



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



EPS

Escuela Politécnica Superior
Universidad de Málaga

TRABAJO FIN DE GRADO

CREACIÓN DE ENTORNO DE SIMULACIÓN EN INGRAVIDEZ CON INTERACCIÓN ENTRE SATÉLITE Y ROBOT

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto


Autor: RAFAEL CERVILLA RIVAS

Tutor: CARLOS JESÚS PÉREZ DEL PULGAR MANCEBO

Diciembre de 2016



ÍNDICE

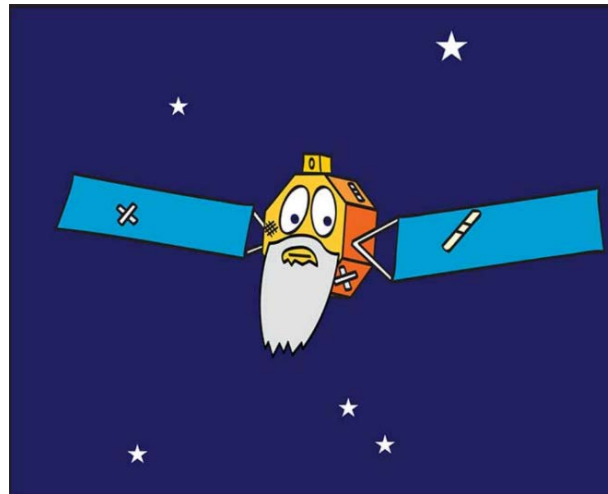


1	INTRODUCCIÓN
2	ENTORNO DE SIMULACIÓN
3	MODELOS DESARROLADOS
4	VALIDACIÓN



1. INTRODUCCIÓN.

A lo largo de estos años ha acaecido un especial interés por la supresión de escombros espaciales, particularmente de satélites muertos, debido al riesgo de colisión con otros satélites en funcionamiento.



Viñeta de un satélite inactivo. Fuente: NASA Space Place.

- ✘ A la deriva.
- ✘ Parámetros de inercia inciertos.
- ✘ Complejidad dinámica de los sólidos rígidos en rotación.

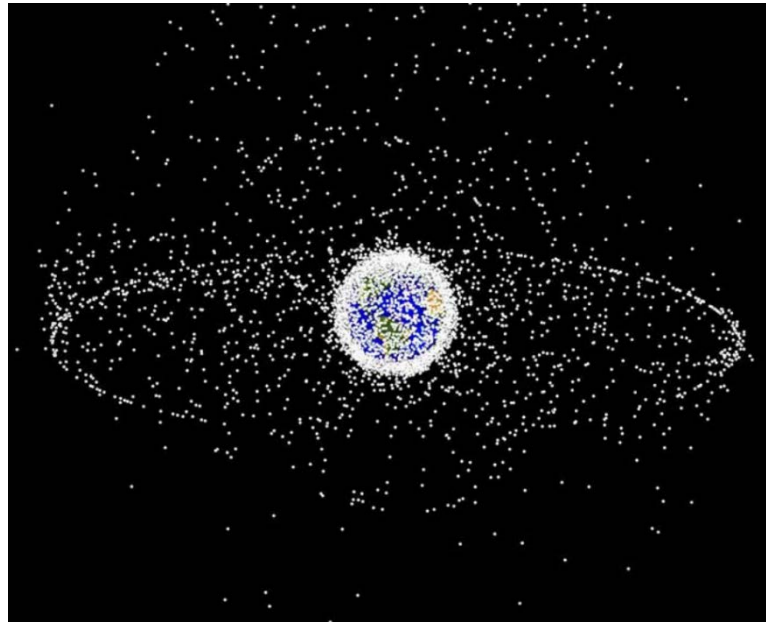
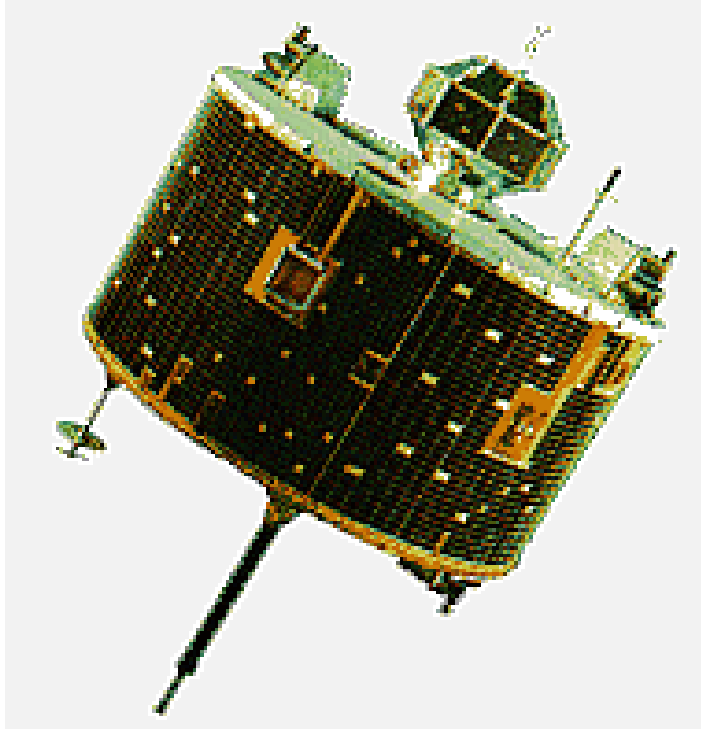


Imagen realizada por ordenador que señala los satélites inactivos actualmente rastreados en la órbita de la Tierra. Fuente: NASA Space Place.



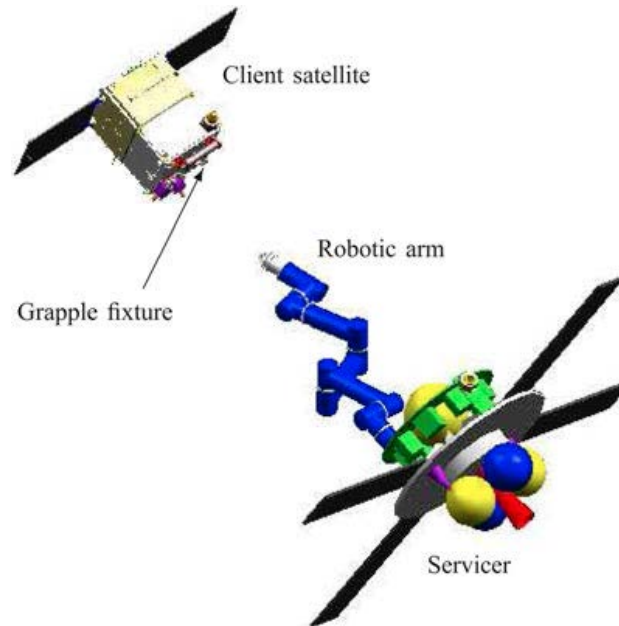
*M-3SII: 143 kg de masa y 42 kg de combustible.
Fuente: NSSDCA.*



*Delta II: 494 kg de masa y 142 kg de combustible.
Fuente: NSSDCA.*

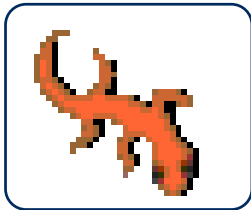
- ✓ Predicción del movimiento en tiempo real: sistema de visión guiada.

El artículo que inspira este trabajo se denomina: *Un esquema de predicción y planificación de movimiento para la captura robótica guiada visualmente de objetos flotando libremente a la deriva con dinámica incierta.*



Satélite de servicio intentando capturar un satélite cliente. Fuente: artículo mencionado.

2. ENTORNO DE SIMULACIÓN.



V-REP

- Simulador de robots.
- Arquitectura de control distribuida.



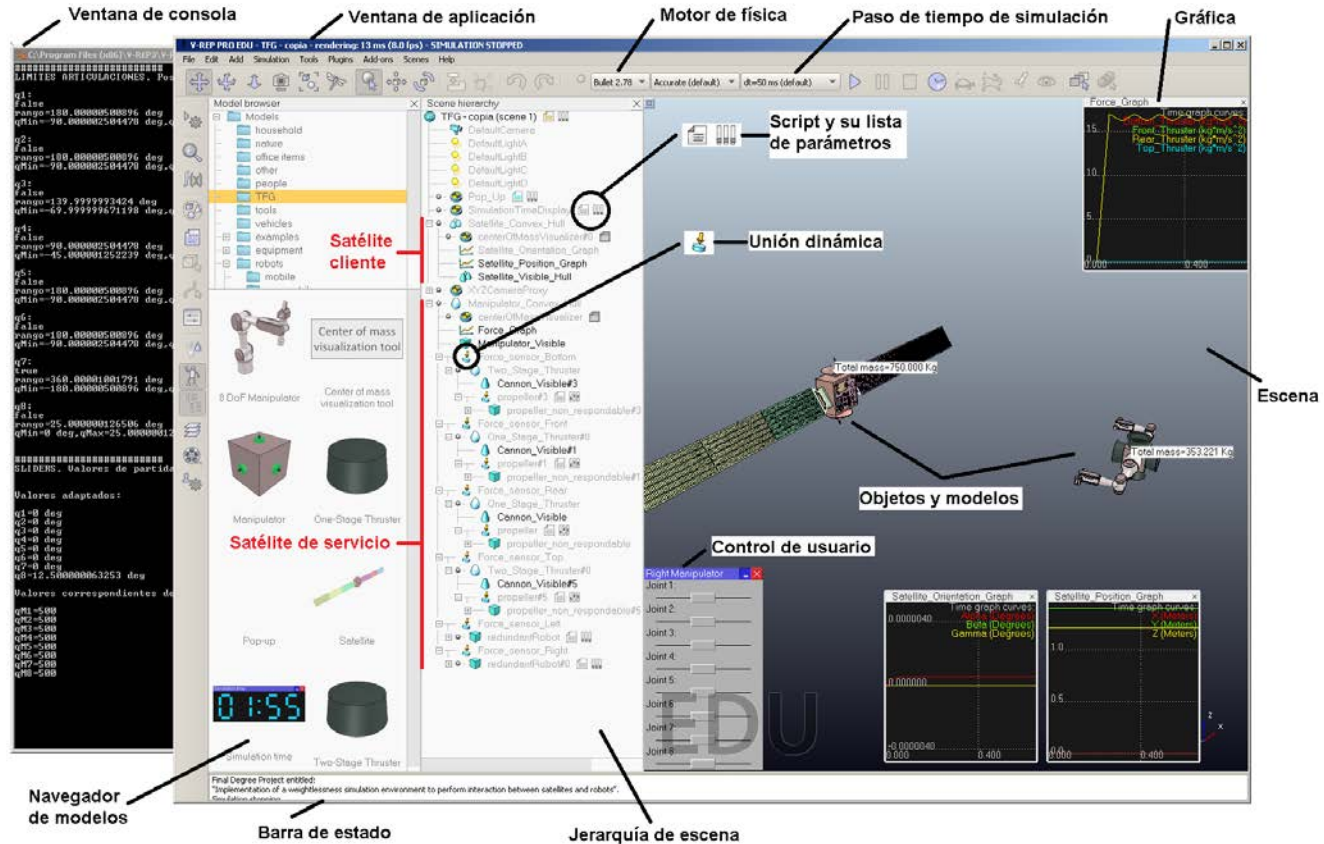
SOLIDWORKS

- Solución de diseño en 3D.
- Funciones de piezas, ensamblaje y renderizado.



