes are present: 'Use wizard for editing the properties of the variables (eg alias)' and 'Use wizard to transform data into unknown variables'. Both are unchecked.
- Partition information:** A checkbox 'Generate mathematical view (HTML)' is checked.

At the bottom, there is a text field 'Name:' with the value 'ej1_design'. Below the text field are buttons: 'Cancel', '< Back', 'Next >', and 'Generate'.

Bottom Screenshot: BOUNDARY WIZARD

The 'BOUNDARY WIZARD' panel has a green header. Below it, there is a message: 'This component has more variables than equations. Please select the boundary variables from the list on the right'.

The panel is divided into two main sections:

- Boundary variables:** On the left, there is a table with two columns: 'Name' and 'Description'. It shows two variables: 'Ambient.I.W' (Mass flow) and 'LPRES.Altitude' (Geometric altitude). Below the table, it says 'Variables: 2' and 'Pending: 0'. There is a 'Check' button.
- Partition variables:** On the right, there is a table with two columns: 'Name' and 'Description'. It shows one variable: 'Regulator.f_in.W' (Mass flow). Below the table, it says 'Filtered Variables: 1'.

Between the two tables are buttons: '< Select', '<< Select All', 'Unselect >', and 'Unselect All >>'. At the bottom, there is a text field 'Name:' with the value 'ej1_design'. Below the text field are buttons: 'Equivalents ...', 'Cancel', '< Back', 'Next >', and 'Generate'.

Figura 2 – partición de diseño del sistema de presurización

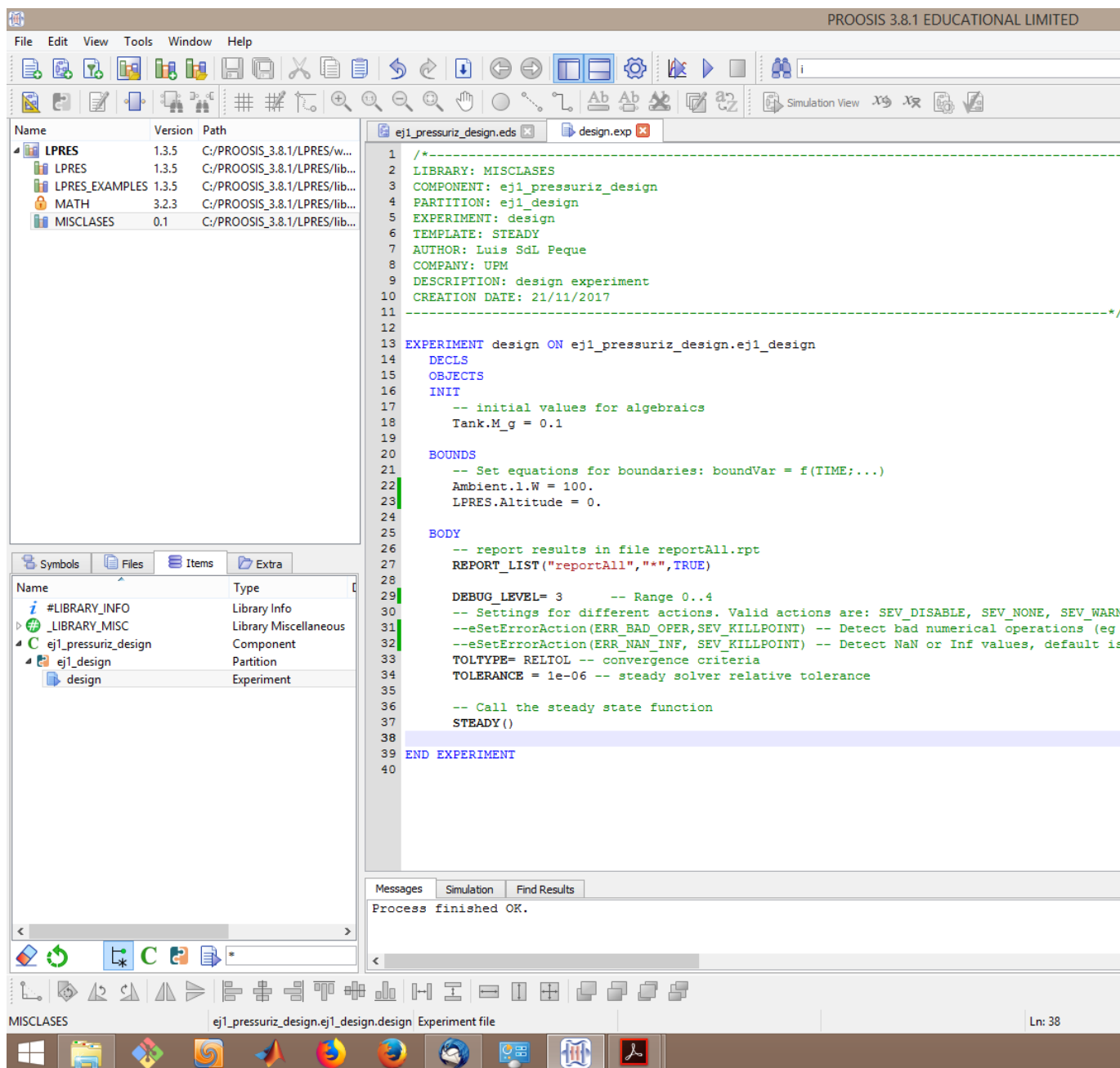


Figura 3 – experimento de diseño del sistema de presurización

De este modo, se obtienen los resultados de diseño mostrados en la Figura 4.

