

DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL PRELIMINAR DE UN BANCO DE PRUEBAS
PARA COHETERÍA EXPERIMENTAL

DERWIN YESITH ARENAS ANDRADE

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA INGENIERÍA AERONÁUTICA
MEDELLÍN 2019

DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL PRELIMINAR DE UN BANCO DE PRUEBAS
PARA COHETERÍA EXPERIMENTAL

DERWIN YESITH ARENAS ANDRADE

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico

Asesor:

GERMAN URREA QUIROGA

Magister en Administración – Universidad Pontificia Bolivariana

Director:

JORGE ELÍAS MONTOYA VELEZ

Magister en Ingeniería Aeroespacial - Universidad Del Sur De California

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA
MEDELLÍN 2019

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma Nombre Jurado

Firma Nombre Jurado

MEDELLÍN, __ DE 2019

DEDICATORIA

Dedico mi proyecto de grado principalmente a Dios, a mi madre, a la memoria de mi padre, pilar fundamental en mi desarrollo personal y profesional a lo largo de estos años, y a mis hermanos y amigos, cuyo apoyo en momentos difíciles se convirtió en una motivación mas para que este proyecto saliera adelante.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias a mis padres, hermanos, especialmente a Carmen Ortiz, Antonio Salazar y Catalina Salazar Ortiz, quienes en estos años de carrera profesional se han convertido en parte importante de mi vida, y en una segunda familia en la cual apoyarme en los momentos de mayor dificultad, a todos ustedes, gracias.

Agradezco a la planta profesoral de la facultad de ingeniería aeronáutica de la universidad pontificia bolivariana, por la constante disposición de enseñar, por incentivarnos a dar lo mejor de nosotros y querer hacer de cada uno de sus estudiantes los mejores ingenieros, pero más importante aún, mejores personas.

Finalmente, quiero dar un agradecimiento a Germán Urrea Quiroga, y a mi asesor Jorge Elías Montoya Vélez por su constante colaboración a lo largo del desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido

Nota de aceptación	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
TABLA DE CONTENIDO	6
LISTADO DE FIGURAS	9
LISTADO DE TABLAS	11
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	13
OBJETIVOS.....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos.....	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.1. Antecedentes de desarrollo específico.....	16
1.2. Descripción y formulación del problema.....	21
1.3. Alcance y limitaciones del proyecto	23
1.3.1. Alcances	23
1.3.2. Limitaciones	23
1.4. Metodología.....	23
2. MARCO REFERENCIAL.....	25
2.1 Marco contextual.....	25
2.2. Marco conceptual	26
2.2.1. Principales características de un banco de pruebas.....	26
2.2.2. Partes principales que componen un banco de pruebas	27
2.2.3. Materiales para la estructura de un banco de pruebas	28
2.3. Clasificación de los bancos de prueba	29
2.3.1. Banco de pruebas estático elemental	31
2.3.1.1. Cálculo de velocidad de combustión	32
2.3.1.2. Cálculo del valor de empuje	32
2.3.2. Banco de pruebas estáticas simple.....	33
2.3.2.1. Cálculo del valor de empuje	33