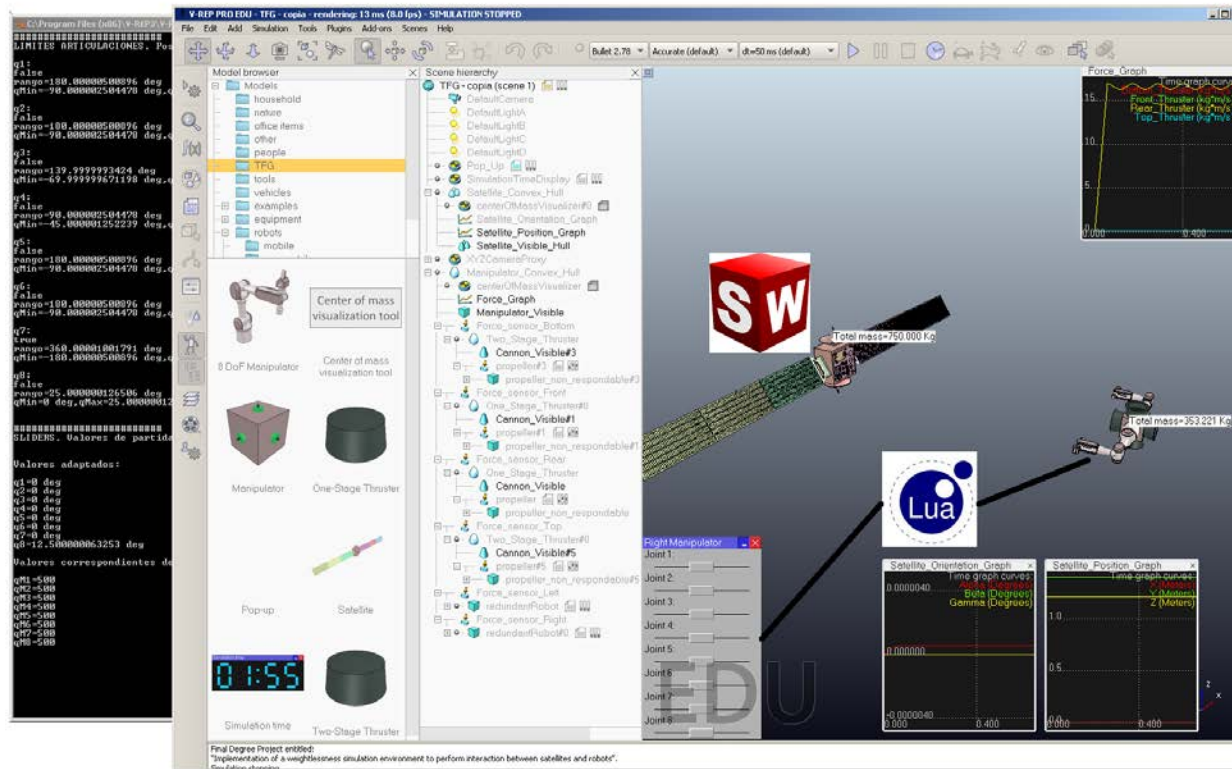
LUA

- Lenguaje de programación extensible.
- Combinable con la API de V-REP.



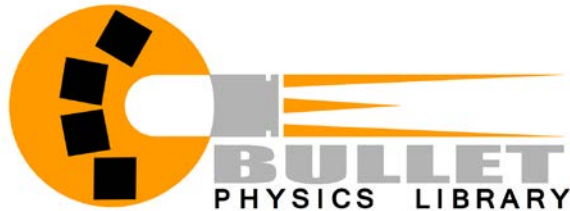
Interfaz de usuario del programa V-REP.

CREACIÓN DE ENTORNO DE SIMULACIÓN EN INGRAVIDEZ CON INTERACCION ENTRE SATELITE Y ROBOT



Interfaz de usuario del programa V-REP.

MOTOR DE FÍSICA «BULLET».



Motor de código abierto con detección de colisiones en 3D, dinámica de sólido rígido y dinámica de sólido plástico (característica actualmente incompatible con V-REP).

Detección de collision.
Contacto y tiempo de impacto.



Dinámica Directa.
Calcula aceleraciones, fuerzas e inercias.



Integración definida en el tiempo
Velocidad y posición instantánea.



Bucle de simulación de cuerpo rígido. Fuente (adaptada): www.bulletphysics.org.

VERSIÓN SIMPLÉCTICA DE LAS ECUACIONES DE EULER-LAGRANGE.

La masa y la inercia han sido ajustadas en los objetos/modelos hasta encontrar los parámetros de simulación más estables.

$$F = ma$$

$$\tau = I\dot{\omega} + \omega \times I\omega$$

$$v_{t+\Delta t} = v_t + a\Delta t = v_t + \frac{F_{ext} + F_c}{m} \Delta t = v_t + \frac{F_{ext}}{m} \Delta t + \frac{Impulse_c}{m}$$

$$x_{t+\Delta t} = x_t + v_{t+\Delta t} \Delta t$$

F_{ext} podría ser la gravedad, la fuerza del viento, fuerzas impuestas por el usuario...

F_c podría ser restricciones de fuerzas tales como el contacto, la fricción, articulaciones...

Ecuaciones que rigen la dinámica del sistema simulado. Fuente (adaptada): [www.bulletpysics.org] y [L.P.S. Massolo, Aproximación simpléctica a la mecánica lagrangiana, Universidad de Illinois, 2008].



DEFINICIÓN DEL TENSOR DE INERCIA DEL SISTEMA.

- Momentos de inercia centroidales.

$$I_x = \int (y^2 + z^2) dm ; I_y = \int (z^2 + x^2) dm ; I_z = \int (x^2 + y^2) dm$$

- Productos de inercia de masa centroidales.

$$I_{xy} = \int xy dm ; I_{yz} = \int yz dm ; I_{zx} = \int zx dm$$

- Tensor de inercia.

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{pmatrix}$$

Tensor de inercia del cuerpo en su centro de masa. Fuente: P. Beer, Ferdinand et al., Mecánica vectorial para ingenieros. 9ª Edición, Álvaro Obregón: McGraw-Hill, 2010.



Rigid Body Dynamic Properties

Body is responsible

Local responsible mask

Global responsible mask

Material: defaultMaterial3

Body is dynamic

Start in sleep mode Set to dynamic if gets parent

Mass

Mass [kg]

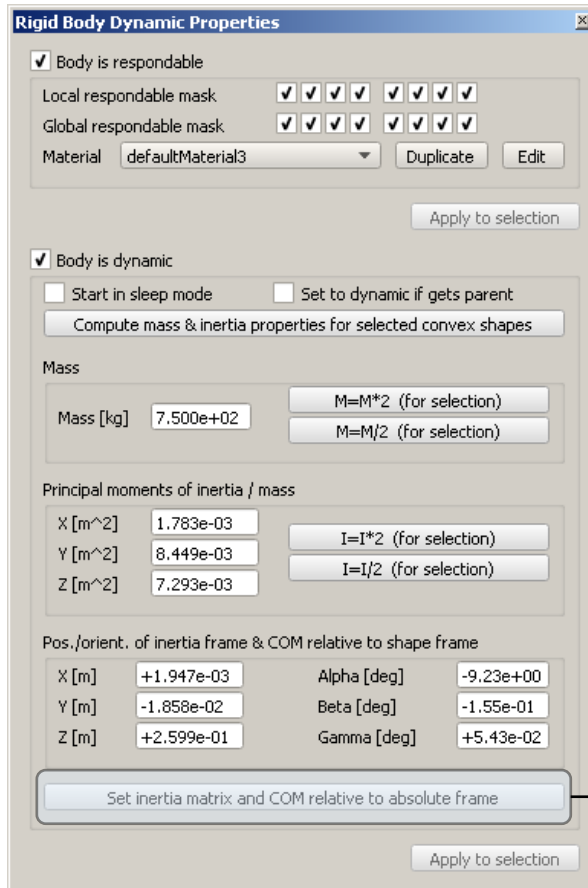
Principal moments of inertia / mass

X [m²]
Y [m²]
Z [m²]