Tab_1	1	2	3	4
Name	Alias	Station	1	
#Calculation id	--	--	steady-1	
#Status	--	--	STEADY_OK	
#ESI	--	--	1:917:11:98	
#Case	--	--		
#Point	--	--		
Ambient.A_d (m^2)	--	--	0.00170883287	
Tank.A_g_d (m^2)	--	--	0.000212082334	
Deposit.f.W (kg/s)	--	--	0.341037525	
Ambient.I.W (kg/s)	--	--	100	
Deposit.f.pt (Pa)	--	--	25000000	
Regulator.f_in.pt (Pa)	--	--	25000000	
Regulator.f_out.pt (Pa)	--	--	2200000	
Tank.g.pt (Pa)	--	--	2200000	
Tank.p_g (Pa)	--	--	1800000	
Tank.l.pt (Pa)	--	--	1800000	
Ambient.l.pt (Pa)	--	--	1800000	
Ambient.p_amb (Pa)	--	--	101325	

Watch variables			
0			
Initial	Inputs	View	
Variable	Value	Value	Unit
Ambient.I.W	100		kg/s
LPRES.Altitude	0		m


```

Output messages
End execution of experiment BODY

- END OF EXPERIMENT -

*****
Simulation statistics
*****
Steady calls      1 (1 OK, 0 NOK)
Errors summary:Fatal: 0, Killpoint: 0, Errors: 0, Warnings: 11(see log file for more info)

Total processor time: 0.594 seconds

```

State: STOP Config file: design Experiment: ej1_pressuriz_design.ej1_design.design

Figura 4 – resultados del punto de diseño

De dichos resultados, lo más importante son las áreas de diseño, que serán las que determinen el comportamiento del sistema cuando éste opere en unas condiciones diferentes a las de diseño analizadas, y que serán *inputs* necesarios, por tanto, para el modelado y análisis de las actuaciones fuera del punto de diseño del sub-sistema propuesto.

Para el cálculo de las actuaciones, se creará un nuevo modelo, idéntico al anterior (se puede usar `Ctrl+C – Ctrl+V` en un nuevo “lienzo”), pero donde tanto el tanque como el componente “ambiente” se cambian a modo “off-design”, y para los cuales se usarán como dato de entrada las áreas calculadas anteriormente (ver Figura 4 y Figura 5).

The figure consists of two screenshots of the 'Attribute Editor' window, showing the configuration for two different components in 'off-design' mode.

Top Screenshot: Tank Component

- Library: LPRES
- Type: Tank
- Name: Tank
- ☒ Show Label
- General tab selected.

Name	Type	Value	Units	Description
PARAMETERS				
Type	ENUM LPRES.OnOffDesign	Off_design		
DATA				
A_g	REAL	0.000212082334	m^2	Gas input area
p_d	REAL	18.e5	Pa	Design tank pressure

Bottom Screenshot: Ambient Component

- Library: LPRES
- Type: Ambient
- Name: Ambient
- ☒ Show Label
- Type tab selected.

Name	Type	Value	Units	Description
PARAMETERS				
Type	ENUM LPRES.OnOffDesign	Off_design		
DATA				
A	REAL	0.00170883287	m^2	Discharge area

Figura 5 – componentes en modo “off-design”

Generar la partición adecuada (ver Figura 6) y un experimento estacionario para comprobar la influencia que las condiciones de contorno tienen (en particular, será de interés el estudio de

diferentes valores de la presión del depósito de gas de presurización) sobre las actuaciones de dicho sub-sistema y el gasto de propulsante líquido suministrado.

New partition in ej1_pressuriz_offd component

Partition Previous Partition Component

BOUNDARY WIZARD
This component has more variables than equations.
Please select the boundary variables from the list on the right

Boundary variables
Needed : 1
Pending : 0

Name	Description
<input type="checkbox"/> LPRES.Altitude	Geometric altitude

< Select
<< Select All
Unselect >
Unselect All >>

Partition variables
Categories : Suggested as boundaries
Filter : *

Name	Description
------	-------------

Variables: 1
Filtered Variables: 0

Check

Boundary selection is valid. Use NEXT button to continue.

Name : ej1_offdesign

Equivalents ... Cancel < Back Next > Generate

New partition in ej1_pressuriz_offd component

Partition Previous Partition Component

ALGEBRAIC WIZARD
A non-linear algebraic equation system (a non-linear box) has been detected.
This wizard helps you to select the minimum set of algebraic variables to solve this box

Algebraic variables
Boxes : 1
Box : 1

Name	Description
<input type="checkbox"/> Tank.M_g	Pressurisation gas Mach number

< Select
<< Select All
Unselect >
Unselect All >>

Non-linear box variables
Categories : Suggested
Filter : *

Name	Description
------	-------------

Variables: 1
Filtered Variables: 0

Check Reduce Minimize

Result: OK. Algebraic selection is valid for this box.
Minimizing algebraic selection in this box.
The selection cannot be minimized. Use NEXT button to continue.

Name : ej1_offdesign

Equivalents ... Reset Cancel < Back Next > Generate

Figura 6 – partición “off-design” del sistema de presurización

Recordar que el valor de la presión del depósito de gas puede cambiarse, como cualquier variable tipo “DATA”: dentro del propio modelo, en la correspondiente pestaña del componente en cuestión (lo que requiere cerrar el monitor, volver a compilar el modelo, validar la partición, y volver a compilar y ejecutar el experimento); o dentro del experimento en sí, en la sección del “BODY”, antes de la llamada al “STEADY () ” (con lo que sólo hay que cerrar el monitor y volver a compilar y ejecutar el experimento); o directamente dentro del monitor (ver Figura 7, donde se ha incluido la presión del depósito de gas dentro del “watch” de Inputs, para poder cambiar su valor sobre la marcha), lo que puede ahorrarnos bastante tiempo al no tener que volver a compilar nada.

