

# Trabajo PROOSIS | LPRES – Actuaciones del motor RL10

## INTRODUCCIÓN

El RL10 (ver Ilustración 1) es un motor cohete de propulsante líquido criogénico utilizado en el Centaur, *upper stage* de varios lanzadores en los últimos años. Construido en Estados Unidos por Aerojet Rocketdyne (anteriormente por Pratt & Whitney Rocketdyne), el RL10 es capaz de producir de 64.7 a 110 kN de empuje en vacío, dependiendo de la versión que se considere. El RL10 fue el primer motor cohete de hidrógeno líquido que se construyó en Estados Unidos. El desarrollo del motor por Marshall Space Flight Center y Pratt & Whitney comenzó en los años 50, siendo su primer vuelo en 1961. Han volado varias versiones del motor, y dos de ellas, el RL10A-4-2 y el RL10B-2, todavía se siguen produciendo y volando en el Atlas V y el Delta IV.

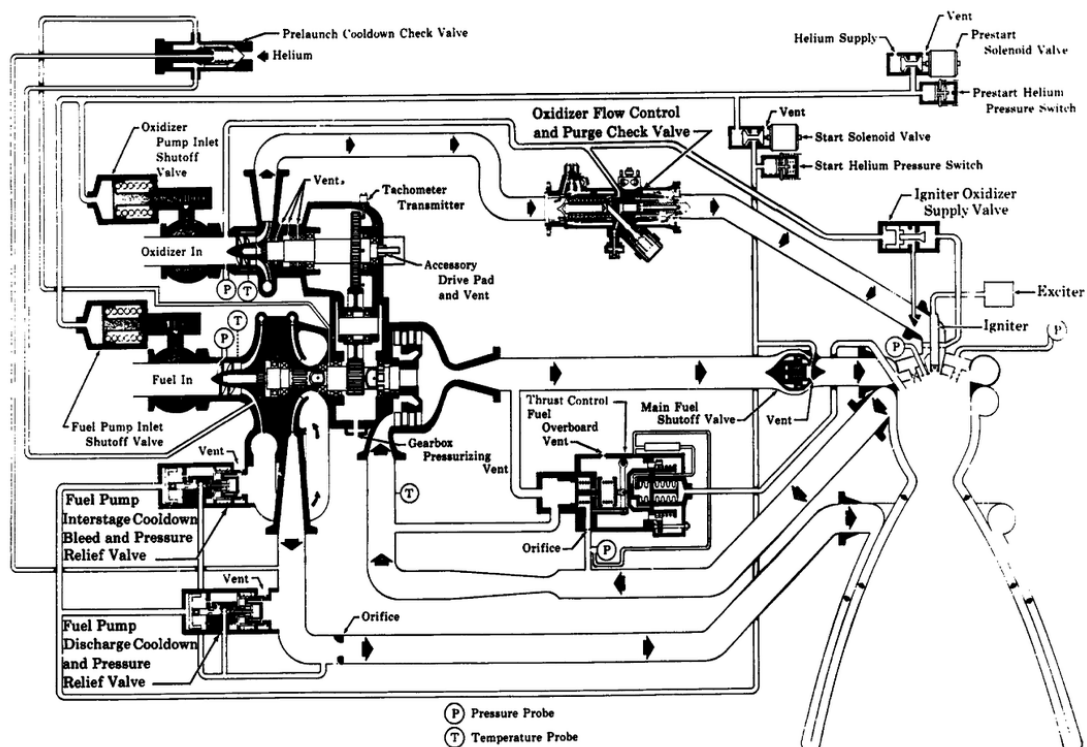


Ilustración 1 – Esquema del ciclo del motor cohete RL10

Se pretende hacer un estudio preliminar simplificado de las actuaciones de dicho motor, para lo que se pide desarrollar un modelo en PROOSIS | LPRES siguiendo el esquema de la Ilustración 2, con el que posteriormente se harán los análisis tanto en punto de diseño como en *off-design*.



