

# Índice de contenidos

<b>Nomenclatura</b> .....	<b>4</b>
<b>Orden alfabético</b> .....	<b>4</b>
<b>Símbolos griegos</b> .....	<b>4</b>
<b>Subíndices</b> .....	<b>5</b>
<b>Superíndices</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1 Contexto del proyecto</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2 Conceptos sobre motores híbridos</b> .....	<b>6</b>
<b>1.3 Modelo de combustión</b> .....	<b>7</b>
1.3.1 Modelo analizado.....	7
1.3.2 Ecuación de regresión.....	8
<b>1.4 Ventajas y desventajas de la propulsión híbrida</b> .....	<b>12</b>
<b>1.5 Teoría de toberas</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Descripción del los componentes de un motor cohete híbrido</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Cámara de combustión</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Secciones de la cámara de combustión .....	17
2.1.2 Descripción del diseño de la cámara de combustión.....	17
<b>2.2 Métodos de ignición</b> .....	<b>19</b>
2.2.1 Pirotécnico .....	19
2.2.2 Calentamiento por resistencia .....	20
2.2.3 Descomposición por arco eléctrico .....	21
2.2.4 Combustible gaseoso .....	21
2.2.5 Oxidación de lana metálica .....	22
2.2.6 Catalizador.....	22
<b>2.3 Sistema de alimentación y sus formas</b> .....	<b>22</b>
<b>3 Diseño del motor a escala para ensayos en banco estático</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1 Listado de los requerimientos de la misión</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2 Diseño de la cámara de combustión</b> .....	<b>25</b>
3.2.1 Selección de propulsantes .....	25
3.2.2 Nivel de presión y geometría de cámara.....	27
3.2.3 Geometría final de grano .....	30
3.2.4 Código de cálculo de performance.....	31
<b>3.3 Dimensionamiento mecánico de la envuelta</b> .....	<b>33</b>
<b>3.4 Diseño del sistema de ignición</b> .....	<b>33</b>
3.4.1 Selección del método de ignición .....	33
3.4.2 Diseño del circuito eléctrico .....	35
<b>3.5 Diseño del sistema de alimentación</b> .....	<b>36</b>
3.5.1 Selección de la forma del sistema .....	36
3.5.2 Esquema del sistema y dimensionamiento de componentes principales.....	36
<b>3.6 Modificaciones introducidas a partir del cambio en el material combustible</b> .....	<b>38</b>
<b>4 Sistema de adquisición y control, sensores y actuadores</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1 Actuadores utilizados</b> .....	<b>42</b>
4.1.1 Control de apertura de la válvula de regulación de caudal.....	42
<b>4.2 Sensores utilizados</b> .....	<b>43</b>
4.2.1 Transductores de presión .....	43
4.2.2 Sensor de posición del vástago .....	43
4.2.3 Celda de carga.....	45
4.2.4 Sensor de apertura de válvula .....	45
4.2.5 Generalidades .....	45

<b>4.3</b>	<b>Sistema de adquisición y control</b> .....	<b>45</b>
4.3.1	Componentes principales.....	45
4.3.2	Detalle del diseño de los gabinetes.....	48
4.3.3	Placa de adquisición e interfaz de LabVIEW.....	50
<b>5</b>	<b>Modelo del sistema de alimentación y cámara de combustión</b> .....	<b>51</b>
<b>5.1</b>	<b>Descripción</b> .....	<b>51</b>
<b>5.2</b>	<b>Implementación del modelo en Simulink</b> .....	<b>55</b>
<b>5.3</b>	<b>Medición de parámetros de la planta</b> .....	<b>59</b>
5.3.1	Medición del roce estático y dinámico del cilindro hidráulico.....	59
5.3.2	Medición de la pérdida de carga en el inyector.....	61
5.3.3	Medición de la pérdida de carga en la válvula de aguja.....	64
<b>5.4</b>	<b>Validación del modelo</b> .....	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Control de la presión de alimentación</b> .....	<b>69</b>
<b>6.1</b>	<b>Realimentación por variables de estado con control integral</b> .....	<b>69</b>
<b>6.2</b>	<b>Respuesta del sistema con lazo de control</b> .....	<b>71</b>
<b>6.3</b>	<b>Simulación del sistema de alimentación y la cámara de combustión</b> .....	<b>71</b>
<b>7</b>	<b>Código de procesamiento de datos</b> .....	<b>72</b>
<b>7.1</b>	<b>Características</b> .....	<b>72</b>
<b>7.2</b>	<b>Ejemplo de resultados</b> .....	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>Resultados obtenidos en los ensayos</b> .....	<b>75</b>
<b>8.1</b>	<b>Ensayos de caracterización del cabezal inyector</b> .....	<b>75</b>
<b>8.2</b>	<b>Ensayos de ignición</b> .....	<b>77</b>
8.2.1	Incidente en CITEFA.....	77
8.2.2	Modificaciones introducidas a partir del incidente.....	79
8.2.3	Ensayos de encendido sin tobera.....	79
8.2.4	Ensayos de encendido con tobera.....	81
<b>9</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>84</b>
<b>Referencias</b> .....		<b>85</b>
<b>Bibliografía</b> .....		<b>85</b>
<b>Publicaciones</b> .....		<b>85</b>
<b>Apéndice A</b> .....		<b>86</b>
<b>Diseño mecánico del motor</b> .....		<b>86</b>
	Criterio de dimensionamiento.....	86
	Diseño de la envuelta.....	86
	Diseño de las bridas.....	86
	Selección de las juntas.....	87
	Diseño del cabezal inyector.....	87
	Diseño de la soldadura.....	87
	Sujeción de la tobera.....	87
<b>Apéndice B</b> .....		<b>89</b>
<b>Código de cálculo de la performance de un motor cohete híbrido</b> .....		<b>89</b>
<b>Apéndice C</b> .....		<b>99</b>
<b>Código de procesamiento de datos obtenidos en un disparo</b> .....		<b>99</b>
<b>Apéndice D</b> .....		<b>107</b>
<b>Plan de ensayos</b> .....		<b>107</b>
	Ensayos sobre el sistema de alimentación.....	107
	Ensayos de ignición.....	110
<b>Apéndice E</b> .....		<b>111</b>
<b>Procedimiento de ensayos de ignición y posibles modos de falla</b> .....		<b>111</b>
	Procedimiento de ensayos de ignición.....	111
	Secuencia de ensayos y posibles modos de falla.....	119
<b>Apéndice F</b> .....		<b>123</b>

Índice de figuras .....	123
Índice de tablas .....	124
Apéndice G .....	126
Planos en detalle de la cámara de combustión del motor .....	126
Agradecimientos .....	129