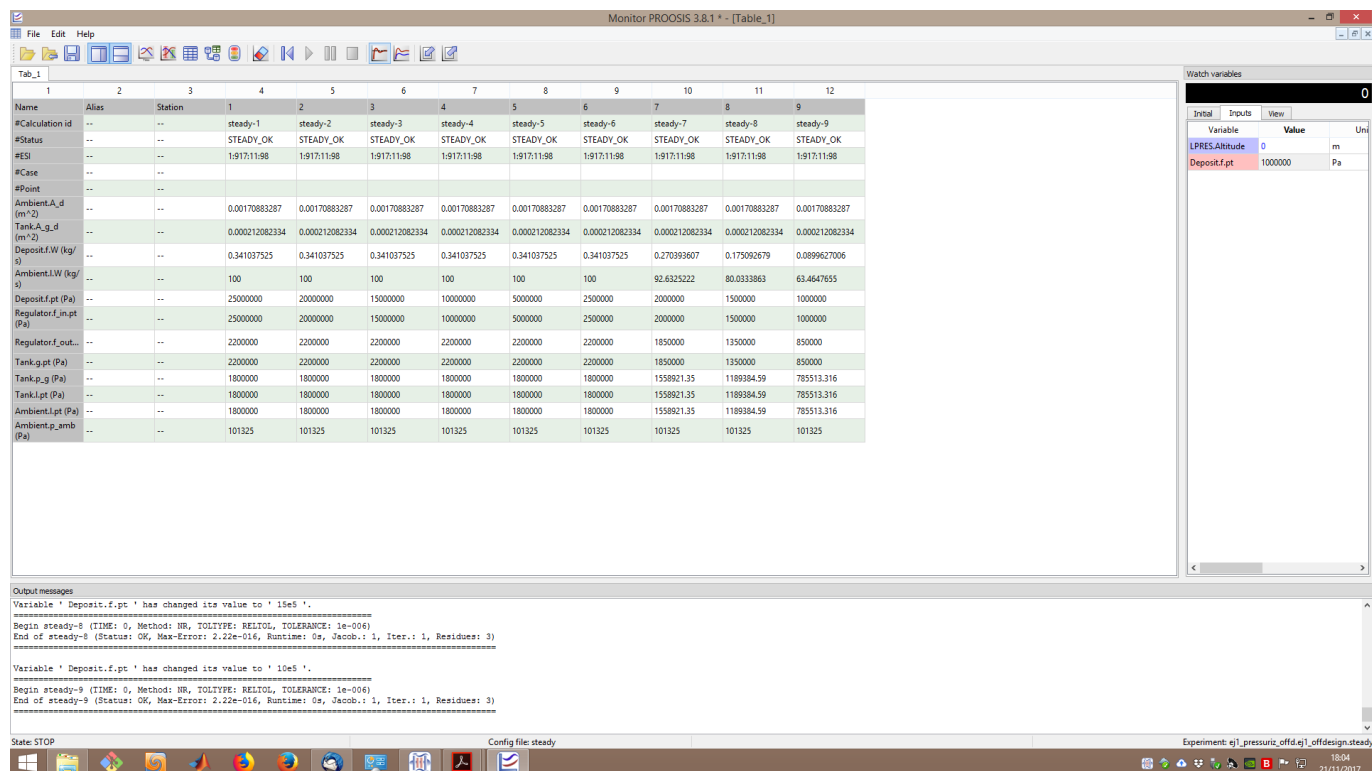


Figura 7 – datos del modelo modificados dentro del monitor

Alternativamente, se pueden ejecutar bloques “FOR” dentro del experimento (ver Figura 8), para no tener que cambiar el valor manualmente y poder especificar de antemano un rango de valores a estudiar y el número de pasos a tomar entre los extremos. Esto permitirá pintar gráficas de “X vs Y” dentro del monitor (ver Figura 9), para estudiar tendencias en detalle.