<b>Component:</b> Tank_O	
<b>Type:</b> LPRES.Inlet	
<b>Parameters (Different from default values):</b>	
Name	Value
Type	Unknown_W
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
Tt	98.05556
pt	3.206062e5

(nótese que el tanque de oxidante, funcionará, lógicamente, con “LOX”)

<b>Component:</b> HeadLoss_TF	
<b>Type:</b> LPRES.Regulator	
<b>Parameters (Different from default values):</b>	
Name	Value
Type	Known_dp
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
dp	3254.325

<b>Component:</b> HeadLoss_TO	
<b>Type:</b> LPRES.Regulator	
<b>Parameters (Different from default values):</b>	
Name	Value
Type	Known_dp
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
dp	5502.016

<b>Component:</b> Pump_F	
<b>Type:</b> LPRES.Pump	
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
eta_d	.573907002
phi_d	0.0656
psi_d	0.2533
dp	73.58e5

<b>Component:</b> Pump_O	
<b>Type:</b> LPRES.Pump	
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
eta_d	.6508
phi_d	0.03027
psi_d	0.05393
dp	42.82e5

**Component:** Gearbox  
**Type:** LPRES.Gearbox

**Data (Different from default values):**

Name	Value
GR	2.43566574

**Component:** Turbine  
**Type:** LPRES.Turbine

**Parameters (Different from default values):**

Name	Value
Type_AC	Angles

**Data (Different from default values):**

Name	Value
eta_d	.7353
alpha_2	45.
alpha_4r	-75.
M	1.
rpm	38172.635
pi	1.8

**Component:** CoolingJacket  
**Type:** LPRES.CoolingJacket

**Data (Different from default values):**

Name	Value
L	1.475994
a	.00100103471
b	.00813274823
N	180
k_w	16.09
t_w	.000583419169

**Component:** CombCha  
**Type:** LPRES.CombCha

**Parameters (Different from default values):**

Name	Value
Cooled	Yes

**Data (Different from default values):**

Name	Value
eta_d	0.99
Q_comb	14.7e6
cp_P	3700
M_P	14.25
AR	56.88798558
p_c	3275010.
AR_r	14
A_wet	2.521128707

<b>Component:</b> SplitFrac	
<b>Type:</b> LPRES.SplitFrac	
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
TPL	1.

<b>Component:</b> Junction	
<b>Type:</b> LPRES.Junction	
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
TPL	1.

<b>Component:</b> HeadLoss_Turb	
<b>Type:</b> LPRES.Regulator	
<b>Parameters (Different from default values):</b>	
Name	Value
Type	Known_dp
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
dp	124105.6

<b>Component:</b> HeadLoss_Junct	
<b>Type:</b> LPRES.Regulator	
<b>Parameters (Different from default values):</b>	
Name	Value
Type	Known_dp
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
dp	250000

<b>Component:</b> Injector_F	
<b>Type:</b> LPRES.Injector	
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
W	2.70069069

<b>Component:</b> Injector_O	
<b>Type:</b> LPRES.Injector	
<b>Data (Different from default values):</b>	
Name	Value
W	16.3526821

El regulador de fuel, `Regulator_F`, debe estar en modo de “diseño”, `Design`, para que la caída de presión que debe imponerse en dicho componente sea calculada como un *output* de la simulación, en base a las condiciones de diseño especificadas.

Con estos datos, se está en condiciones de generar una partición, en la que la única *boundary* necesaria debería ser la altitud de vuelo de diseño, `LPRES.Altitude`. Genere un experimento estacionario, e imponga como condición de contorno una altitud de 9000 m.

- a) Se pide obtener la geometría necesaria para los cálculos “fuera de diseño” de todos los componentes de dicho modelo.
- b) Obtenga, además, el valor de la caída de presión que es necesario imponer en el regulador de fuel, `Regulator_F.dp_d`, en dicha condición de diseño.
- c) Observe la evolución a lo largo del ciclo de las variables de presión y temperatura de remanso, y comente los resultados.
- d) Obtenga, por último, los valores de empuje e impulso específico del RL10 en sus condiciones de diseño. Comente, brevemente, las principales causas de las posibles discrepancias entre estos valores obtenidos mediante los modelos simplificados de PROOSIS | LPRES y los valores que el motor proporcionaría en la vida real.