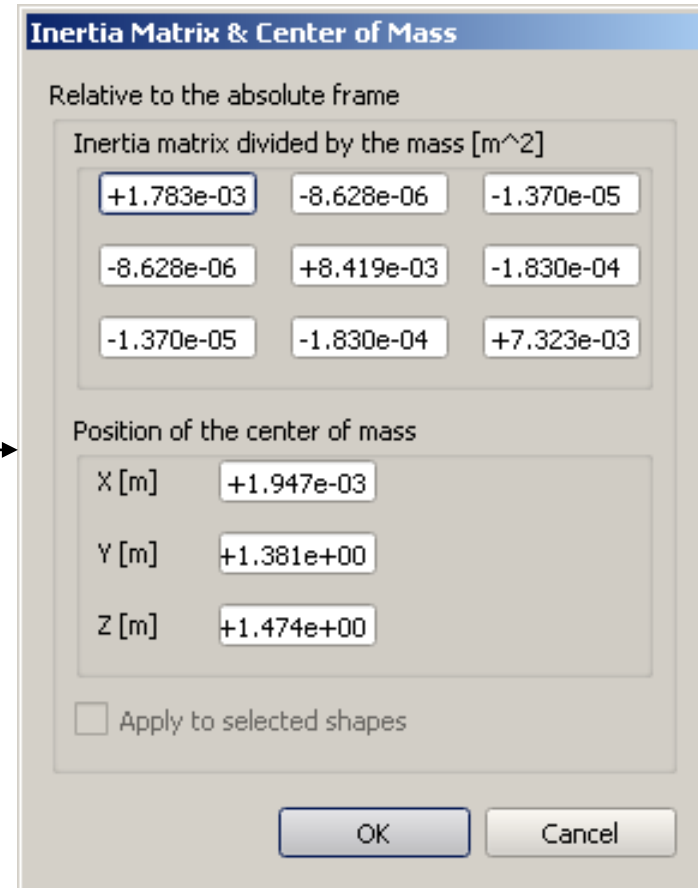
Pos./orient. of inertia frame & COM relative to shape frame

X [m]	<input type="text" value="+1.947e-03"/>	Alpha [deg]	<input type="text" value="-9.23e+00"/>
Y [m]	<input type="text" value="-1.858e-02"/>	Beta [deg]	<input type="text" value="-1.55e-01"/>
Z [m]	<input type="text" value="+2.599e-01"/>	Gamma [deg]	<input type="text" value="+5.43e-02"/>

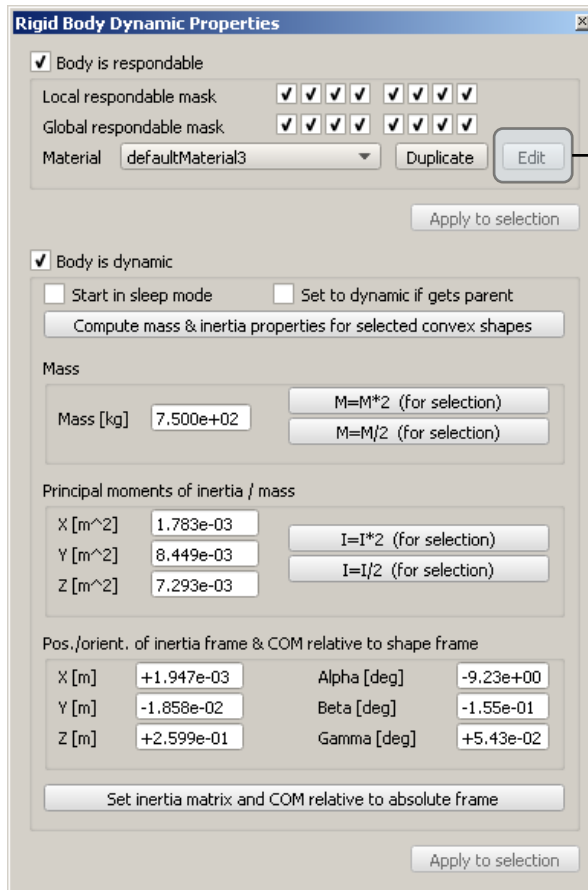
Propiedades dinámicas de sólido rígido en V-REP.



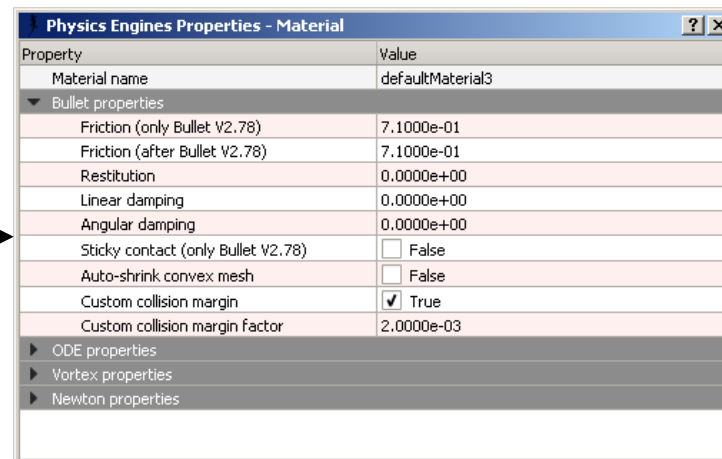
Propiedades dinámicas de sólido rígido en V-REP.



Centro de masa y matriz de inercia en V-REP.



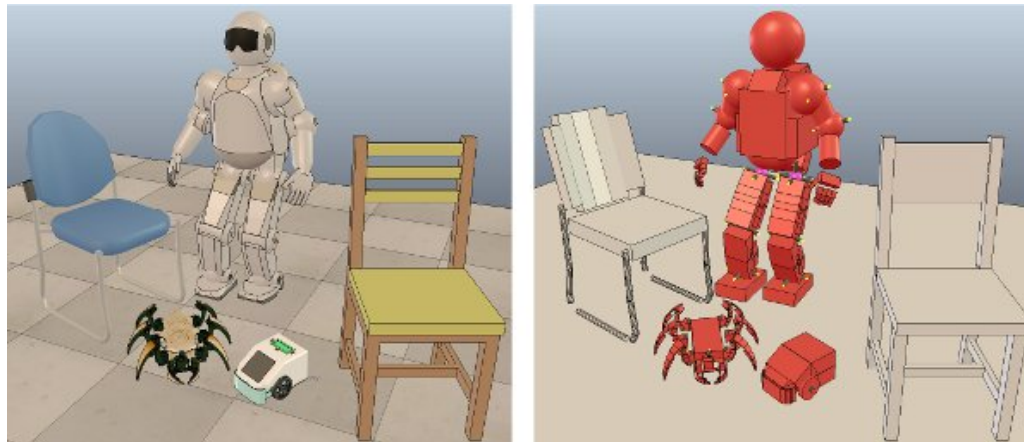
Propiedades dinámicas de sólido rígido en V-REP.



Propiedades materiales del motor Bullet en V-REP.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO DINÁMICO DE LOS MODELOS.

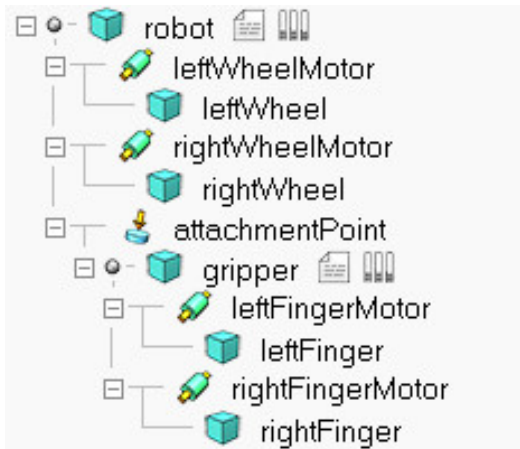
- ❖ Empleo de formas puras.
- ❖ Empleo de formas convexas en lugar de formas aleatorias.
- ❖ Inspección rigurosa del contenido dinámico de la escena.



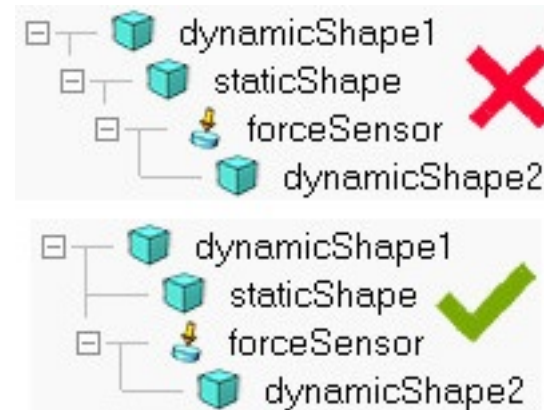
Visualización normal de la escena (izquierda) y visualización del contenido dinámico subyacente (derecha).

Fuente: Manual de usuario de V-REP.

- ❖ Empleo de una estructura jerárquica simple.
- ❖ Elección sopesada del objeto base del modelo.
- ❖ Empleo de tamaños razonables.
- ❖ Empleo de masas similares entre objetos vinculados.
- ❖ Empleo de momentos de inercia relativamente grandes.
- ❖ Ubicación correcta de las formas estáticas



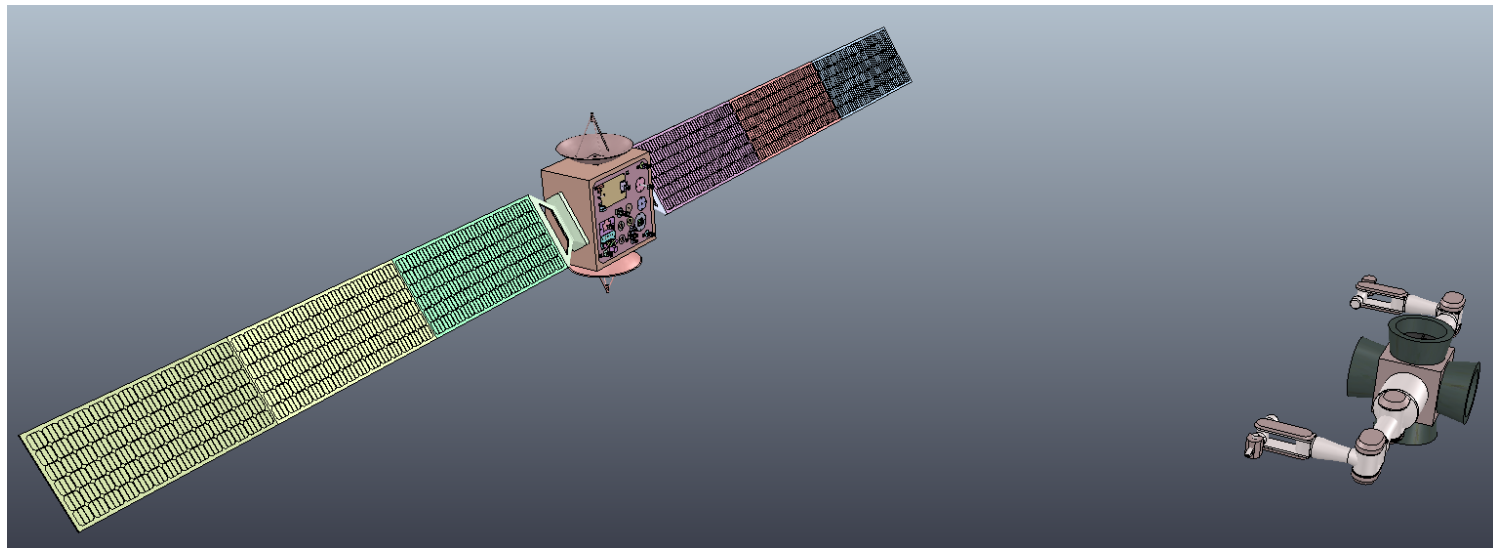
Elección correcta de la base de un modelo robot-pinza.