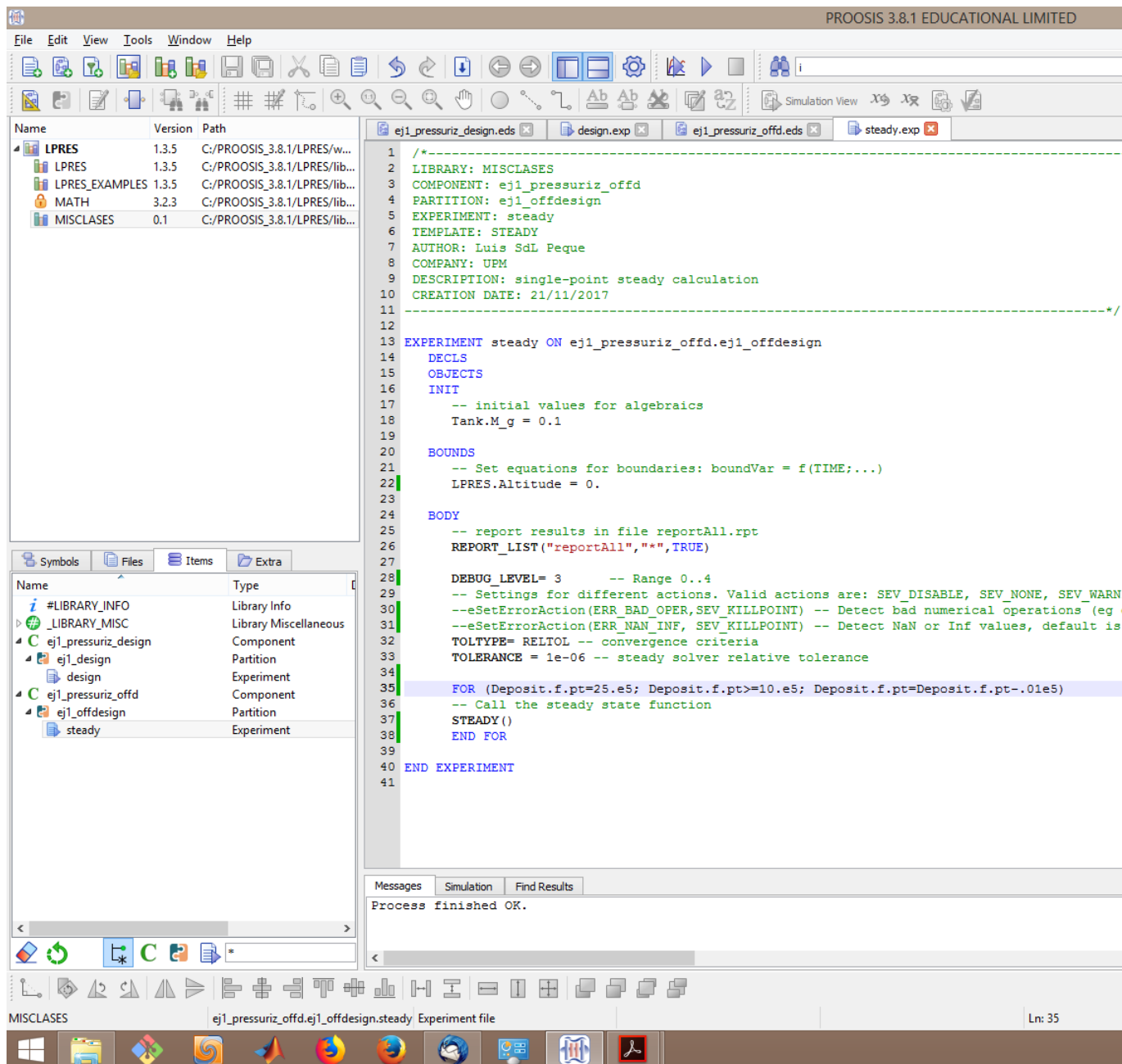


Figura 8 – experimento con bucle “FOR” para estudios paramétricos

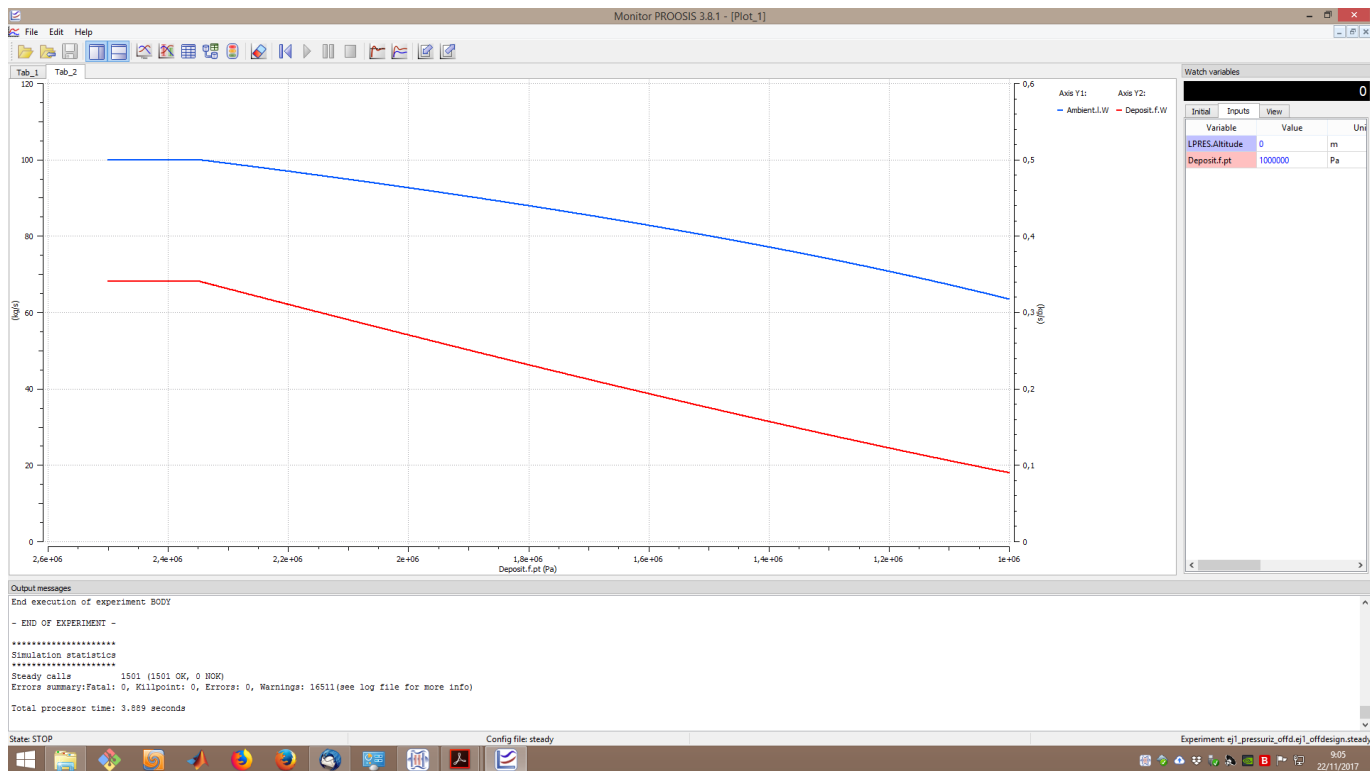


Figura 9 – resultados del estudio paramétrico mediante bucle “FOR”

Además de variar las condiciones de contorno mediante bucles “FOR”, éstas pueden ser modificadas dinámicamente (siguiendo una ley temporal dada, sea como función explícita del tiempo o como resultado de otros cálculos dentro del modelo).

La imposición de dicha ley temporal se puede conseguir convirtiendo la variable en cuestión, que será tipo “DATA” (input para el modelo), primero en variable desconocida (“UNKNOWN”) al crear la partición, y luego seleccionándola como “BOUNDARY” dentro de la propia partición.

Dicho proceso requiere de la creación de una ***nueva partición*** (nuevo “modelo matemático”; esto es, una nueva forma de “re-escribir” las ecuaciones del mismo modelo físico, pero con diferentes *inputs* y *outputs*) dentro del ***mismo modelo*** que ya teníamos para el cálculo de actuaciones *off-design* de nuestro sub-sistema (ver Figura 10).

New partition in ej1_pressuriz_offd component

Partition

Previous Partition

Component

PARTITION SETTINGS

In this panel you can change settings to generate the mathematical model

Settings

Advanced Settings

Wizard panels

☐ Use wizard for editing the properties of the variables (eg alias)

☒ Use wizard to transform data into unknown variables

Partition information

☒ Generate mathematical view (HTML)

Use wizard to change data (declared in the DATA block) to unknown variables

Name : ej1_offdesign2

Cancel

< Back

Next >

Generate

New partition in ej1_pressuriz_offd component

Partition

Previous Partition

Component

DATA TRANSFORMATION WIZARD

Change data to unknown variables

New unknown variables

Selected : 1

Name	Description
<input type="checkbox"/> Deposit.pt	Total pressure

< Select

<< Select All

Unselect >

Unselect All >>

Variables: 1

Partition data

Filter : deposit.f.pt

Name	Description
------	-------------

Filtered Variables: 0

Name : ej1_offdesign2

Cancel

< Back

Next >

Generate

10

BOUNDARY WIZARD
This component has more variables than equations.
Please select the boundary variables from the list on the right

Boundary variables
Needed : 2
Pending : 1

Name	Description
<input type="checkbox"/> LPRES.Altitude	Geometric altitude

< Select
<< Select All
Unselect >
Unselect All >>

Variables: 1

Partition variables
Categories : Able to be selected
Filter : *.pt

Name	Description
<input type="checkbox"/> Ambient.L.pt	Total pressure
<input checked="" type="checkbox"/> Deposit.pt	Total pressure
<input type="checkbox"/> Tank.g.pt	Total pressure

Filtered Variables: 3

Warning: less variables than necessary have been selected. Needed: 2, Selected: 1.

Name : ej1_offdesign2

Equivalents ... Cancel < Back Next > Generate

ALGEBRAIC WIZARD
A non-linear algebraic equation system (a non-linear box) has been detected.
This wizard helps you to select the minimum set of algebraic variables to solve this box

Algebraic variables
Boxes: 1
Box : 1

Name	Description
<input type="checkbox"/> Tank.M.g	Pressurisation gas Mach number

< Select
<< Select All
Unselect >
Unselect All >>

Variables: 1

Check Reduce Minimize

Filtered Variables: 0

Result: OK. Algebraic selection is valid for this box.
Minimizing algebraic selection in this box.
The selection cannot be minimized. Use NEXT button to continue.