## APARTADO 2 – ACTUACIONES

Para el estudio de las actuaciones del motor RL10, se procede a cambiar el modo de operación de las bombas, la turbina, los inyectores y la cámara de combustión a modo “fuera de diseño”, `Off_Design`. La geometría necesaria como *input* para el cálculo de las actuaciones de todos estos componentes será la obtenida en el apartado anterior.

La regulación del empuje se va a llevar a cabo a través del regulador de fuel, `Regulator_F`, que permitirá regular el gasto másico que atraviesa la turbina y, con ello, los parámetros más relevantes del ciclo. Para ello, el modo de operación del regulador de fuel debe cambiarse a modo `Known_dp`, y el valor de la caída de presión, `Regulator_F.dp`, que se le impone por defecto puede ser el de diseño, calculado en el apartado anterior.

Con estos datos se está en condiciones de generar una partición, en la que la única *boundary* necesaria debería ser la altitud de vuelo, `LPRES.Altitude`. Genere un experimento estacionario, imponga como condición de contorno una altitud de 9000 m (la de diseño), y compruebe que, efectivamente, se recuperan todos los valores obtenidos en diseño<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> **NOTA:** para facilitar la convergencia, se recomienda poner especial cuidado en que los valores iniciales para las iteraciones estén próximos al punto de diseño del apartado anterior. En particular: en la turbina, se recomienda hacer `Turbine.M = 0.1` para facilitar la convergencia desde una situación de desbloqueo en la misma; en la bomba de fuel, se recomienda hacer `Pump_F.U_0 = 850 m/s`; en la bomba de oxidante, se recomienda hacer `Pump_O.U_0 = 350 m/s`; en la cámara de combustión, se recomienda hacer `CombCha.T_c0 = 3300 K`, próxima a la temperatura de cámara en diseño, y `CombCha.W_F0 = 2.7 kg/s`, del mismo modo; y, por último, en el propio experimento, se recomienda especificar, dentro del bloque “INIT”, un valor inicial para la `Junction.f_in1.Tt = 200 K`.

Como ejercicio previo, se va a proceder a estudiar la influencia de la altura de vuelo en las actuaciones del motor, manteniendo en todo instante el *punto de operación* constante e igual al de diseño mediante la imposición del valor nominal de `Regulator_F.dp`.

- a) Se pide obtener, en este caso, la variación del parámetro de velocidad característica, el coeficiente de empuje, el impulso específico, el empuje y el gasto másico total, cuando la altura de vuelo varía entre 0 km y 100 km, sin actuar sobre el sistema de regulación de empuje del motor.

Una vez analizado el comportamiento del motor a distintas alturas de vuelo (siempre en *condiciones nominales de operación*), se va a proceder ahora a estudiar las actuaciones del motor RL10 (de un modo muy simplificado) al ir variando la caída de presión en el regulador de fuel, `Regulator_F.dp`, mientras se mantiene en este caso la altura de vuelo constante e igual a la del punto de operación de diseño, `LPRES.Altitude = 9000 m`.

Para ello, se puede optar tanto por un experimento estacionario dentro de la partición que ya se ha creado, empleando bucles `FOR` para dar distintos valores a la caída de presión en el regulador de fuel antes de cada llamada a la función `STEADY()`; como por la generación de una nueva partición, en la que la variable `Regulator_F.dp` se convierta en incógnita para luego seleccionarla como *boundary*, y poder así definir un experimento “pseudo-transitorio” en el que ésta vaya cambiando con el tiempo.

Para obtener curvas suficientemente representativas, el rango de caídas de presión en el regulador de fuel debería ser amplio. Se estudiarán variaciones de `Regulator_F.dp` entre, al menos, un valor mínimo de 25 bar y un valor máximo de 40 bar.

- b) Se pide representar en una gráfica el parámetro de gasto (*cuasi*-)adimensional de la turbina (deberá definirlo dentro del modelo) frente a la caída de presión en el regulador de fuel, `Regulator_F.dp`, y comentar la curva obtenida.
- c) Represente gráficamente la variación del gasto másico total en la tobera, de la presión y la temperatura de cámara, así como la relación oxidante/reductor, al ir variando la caída de presión en el regulador de fuel.
- d) Obtenga, además, la curva de variación de la fracción de gasto másico que atraviesa la turbina (esto es, gasto másico que atraviesa la turbina dividido entre gasto másico total de fuel en el inyector) frente a la caída de presión en el regulador de fuel. Comente brevemente la fenomenología involucrada en el proceso de regulación de los parámetros del ciclo mediante la actuación en `Regulator_F.dp` únicamente.
- e) Obtenga, por último, las curvas del parámetro de velocidad característica, el coeficiente de empuje, el impulso específico y el empuje proporcionado por el motor frente a la caída de presión impuesta en el regulador de fuel; y coméntelas brevemente.