Ubicación incorrecta y correcta de una forma estática en una cadena cinemática.



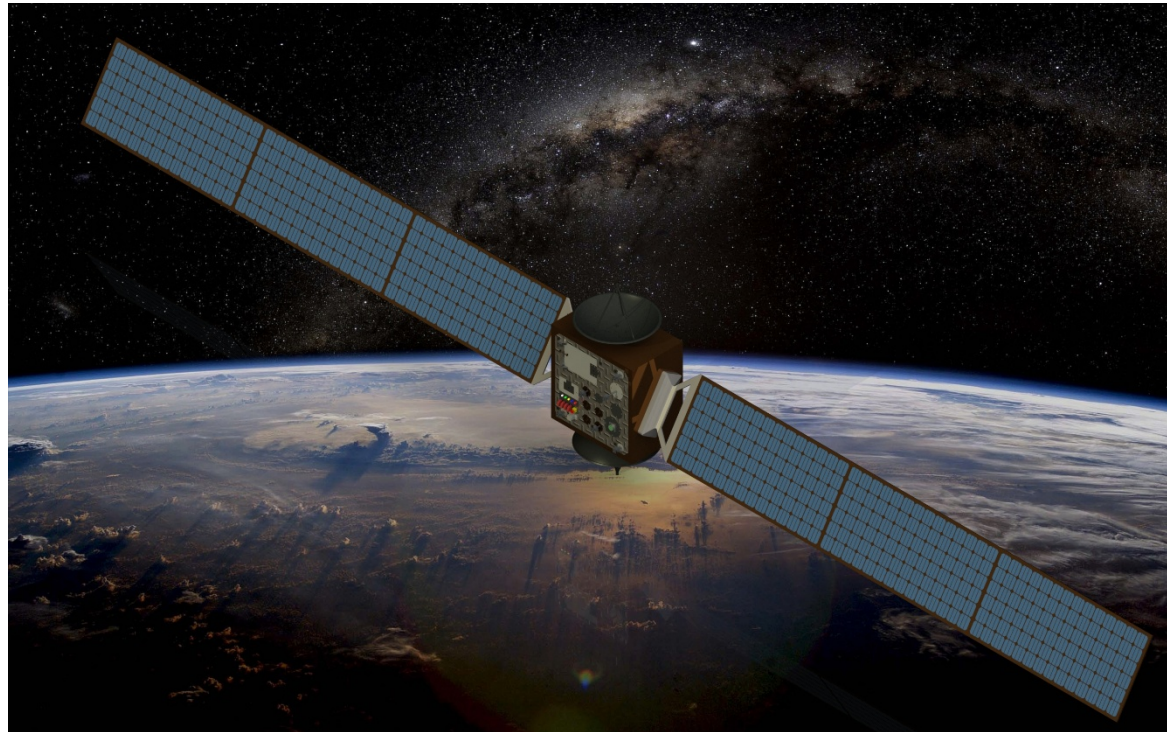
3. MODELOS DESARROLLADOS.



Modelos desarrollados acorde a las propiedades y consideraciones de diseño tenidas en cuenta.

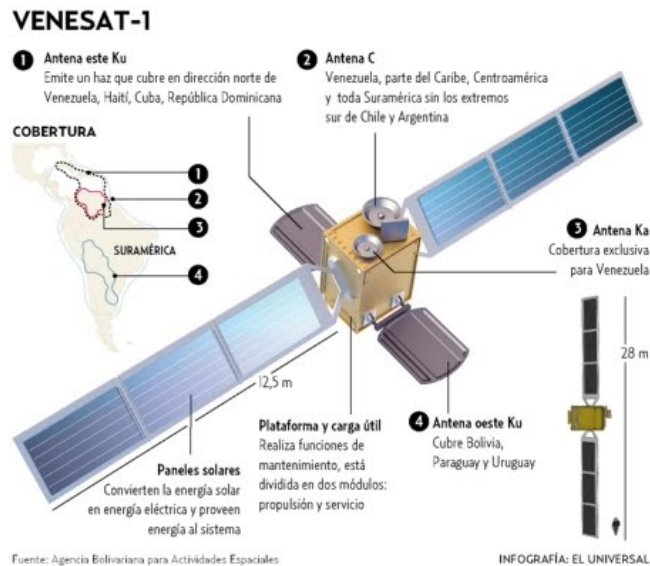


SATÉLITE CLIENTE.

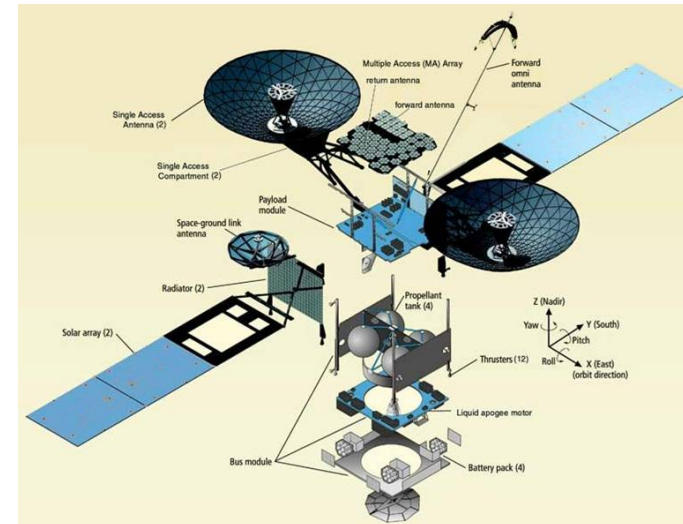


Satélite cliente: peso de 750 kg; dimensiones de 0,82 x 0,48 x 0,35 m con una longitud total con los paneles solares extendidos de 5,12 m; parámetros de inercia de $I_x = 1783 \text{ mm}^2$, $I_y = 8449 \text{ mm}^2$ y $I_z = 7293 \text{ mm}^2$.

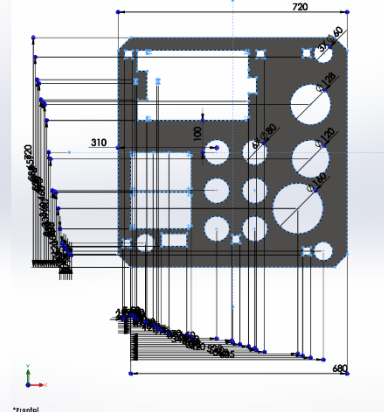
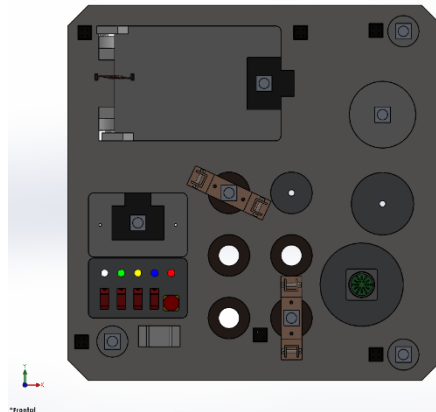
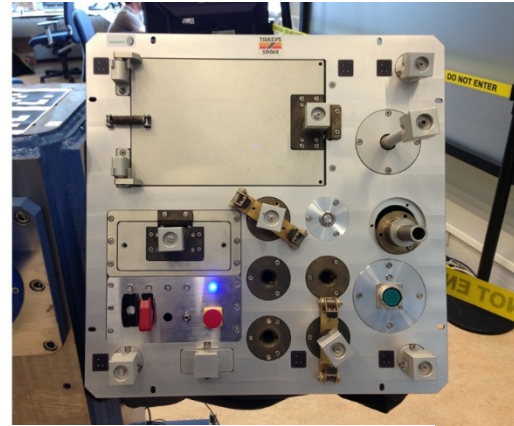
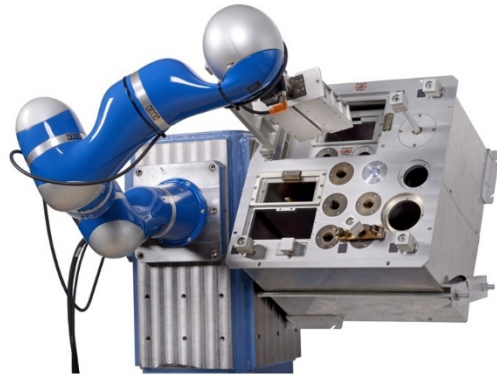
El satélite cliente ha sido construido en 3D con dimensiones y pesos acordes a los satélites «Venesat-1» y a los de la serie «TDRS». El panel de control se ha tratado de reproducir lo más fiel posible al panel de mando «Workcell» de la empresa «ESA Telerobotics».