Name : ej1_offdesign2

Equivalents ... Reset Cancel < Back Next > Generate

Figura 10 – partición con la presión del depósito de gas como condición de contorno

Tras esto, se puede generar un experimento transitorio, donde la presión del depósito de gas aparecerá como “BOUNDARY”, con lo que se puede escribir cualquier expresión en función de la variable `TIME` para expresar una ley temporal conocida (ver Figura 11).

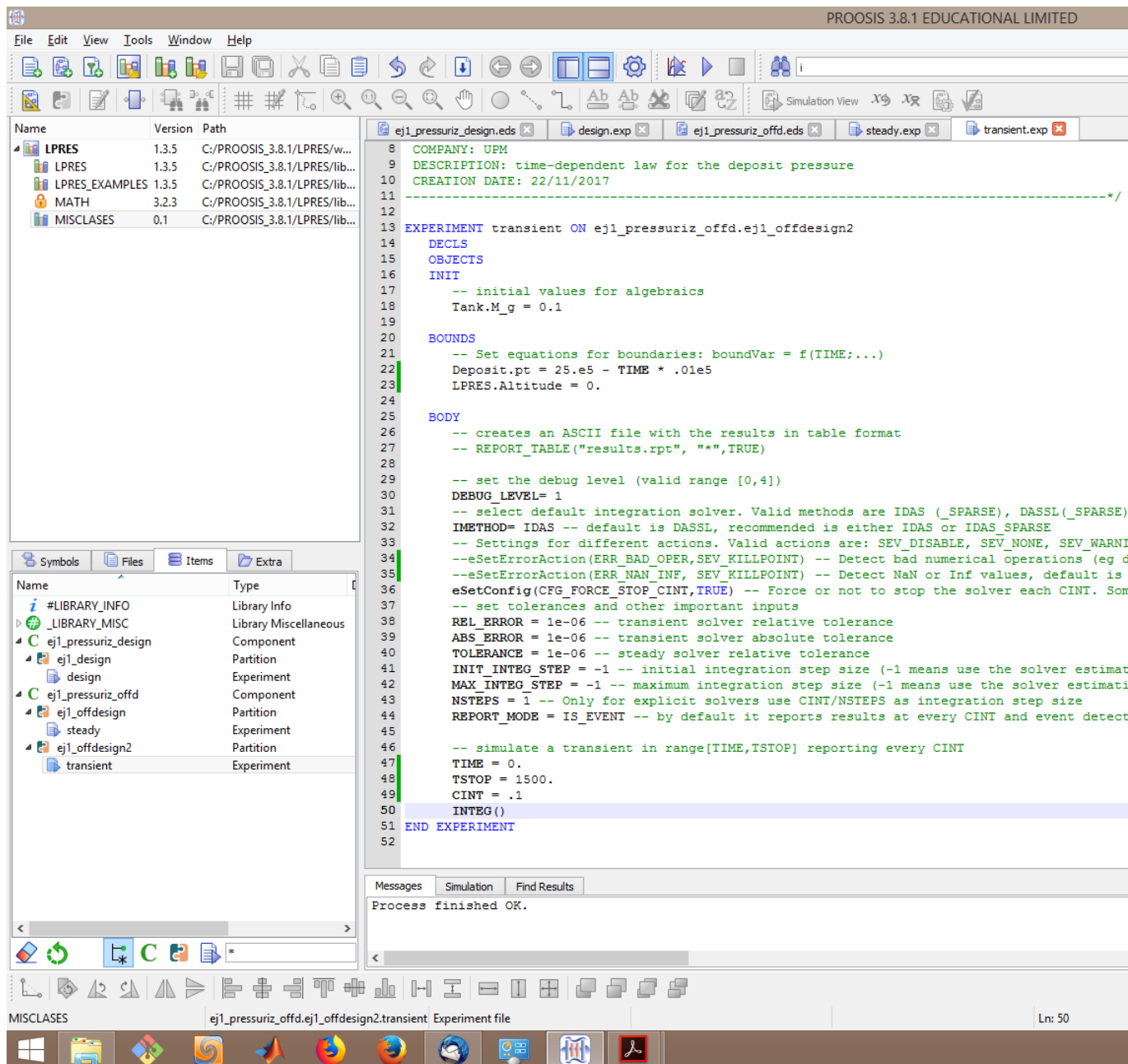


Figura 11 – experimento transitorio con la presión del depósito como función del tiempo

El monitor permite pintar gráficas de “X vs TIME”, como se muestra en la Figura 12.