### APARTADO 3 – OPERABILIDAD & CONTROL

Como se ha podido ver en el apartado anterior, la relación de oxidante/reductor en la cámara de combustión no se mantiene constante al ir variando la caída de presión impuesta en el regulador de fuel. Eventualmente, si estas variaciones de la relación oxidante/reductor se alejan demasiado de la relación estequiométrica, pueden aparecer problemas por inestabilidad de combustión que deberían ser evitados.

Como primera aproximación al “control” de un motor cohete de propulsante líquido, se va a suponer que la regulación de empuje estudiada en el apartado anterior por medio de la actuación sobre la caída de presión en el regulador de fuel, debe ir acompañada en todo momento de un sistema que asegure la *operabilidad* del motor: esto es, que se asegure, por ejemplo, de que la relación oxidante/reductor se mantiene siempre dentro de unos determinados márgenes de estabilidad definidos previamente.

Por simplicidad, se va a estudiar una versión simplificada de dicho sistema de “control”, que tiene por objetivo mantener la relación oxidante/reductor constante (e igual a la de diseño) en cualquier condición de operación. Para ello, se procede a añadir en el modelo anterior un regulador de presión en el lado del oxidante, *Regulator\_O* (ver Ilustración 3).

Dicho *Regulator\_O* funcionará en modo de “diseño”, *Design*, puesto que el objetivo será calcular la caída de presión necesaria en dicho componente para asegurar, dependiendo del valor de caída de presión en el regulador de fuel con el que opere el motor en cada instante, que la relación oxidante/reductor se mantiene constante.