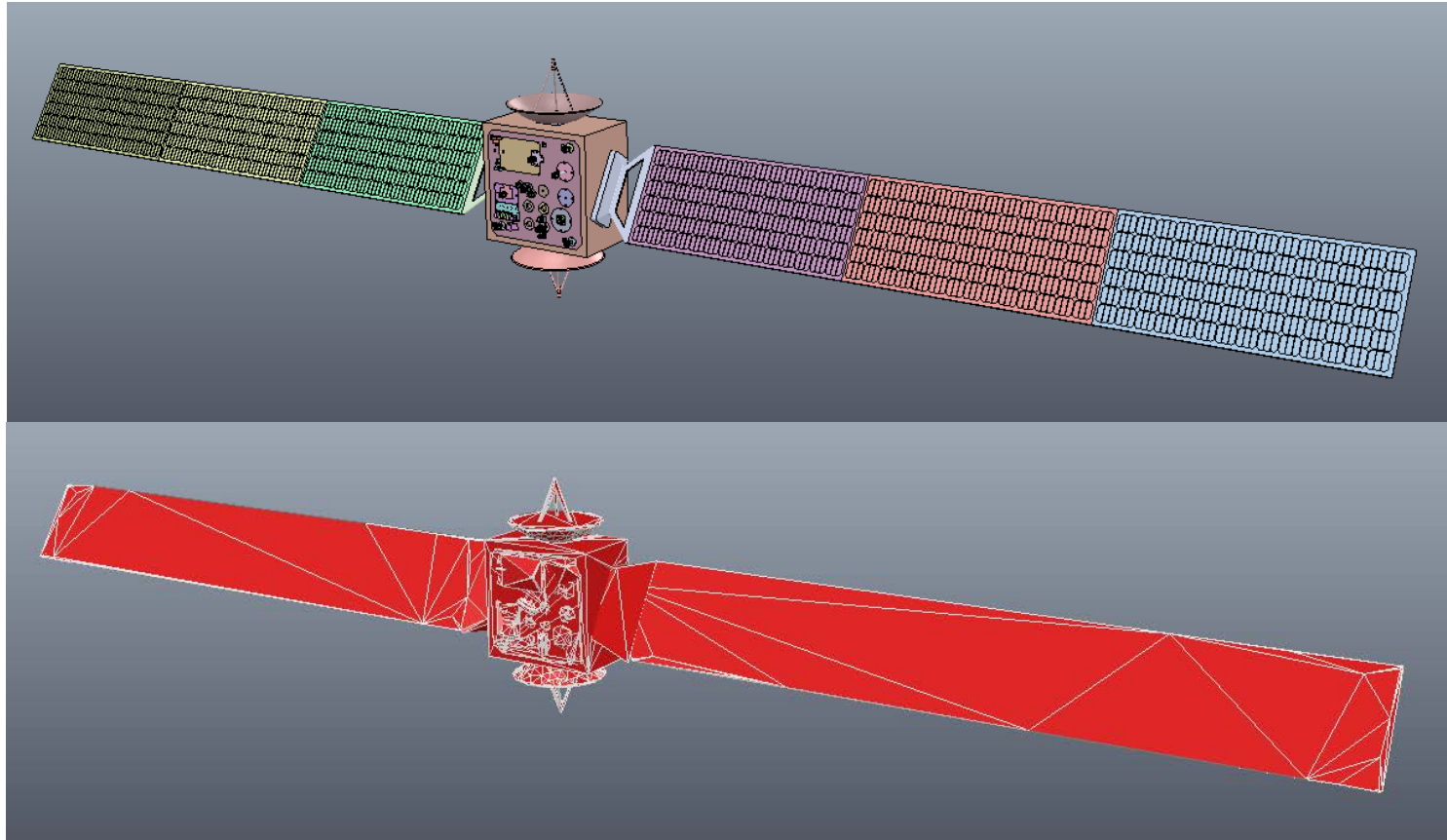
Esquema del «Venesat-1». Fuente: Agencia Boliviana para Actividades Espaciales.



Esquema de los satélites TDRS-K, L, M. Fuente: NASA.

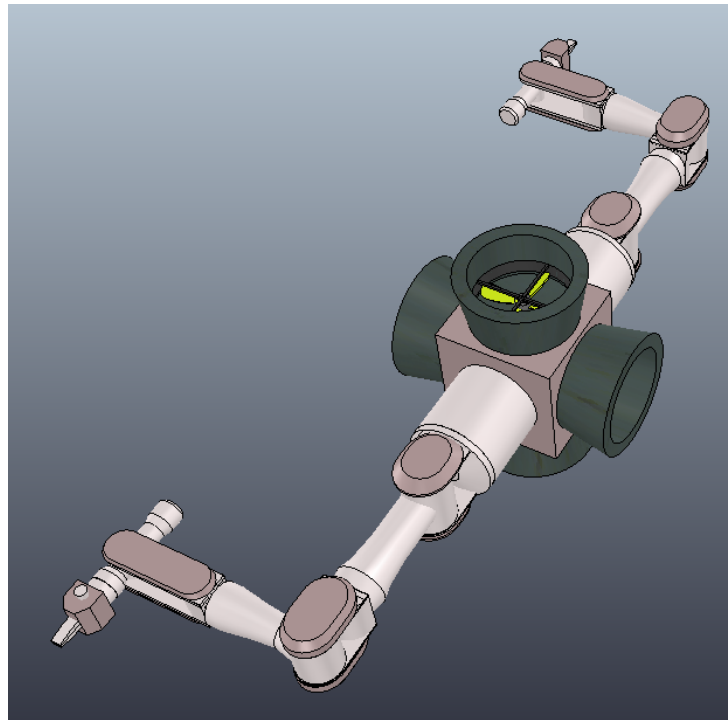


Panel de control de ESA Telerobotics (superior) y alzado de la reproducción en 3D realizada del panel de control en SolidWorks (inferior).



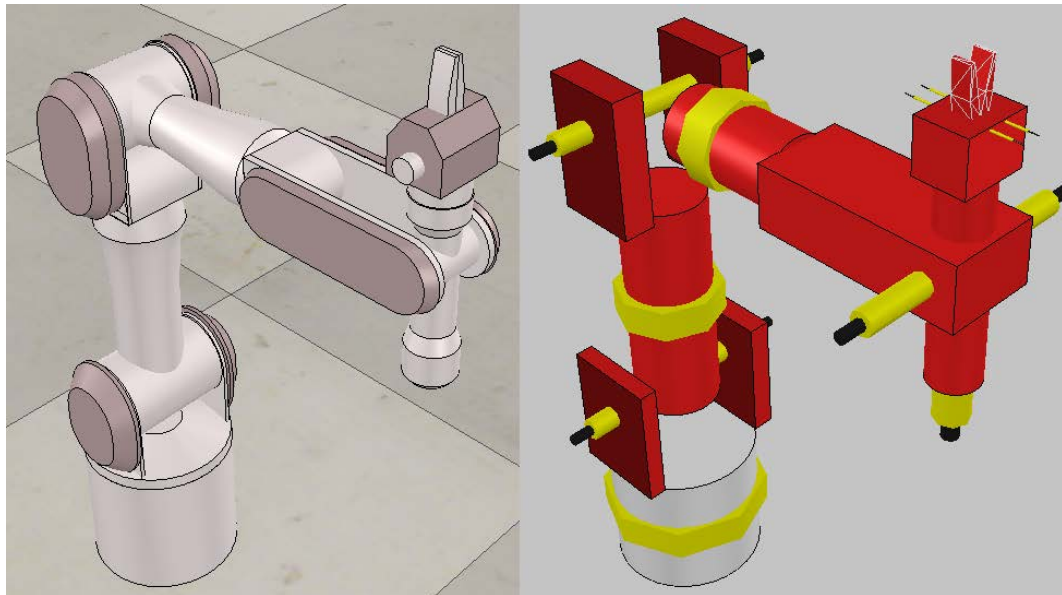
Visualización del contenido visual (superior) y dinámico (inferior) del modelo «Satellite».

SATÉLITE DE SERVICIO.



Satélite de servicio: peso de 353,2 kg; dimensiones de 2,15 x 0,38 x 0,38 m; parámetros de inercia de $I_x = 2658$ m^2 , $I_y = 1801$ m^2 y $I_z = 1796$ m^2 .

El manipulador robótico es de 8 GDL con semejanza al «Mitsubishi PA 10-7C». Se ha definido con unas dimensiones de 0,975 x 0,2 x 0,2 m y una masa de 65 kg similares al del manipulador «K-1207i» de la empresa «Robotics Research».



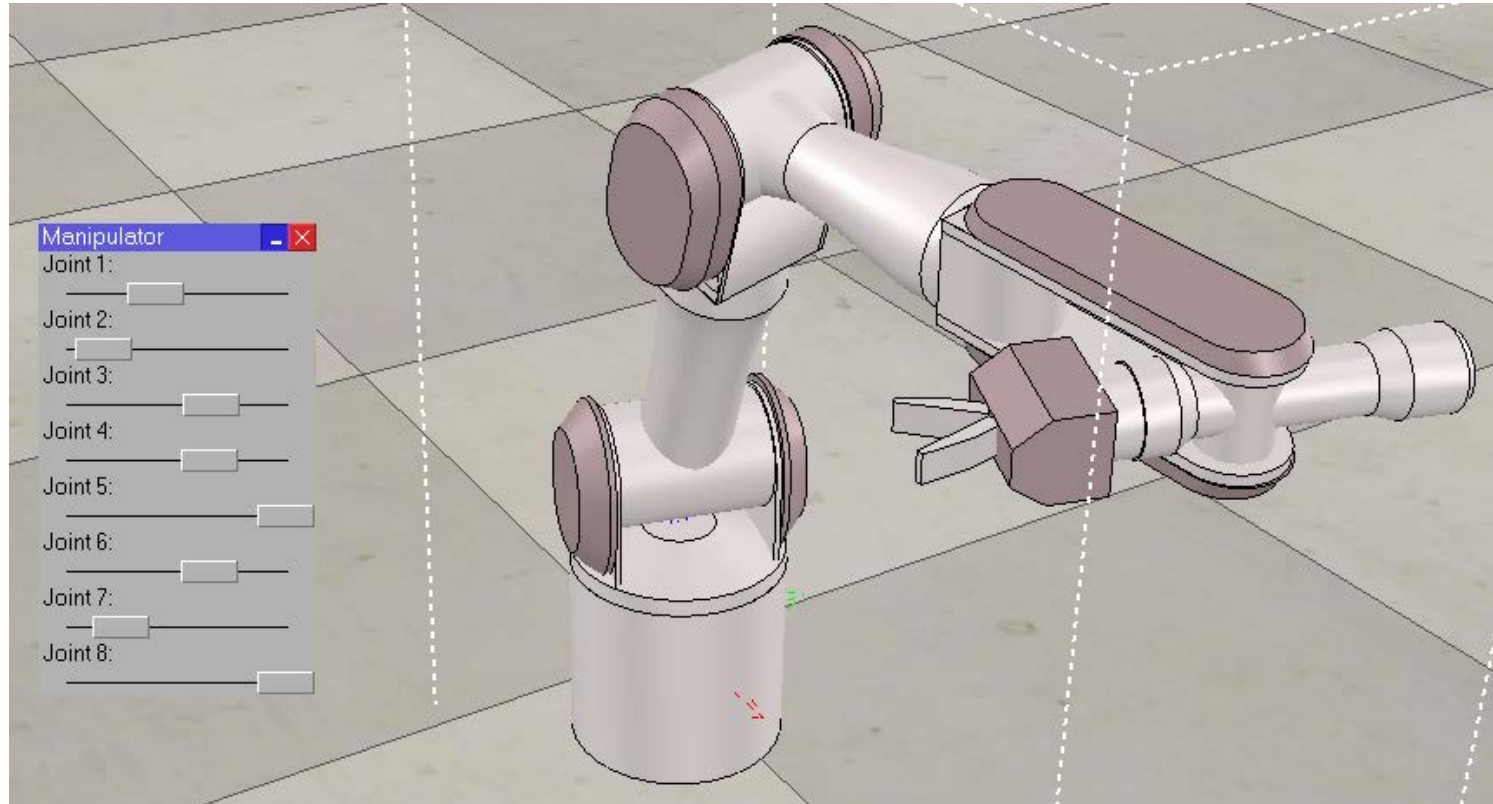
Visualización del contenido visual (izquierda) y del contenido dinámico (derecha) del manipulador robótico.