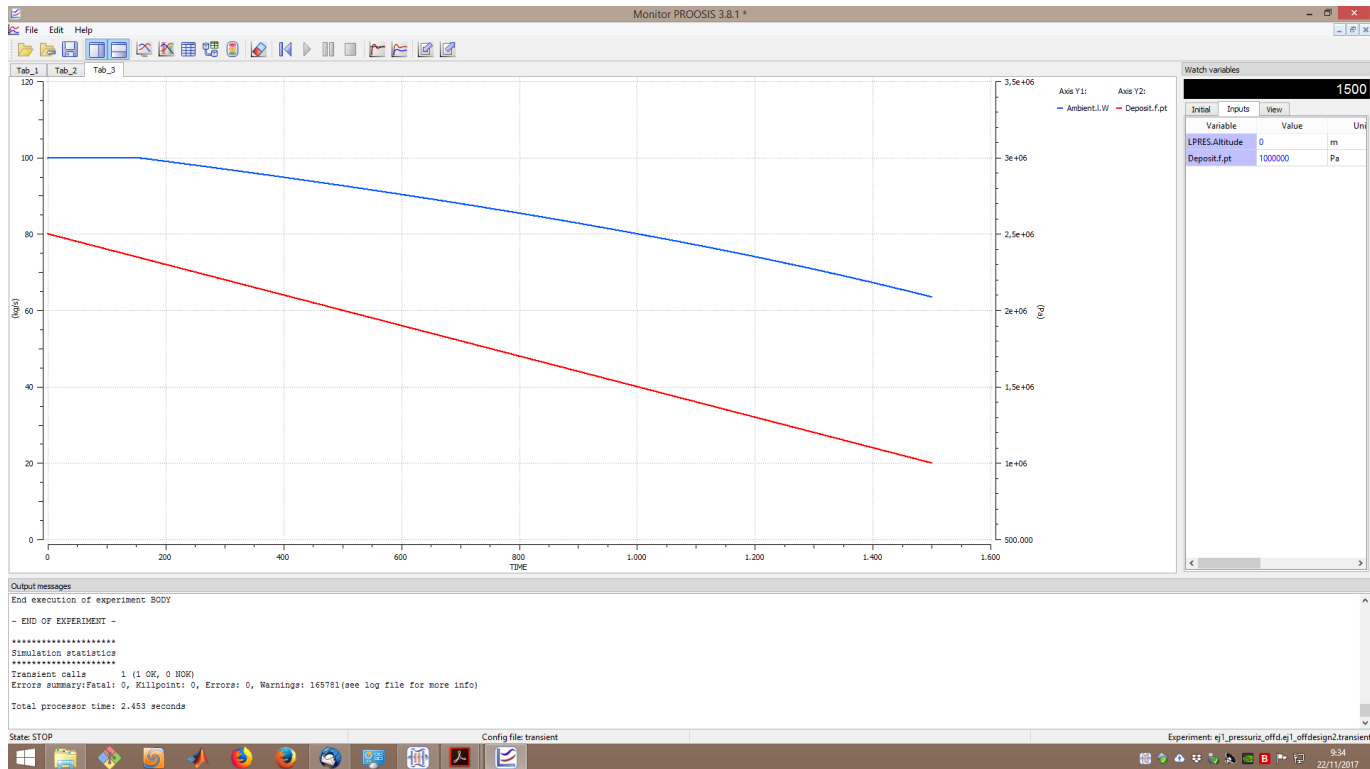


Figura 12 – resultados del experimento transitorio con la presión del depósito como función del tiempo

El último paso es el de la simulación completa del sistema de presurización, por medio de la inclusión de las ecuaciones que gobiernan la descarga del depósito de gas dentro del modelo analizado. Para ello, es necesario editar el *código de componente* del esquemático que estamos considerando (para no perder lo anterior, ya que al editar el *código de componente* se modifica lo que es el modelo en sí, y por tanto las particiones ya creadas dejarán de ser válidas, se recomienda crear un nuevo modelo de “*off-design*”, idéntico en todo al anterior, pero al que añadiremos ciertas líneas de código para declarar datos, variables y ecuaciones).

En particular, simularemos la descarga del depósito como un proceso politrópico, de exponente “*k*”, ecuación (1), asumiendo que el gas en el interior del depósito se comporta en todo momento como gas ideal, ecuación (2).

$$\frac{P_D}{M_D^k} = \frac{P_{D0}}{M_{D0}^k} \quad (1)$$

$$P_D \cdot V_D = M_D \cdot R_{He} \cdot T_D \quad (2)$$

La tercera ecuación, en este caso, será la de continuidad aplicada al depósito de gas, de modo que la variación con el tiempo de la masa de gas inerte contenida en dicho depósito viene dada por el gasto másico de gas de presurización que entra al tanque de propulsante.

Simulando, por sencillez, el caso isoterma (en el que $k = 1$), habrá que añadir las siguientes líneas de código, para definir la masa inicial de gas dentro del depósito, presión y temperatura inicial del depósito, etc.

```

USE MATH VERSION "3.2"

-- EL code of the schematic.
-- The COMPONENT definition lines are blocked for edition.
-- You can edit the parameters clicking over them.

COMPONENT ej1_pressuriz_offd_B (...)
  DATA
    REAL MassD0 = 35.      UNITS u_kg
    REAL PressD0 = 50.e5  UNITS u_Pa
    REAL TempD0 = 273.15  UNITS u_K
    REAL expPoly = 1.      UNITS no_units    -- caso ISOTERMO
    ENUM LPRES.Gases PressurizGas = He
  DECLS
    REAL MassD          UNITS u_kg
    REAL PressD         UNITS u_Pa
    REAL TempD          UNITS u_K
    DISCR REAL VolD      UNITS u_m3
    DISCR REAL PressurizGasVector[ChemName]
    DISCR REAL RgasHe    UNITS u_J_kgK
    DISCR REAL cpHe      UNITS u_J_kgK
    DISCR REAL cvHe      UNITS u_J_kgK
    DISCR REAL gammaHe   UNITS no_units
  INIT
    LPRES.Init_fluid(PressurizGas, PressurizGasVector)
    RgasHe = R(PressurizGasVector)      -- propiedades del gas
    gammaHe = gamma(PressurizGasVector)  -- propiedades del gas
    cpHe = cp(PressurizGasVector)        -- propiedades del gas
    cvHe = cv(PressurizGasVector)        -- propiedades del gas
    VolD = MassD0 * RgasHe * TempD0 / PressD0
    MassD = MassD0
  CONTINUOUS
    MassD' = -Deposit.f.W
    PressD / MassD**expPoly = PressD0 / MassD0**expPoly
    PressD * VolD = MassD * RgasHe * TempD
END COMPONENT

```

Nótese que las variables tipo “DATA” definidas aquí pueden ser empleadas para definir el valor de otros “DATA” de componentes individuales dentro del modelo (como por ejemplo el gas de trabajo del depósito o la temperatura de diseño del tanque, ver Figura 13).

Definir una partición en la que tanto la presión como la temperatura del depósito se convierten de “DATA” a “BOUNDARY” (siguiendo el mismo procedimiento que para el transitorio anterior, ver Figura 10), y un experimento transitorio en el que las condiciones de contorno en presión y temperatura del depósito se asocian con las variables “PressD” y “TempD” calculadas dinámicamente (ver Figura 14).