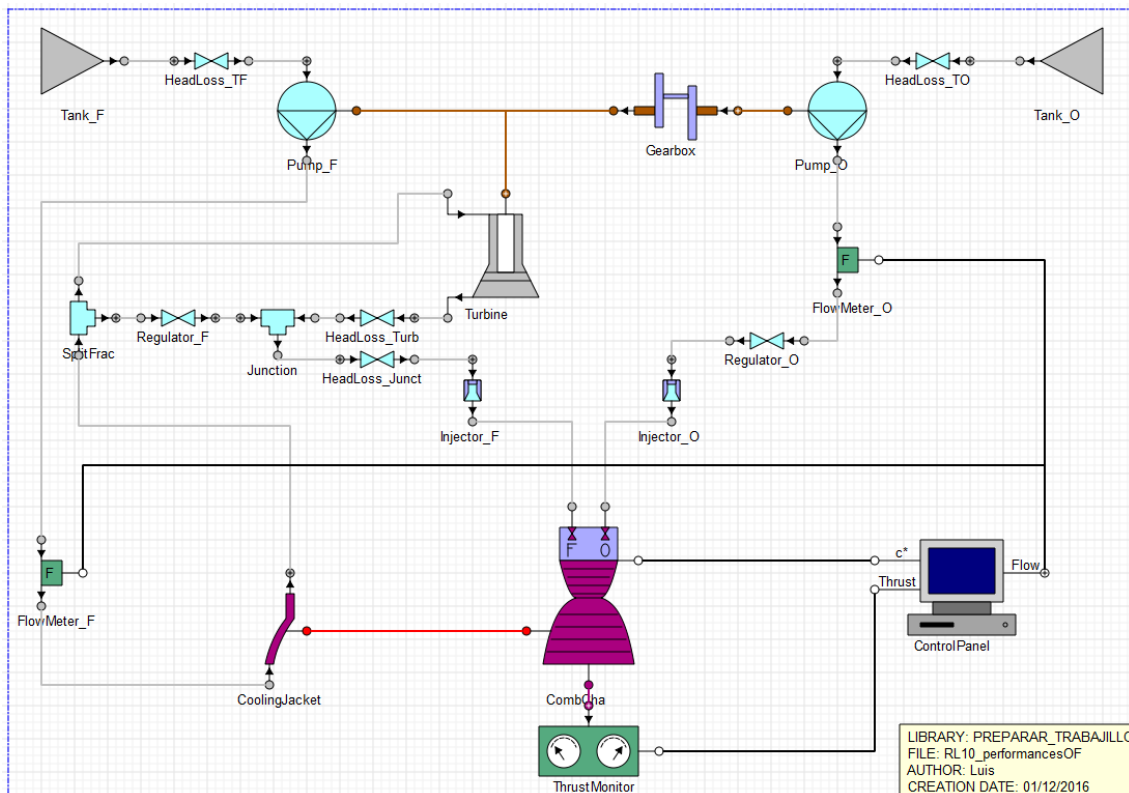


Ilustración 3 – Modelo desarrollado en PROOSIS | LPRES para el estudio del “sistema de control” del motor RL10

Con este nuevo modelo, se puede generar una nueva partición, en la que habrá una nueva *boundary*, aparte de la altitud de vuelo, *LPRES.Altitude*, que corresponde con una condición de contorno adicional que debe ser impuesta para poder determinar el valor de la nueva incógnita introducida: *Regulator\_O.dp\_d*. Puesto que lo que se pretende es mantener la relación oxidante/reductor constante en todo momento, e imponer que su valor sea igual al de diseño, se procede a seleccionar *CombCha.OF* como esa nueva *boundary*. Al



igual que en el apartado anterior, se está en condiciones de generar un experimento estacionario, en el que se imponga `LPRES.Altitude = 9000 m` y el valor de `CombCha.OF` igual al valor de diseño; y se puede comprobar con esto que se recuperan todos los valores obtenidos en condiciones de diseño.

Vuelva a definir un experimento en el que se explore, de nuevo, el mismo rango de `Regulator_F.dp` que en el apartado anterior (del mismo modo, se puede optar por la opción del “*pseudo-transitorio*”, lo que requeriría de una nueva partición para convertir la variable `Regulator_F.dp` en incógnita y así poder seleccionarla como *boundary*; o por la opción de generar un estudio paramétrico de estacionarios mediante bucles `FOR`), y compare los resultados obtenidos en uno y otro caso.

- a) En particular, se pide comparar las curvas de la relación oxidante/reductor, de la temperatura de cámara y del parámetro de velocidad característica, y explicar brevemente el “acusado” cambio de tendencia en las mismas, respecto de las obtenidas en el apartado anterior.
- b) Represente gráficamente la curva de la caída de presión necesaria en el regulador de oxidante, `Regulator_O.dp_d`, frente a la caída de presión impuesta en el regulador de fuel, `Regulator_F.dp`, para mantener la relación oxidante/reductor constante en todo momento y comente la viabilidad del “sistema de control” propuesto.

#### **APARTADO 4 – DISEÑO DE UN SISTEMA DE REGULACIÓN DE EMPUJE ALTERNATIVO**

Se pide proponer (y, si fuera posible, simular y ensayar en PROOSIS | LPRES para comprobar su viabilidad), algún sistema de control de empuje alternativo que, introduciendo los mínimos cambios posibles en la configuración del motor RL-10, permita la regulación de empuje en rangos similares a los del sistema original (sin el regulador de presión en el lado del oxidante, `Regulator_O`, introducido en el apartado anterior), pero manteniendo constante e igual a su valor nominal de diseño la relación O/F de la cámara de combustión principal en todo momento, e independientemente de la caída de presión que se imponga en el “`Regulator_F`”.

#### **APARTADO 5 – VOLUNTARIO**

Mínimo 10, máximo 20, líneas con vuestras impresiones acerca de las horas de clase dedicadas a PROOSIS | LPRES durante este curso de Propulsión Espacial y Lanzadores. Tiempo dedicado a dichas “clases” en el aula de informática, utilidad/efectividad de esas horas de clase a la hora de aprender/entender el modelado/simulación de motores cohete de propulsante líquido, así como el diseño/análisis de actuaciones/operación de “sistemas complejos” en ingeniería, y cosas que consideráis que se podrían mejorar de cara al futuro.