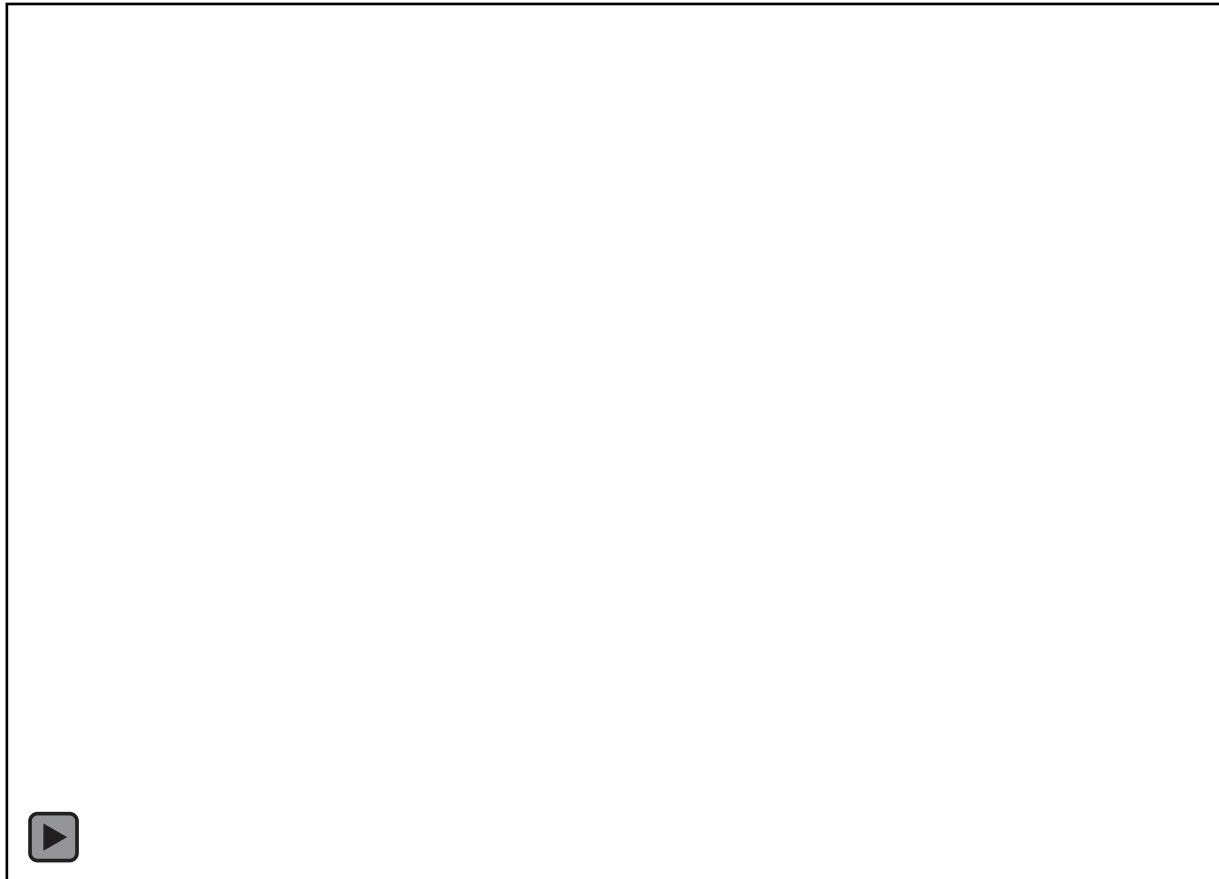
El manipulador robótico presenta limitaciones en sus articulaciones como cualquiera y son presentadas por la ventana de consola junto a la posición de los controles de usuario en el momento de ejecución de la simulación.

Articulación	Longitud [m]	Diámetro [m]	Pos. Mín. [°]	Rango [°]
1	0.030	0.160	-90	180
2	0.2	0.02	-90	180
3	0.03	0.1	-70	140
4	0.2	0.02	-45	90
5	0.03	0.08	-90	180
6	0.2	0.02	-90	180
7	0.2	0.03	-180	360
8	0.08	0.002	0	25
9	0.08	0.002	-	-

Propiedades específicas de las articulaciones.

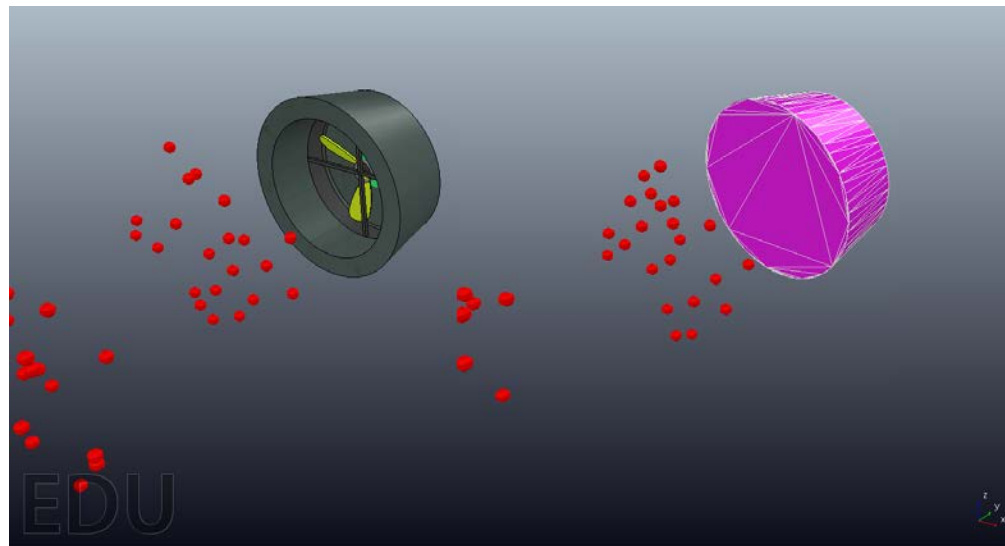


Ejemplo de control ejercido sobre el manipulador usando el panel de control asociado.



Validación del código del manipulador robótico.

Las características del modelo se han tratado de reproducir conforme a la realidad, por lo que se ha realizado con unas dimensiones acordes al monopropulsor de mercado «BGT-X5», y una masa y potencia tomando como referencia el monopropulsor de mercado «MONARC-22».



Visualización del contenido visual (izquierda) y del contenido dinámico (derecha) del propulsor.

Performance Characteristics							
Engine	MONARC-1	MONARC-5	MONARC-22-6	MONARC-22-12	MONARC-90LT	MONARC-90HT	MONARC-445
Steady State Thrust	0.22 lbf (1N) @275 psia	1.0 lbf (4.5 N) @325 psia	5 lbf (22N) @275 psia	5 lbf (22N) @190 psia	20 lbf (90 N) @ 235 psia	26 lbf (116 N) @ 235 psia	100 lbf (445N) @ 275 psia
Feed Pressure	70 – 400 psia (4.8 – 27.6 bar)	80 – 420 psia (5.5 – 29.0 bar)	70 – 400 psia (4.8 – 27.6 bar)	70 – 400 psia (4.8 – 27.6 bar)	80 – 400 psia (5.5 – 27.6 bar)	80 – 370 psia (5.5 -25.5 bar)	70 – 400 psia (4.8-27.6 bar)
Nozzle Expansion	57:1	135:1	60:1	40:1	40:1	50:1	50:1
Valve Power	18 watts	18 watts	30 watts	30 watts	72 watts	72 watts	58 watts
Mass	0.83 lbm (0.38 kg)	1.08 lbm (0.49 kg)	1.58 lbm (0.72 kg)	1.51 lbm (0.69 kg)	2.47 lbm (1.12 kg)	2.47 lbm (1.12 kg)	3.5 lbm (1.6 kg)
Engine Length/Exit Diam	5.2 in (13.3 cm) / .2 in (0.5 cm)	9.4 in (41.8 cm) / .1 in (2.5 cm)	8 in (20.3 cm) / 1.5 in (3.8 cm)	9 in (22.9 cm) / 1.2 in (5.3 cm)	12 in (30 cm) / 3.3 in (8.4 cm)	12 in (30 cm) / 3.3 in (8.4 cm)	16 in (41 cm) / 5.8 in (14.8 cm)
Specific Impulse	227.5 sec	226.1 secs	229.5 secs	228.1 secs	232.1 secs	234.0 secs	234.0 secs
Minimum Impulse Bit	0.0006 lbf-sec (2.6 mN-sec)	0.0007 lbf-sec (3.1 mN-sec)	0.07 lbf-sec (312m N-sec)	0.12 lbf-sec (526m N-sec)	0.04 lbf-sec (1.8 N-sec)	0.26 lbf-sec (1.16 N-sec)	2.59 lbf-sec (11.52 N-sec)
Total Impulse	25,000 lbf-sec (111,250 N-sec)	138,000 lbf-sec (613,852 N-sec)	120,000 lbf-sec (533,784 N-sec)	263,720 lbf-sec (1,173,085 N-sec)	786,000 (3,500,000 N-sec)	459,100 lbf-sec (2,042,178 N-sec)	1,250,000 lbf-sec (5,600,000 N-sec)
Pulses	375,000	205,000	230,000	160,000	50,000	70,000	12,000

Tabla de características de los diferentes monopropulsores comercializados por MOOG.