Attribute Editor

Library: LPRES

Type: Inlet

Name: Deposit

☒ Show Label

General

Type

Name	Type	Value	Units	Description
DATA				
Tt	REAL	0	K	Total temperature
pt	REAL	0	Pa	Total pressure
fluid	ENUM LPRES.LiquidsGases	PressurizGas		Working fluid name

Documentation ... Default Values

Cancel OK

Attribute Editor

Library: LPRES

Type: Tank

Name: Tank

☒ Show Label

General

Type

Name	Type	Value	Units	Description
DATA				
fluid_l	ENUM LPRES.Liquids	N2H4		Working liquid name
T_d	REAL	TempD0	K	Tank temperature

Documentation ... Default Values

Cancel OK

Figura 13 – definición de “DATA” de componentes con variables tipo “DATA” del modelo

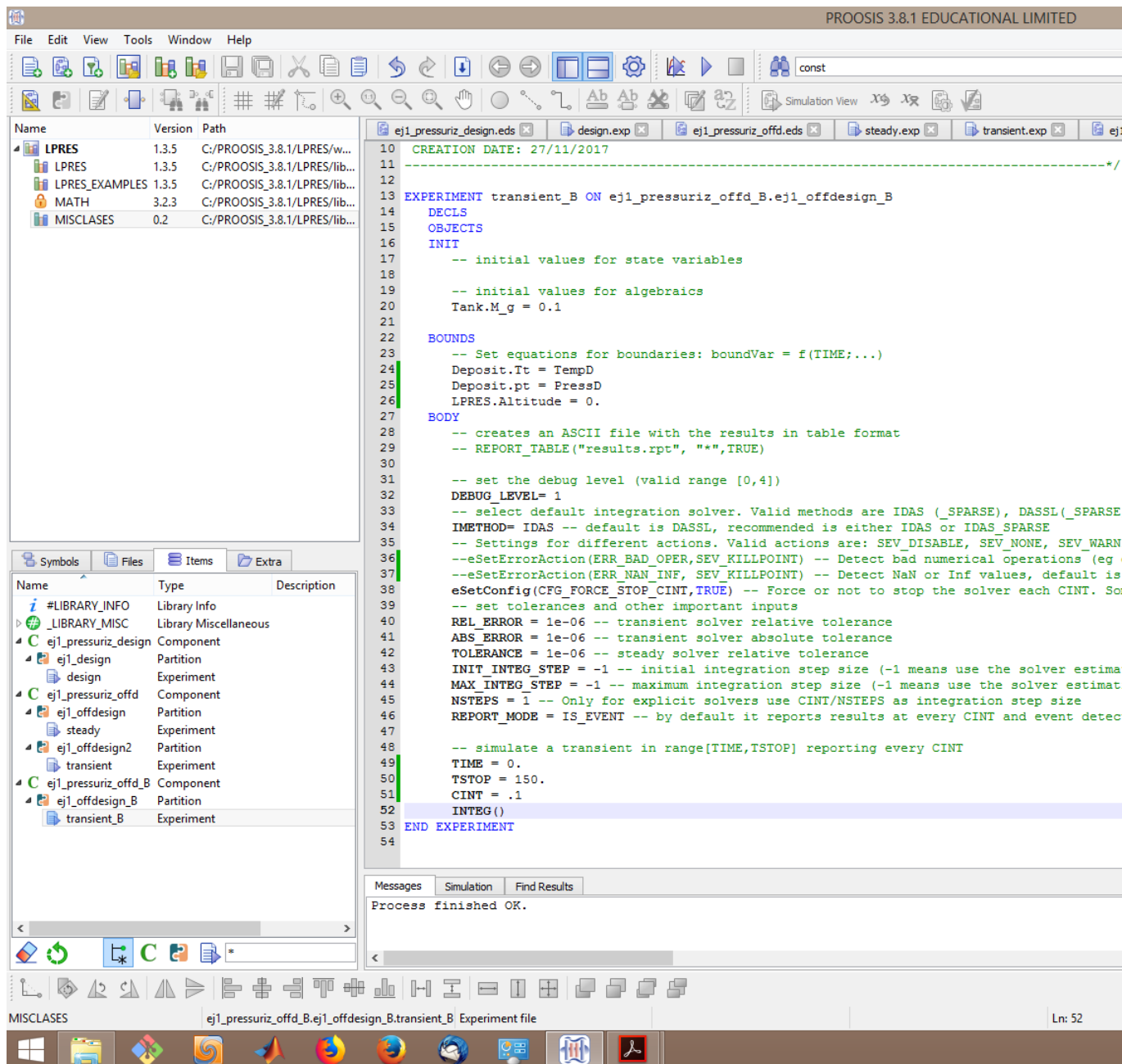


Figura 14 – experimento con condiciones de contorno asociadas a las variables “PressD” y “TempD” calculadas

Los resultados de este experimento se incluyen en la Figura 15.

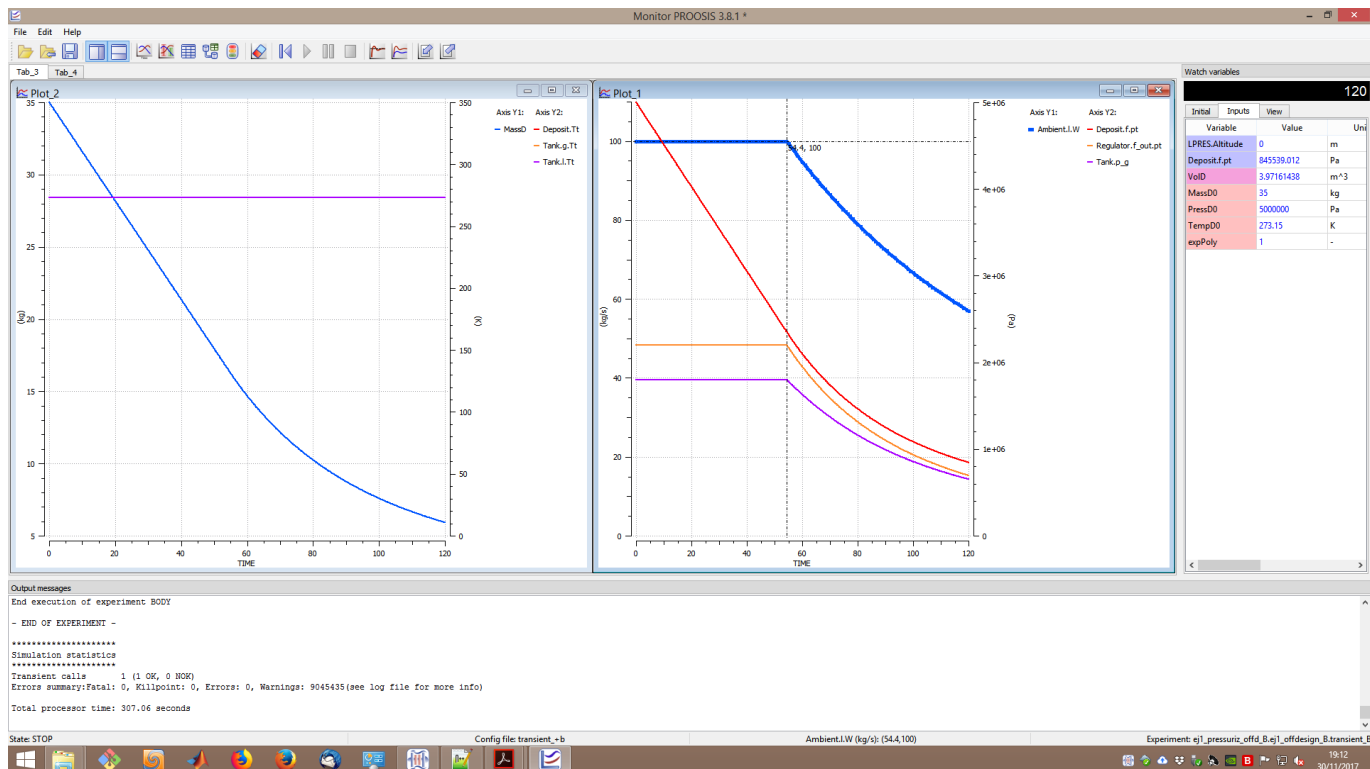


Figura 15 – resultados para la descarga del depósito de gas, caso ISOTERMO (hasta $t_b = 120$ s)

Se dejan como **ejercicios propuestos** para los alumnos:

1. Modificar las condiciones iniciales, incrementando paulatinamente “PressD0” (suponer una limitación estructural de 250 bar como máximo) y/o “MassD0”, hasta encontrar la mínima masa de gas inicialmente en el depósito de presurización que nos permite operar el motor durante la totalidad del $t_b = 120$ s manteniendo el gasto másico de propulsante constante.
2. Añadir al modelo anterior las ecuaciones necesarias para:
 - a) calcular el ΔV que podría producir en un satélite de 15 000 kg de masa total inicial un motor que contase con este sistema de alimentación de la cámara de combustión principal (monopropulsante), suponiendo que su impulso específico es de 2500 m/s, constante en todo momento, e independiente de la presión que se alcance en el sistema de alimentación de propulsante. ¿Qué ocurriría en la realidad cuando la presión de salida del regulador alcanzase el “valor umbral” (lo que ocurre, aproximadamente, a los 54.4 s en la Figura 15)? ¿Seguiría siendo el impulso específico constante? ¿Se podría, por tanto, emplear la Ecuación de Tsiolkovsky para calcular el ΔV ? ¿O qué otra ecuación la sustituiría?
 - b) calcular el calor absorbido a lo largo de todo el proceso por el gas inerte del depósito, q_{0t} , para mantener la temperatura constante durante la totalidad del $t_b = 120$ s de dicho motor.

Los resultados, con las condiciones iniciales de PressD0 = 50 bar y MassD0 = 35 kg consideradas “por defecto”, para ambos apartados a) y b) del ejercicio 2 se recogen, a modo de “comprobación” para los alumnos, en la Figura 16.

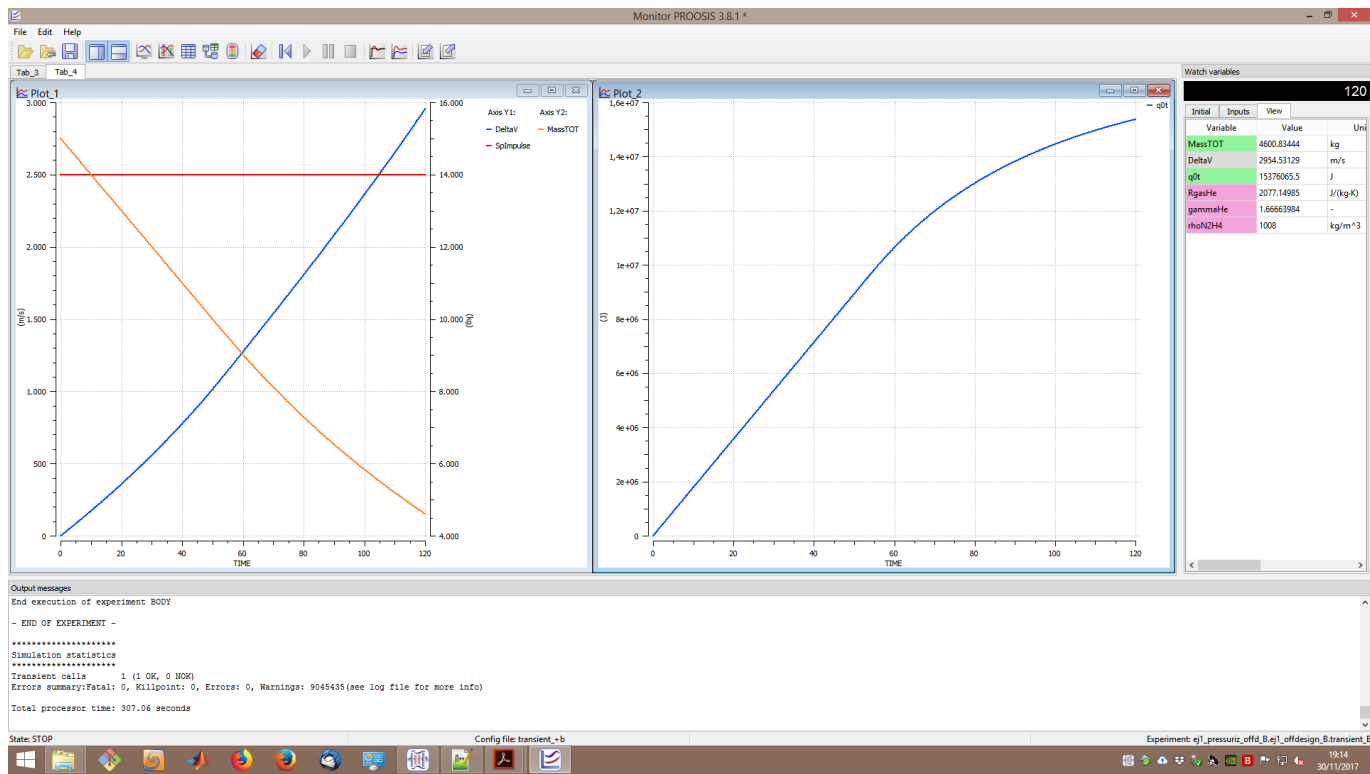


Figura 16 – resultados para la descarga del depósito de gas, caso ISOTERMO (hasta $t_b = 120$ s)