Parámetros	Significado	Valor	Unidad
simulateParticles	Simular	True	Boolean
particleSize	Tamaño	2	Relative to model size*0,005
particleDensity	Densidad	18500	kg/m ³
particleVelocity	Velocidad	4	m/s
particleScatteringAngle	Ángulo	30	Degrees
particlesAreVisible	Visibilidad	True	Boolean
particleLifeTime	Tiempo de vida	0,5	s
maxParticleCount	Nº máximo	400	-
particleCountPerSecond	Partículas/seg	430	s ⁻¹
StartTime	Tiempo de inicio	Depende	s
FinalTime	Tiempo final	Depende	s

Lista de parámetros conectados al script del modelo propulsor.

$$F = \rho \cdot v \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{6} \cdot \frac{1}{t_s} \left[\frac{N}{\text{partícula}} \right]$$

Modelo matemático de la fuerza de empuje realizada por partícula expulsada por el propulsor.



Parámetros	Significado	Valor	Unidad
simulateParticles	Simular	True	Boolean
particleSize	Tamaño	2	Relative to model size*0,005
particleDensity	Densidad	18500	kg/m ³
particleVelocity	Velocidad	4	m/s
particleScatteringAngle	Ángulo	30	Degrees
particlesAreVisible	Visibilidad	True	Boolean
particleLifeTime	Tiempo de vida	0,5	s
maxParticleCount	Nº máximo	400	-
particleCountPerSecond	Partículas/seg	430	s ⁻¹
StartTime	Tiempo de inicio	Depende	s
FinalTime	Tiempo final	Depende	s

Lista de parámetros conectados al script del modelo propulsor.

$$F = 18500 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 4 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot \pi \cdot \frac{(2 \cdot 0,005)^3}{6} \left[\frac{m^3}{partícula} \right] \cdot \frac{1}{0,05} \left[\frac{1}{s} \right] = 0,7749 \left[\frac{N}{partícula} \right]$$

Modelo matemático de la fuerza de empuje realizada por partícula expulsada por el propulsor.

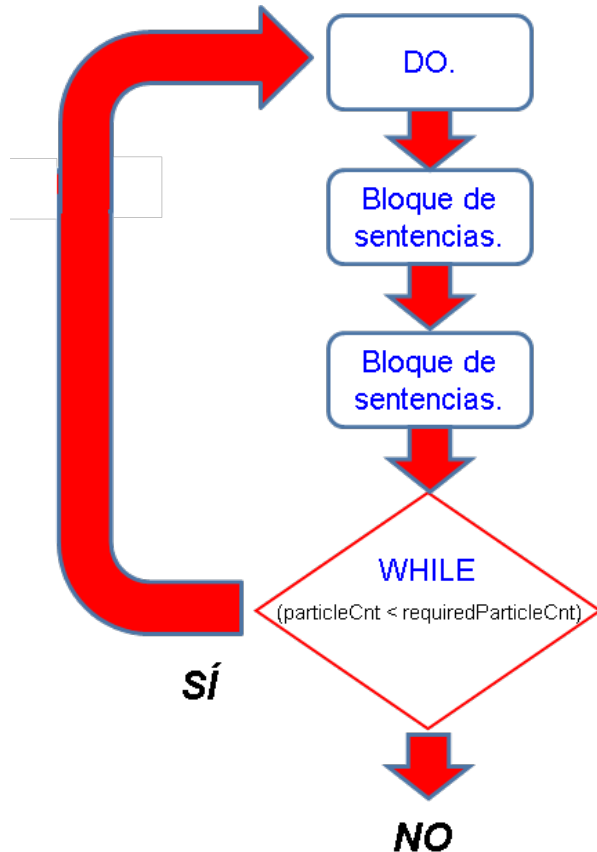


Parámetros	Significado	Valor	Unidad
simulateParticles	Simular	True	Boolean
particleSize	Tamaño	2	Relative to model size*0,005
particleDensity	Densidad	18500	kg/m ³
particleVelocity	Velocidad	4	m/s
particleScatteringAngle	Ángulo	30	Degrees
particlesAreVisible	Visibilidad	True	Boolean
particleLifeTime	Tiempo de vida	0,5	s
maxParticleCount	Nº máximo	400	-
particleCountPerSecond	Partículas/seg	430	s ⁻¹
StartTime	Tiempo de inicio	Depende	s
FinalTime	Tiempo final	Depende	s

Lista de parámetros conectados al script del modelo propulsor.

$$\begin{aligned}
 requiredParticleCnt &= ParticleCountPerSecond \cdot t_s = 430 \left[\frac{1}{s} \right] \cdot 0,05[s] = 21,5 \Rightarrow \{math.floor\} \Rightarrow 21 \\
 particleCnt &= \{ "contador" \} = 0 \Big|_{t=0}
 \end{aligned}$$

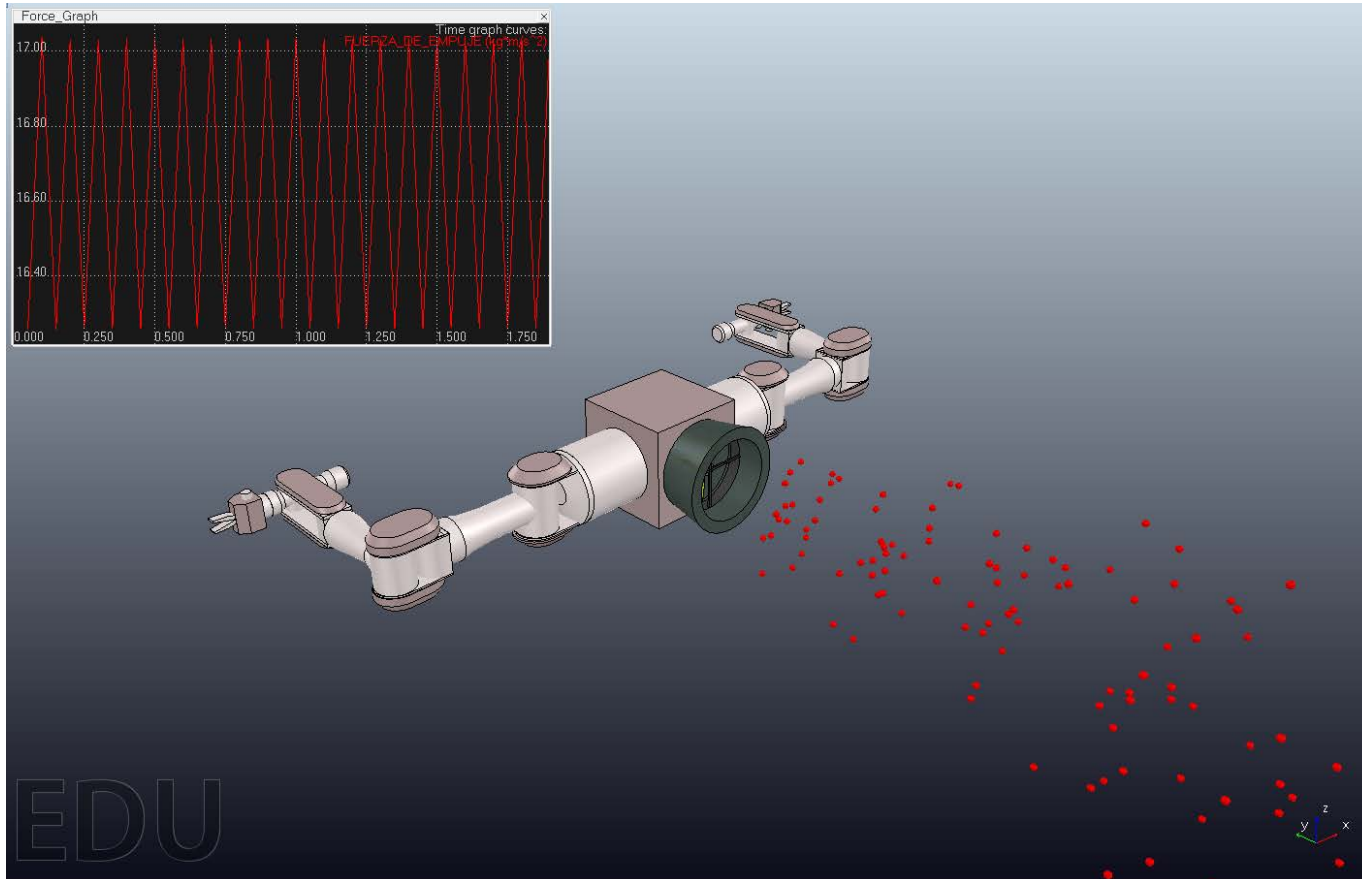
El número de partículas por segundo definido representa en el código escrito un número de 21 existentes por defecto durante la simulación.



El bucle de control «while-do» ejecuta y luego evalúa. En consecuencia, tratará un número de 21 partículas (condición verdadera) y posteriormente uno de 22 (condición falsa)

$$F = \begin{cases} 0,7749 \left[\frac{N}{partícula} \right] \cdot 21[partículas] = 16,27 N \\ 0,7749 \left[\frac{N}{partícula} \right] \cdot 22[partículas] = 17,05 N \end{cases}$$

Estructura de control que gobierna la cantidad de partículas expulsado.



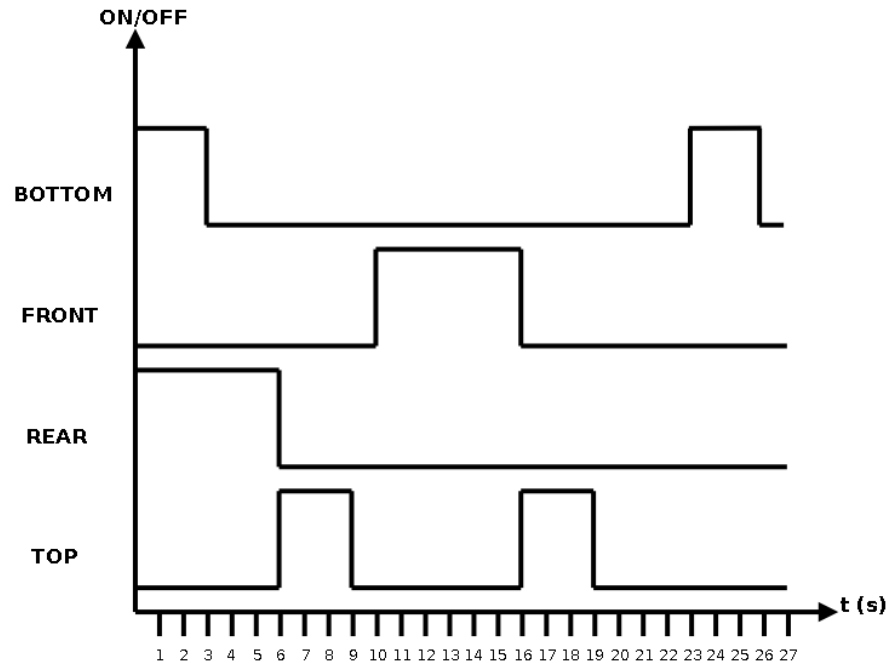
Fuerza de empuje del modelo propulsor incorporado al satélite de servicio.



Parámetros	Significado	Valor	Unidad
simulateParticles	Simular	True	Boolean
particleSize	Tamaño	2	Relative to model size*0,005
particleDensity	Densidad	18500	kg/m ³
particleVelocity	Velocidad	4	m/s
particleScatteringAngle	Ángulo	30	Degrees
particlesAreVisible	Visibilidad	True	Boolean
particleLifeTime	Tiempo de vida	0,5	s
maxParticleCount	Nº máximo	400	-
particleCountPerSecond	Partículas/seg	430	s ⁻¹
StartTime	Tiempo de inicio	Depende	s
FinalTime	Tiempo final	Depende	s

Lista de parámetros conectados al script del modelo propulsor.

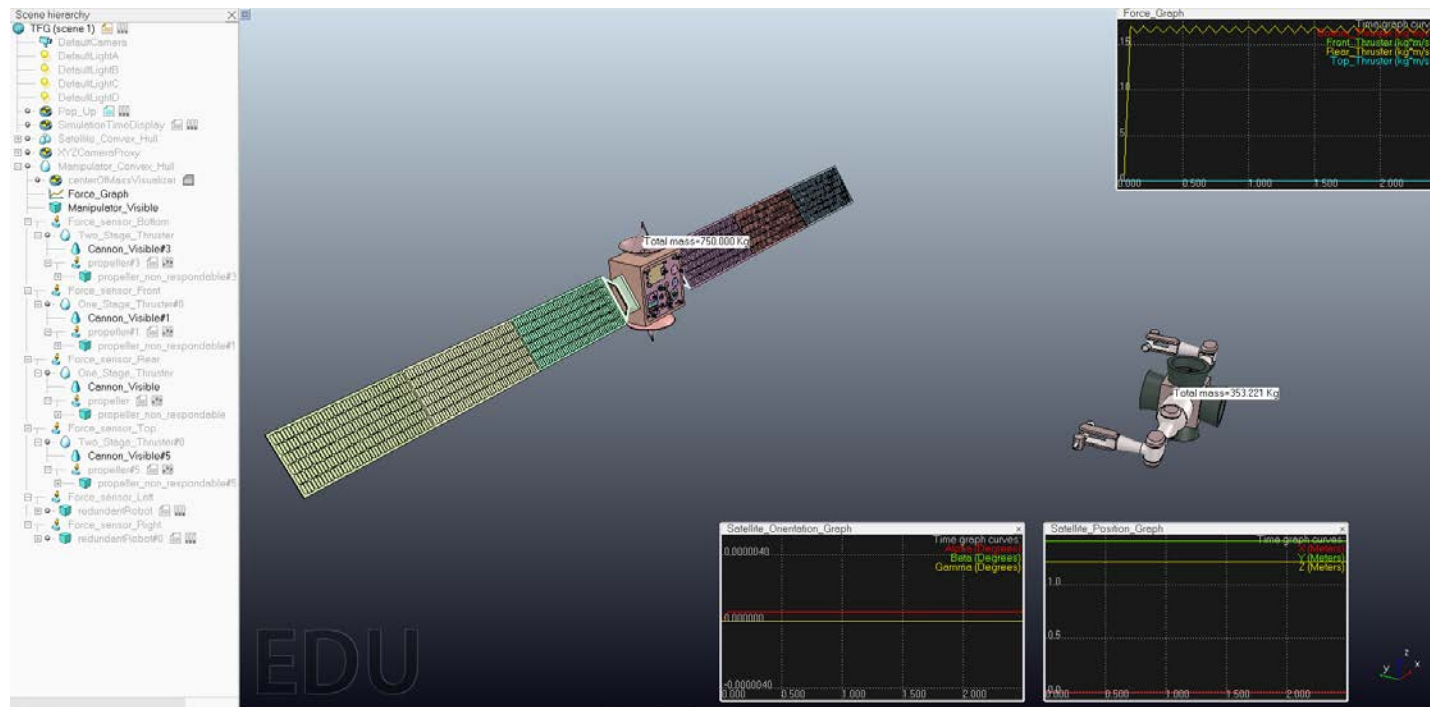
Los parámetros de tiempo seleccionados son los que gobiernan las etapas de funcionamiento de cada uno de los propulsores que componen al satélite de servicio.



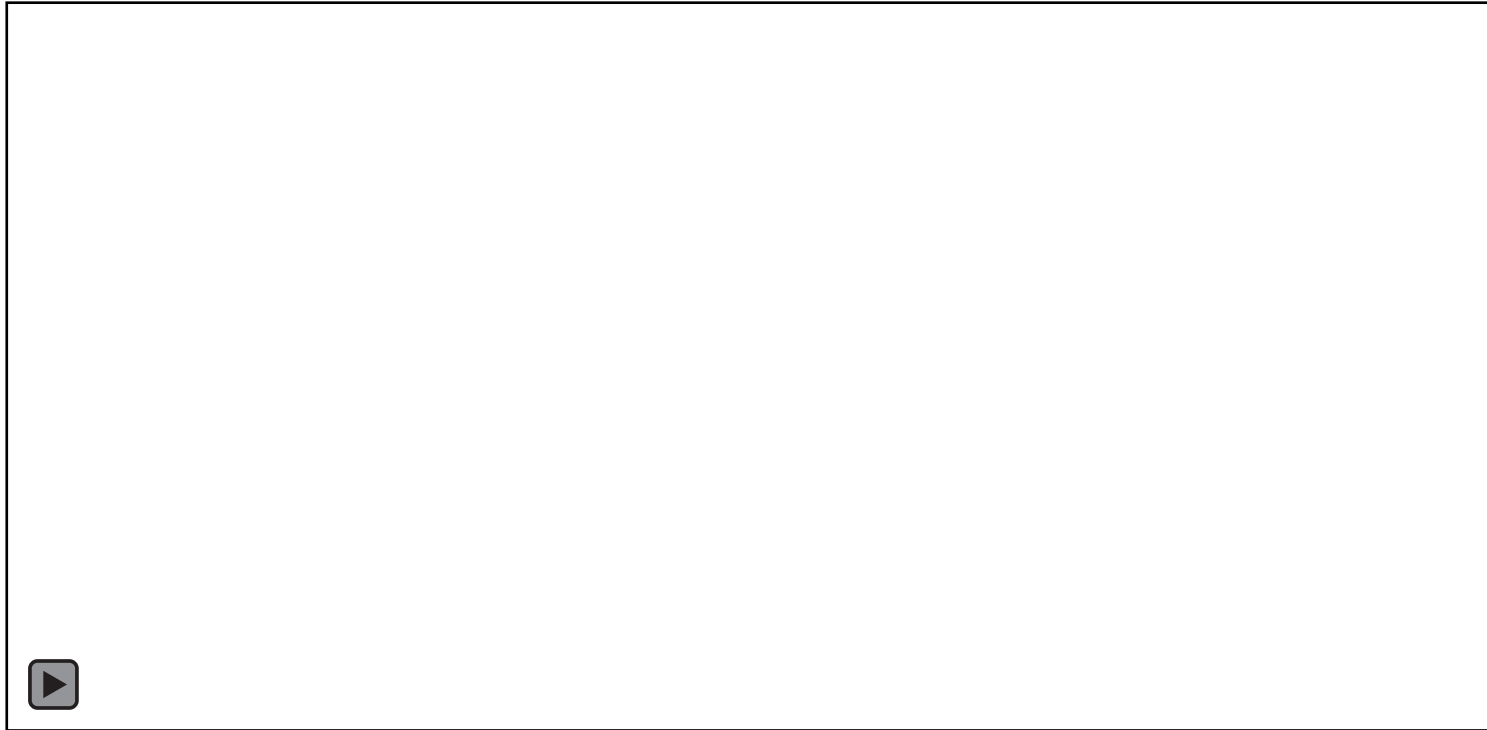
Lista de parámetros conectados al script del modelo propulsor.

Los propulsores superior (*top*) e inferior (*bottom*) son de dos etapas y el frontal (*front*) y el posterior (*rear*) son de una etapa. El diagrama de funcionamiento ha sido incorporado en la simulación.

4. VALIDACIÓN.



Entorno de simulación del TFG junto a la jerarquía de escena resultante.



Reproducción visual.



Reproducción dinámica.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

CREACIÓN DE ENTORNO DE SIMULACIÓN EN INGRAVIDEZ CON INTERACCION ENTRE SATELITE Y ROBOT



EPS
Escuela Politécnica Superior
Universidad de Málaga

RUEGOS Y PREGUNTAS