2.3.3.	Sistemas modulares	34
2.3.3.1.	Ejemplos de bancos de pruebas modulares para motores de propulsante sólido	35
2.3.3.2.	Ejemplo de banco de prueba modular para motores híbridos	37
2.4.	Clasificación de los motores cohete	38
2.4.1.	Según el tipo de propelente	38
2.4.1.1.	Sólidos.....	38
2.4.1.2.	Líquidos.....	40
2.4.1.3.	Híbridos.....	41
2.4.2.	Según la fuerza de impulso	42
2.4.2.1.	La letra	42
2.4.2.2.	El número.....	43
2.4.2.3.	Longitudes.....	44
2.5.	Sistemas de adquisición de datos	44
2.5.1.	Sistemas de medición de presión	44
2.5.1.1.	Manómetros	45
2.5.1.2.	Transductor de presión electrónico.....	45
2.5.2.	Sistemas de medición de empuje	46
2.5.2.1.	Medición de empuje con sistema elástico o peso	47
2.5.2.2.	Medición de empuje con sistema de manómetro y pistón	47
2.5.2.3.	Medición de empuje con sistema de celda de carga.....	47
2.5.3.	Sistemas de medición de presión y empuje	49
2.5.3.1.	Sistema de medición con celda de carga y transductor de presión	49
2.5.4.	Sistemas de medición y registro	51
2.6.	Sitio físico donde realizar las pruebas	51
2.6.1.	Filmación de las pruebas	52
2.7.	Análisis de resultados obtenidos	52
2.8.	Seguridad	53
2.9.	Reproducibilidad.....	54
3.	DISEÑO PRELIMINAR DEL BANCO DE PRUEBAS.....	56
3.1.	Justificación del diseño	56
3.2.	Características principales de diseño.....	56
3.2.1.	Selección de material.....	57

3.2.2.	Análisis de fuerzas y factor de seguridad	62
3.3.	Proceso de diseño.....	62
3.4.	Configuración final y planos.....	75
4.	METODOLOGÍA DE GENERACIÓN DE MALLA EN ELEMENTOS FINITOS.....	80
4.1	Generalidades	80
4.2	Consideraciones generales para el mallado del modelo	83
4.3	Calidad de malla.....	85
4.3.1	Relación de aspecto	85
4.3.2	Frontera	85
4.3.3	Simetría.....	86
4.4	Tipos de malla	86
4.4.1	Mallas estructuradas	87
4.4.1.1.	Métodos algebraicos	87
4.4.1.2.	Métodos basados en EDPs.....	88
4.4.1.3.	Métodos de superposición-Deformación de retícula.....	89
4.4.1.4.	Métodos de crecimiento estructurado.....	91
4.4.2	Malla no estructurada	91
4.4.2.1.	Métodos de Delaunay-Voronoi	92
4.4.2.2.	Métodos de frente de avance.....	95
4.4.2.3.	Generación de mallas cuadriláteras y hexaédricas no estructuradas.	96
4.4.2.4.	Metodología multibloque	97
4.5.	Mallado de la estructura.....	99
5.	SIMULACIÓN Y RESULTADOS	109
5.1	Simulación con mallado tetraédrico	109
5.2.	Efectos de la temperatura sobre el banco de pruebas.....	120
5.3.	Análisis de independencia de malla.....	121
	CONCLUSIONES	125
	RECOMENDACIONES.....	126
	Referencias.....	127

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Perfiles de acero estructural ASTM-A36 [9].....	29
Figura 2 Motor cohete en posición horizontal [6]	30
Figura 3 Motor cohete en posición vertical con tobera hacia arriba [6]	30
Figura 4 Motor cohete en posición vertical con tobera hacia abajo [6]	30
Figura 5 Motor Tango en sus pruebas, semienterrado [6]	31
Figura 6 Motor Tola en su primer prueba semienterrado [6].....	31
Figura 7 Motores de la serie Tango [6]	35
Figura 8 Banco de ensayo para motores cohete No. 1. [6].....	36
Figura 9 Banco de ensayo de motores cohete No. 2. [6]	36
Figura 10 Banco de ensayo de motores cohete No. 3. Desarmado. [6]	37
Figura 11 Banco de ensayo de motores cohete híbridos No. 3. [6].....	37
Figura 12 Motor de propelente sólido [10].....	38
Figura 13 Esquema de un sistema de medición de presión con manómetro [6]	45
Figura 14 Esquema de un sistema de medición de empuje con transductor de presión [6]	46
Figura 15 Esquema de un sistema de medición de empuje con resorte [6].....	47
Figura 16 Esquema de un sistema de medición de empuje con sistema de manómetro y pistón [6] .	47
Figura 17 Esquema de un sistema de medición de empuje con sistema de celda de carga [6]	48
Figura 18 Banco de pruebas con sistema de medición de celda de carga [6]	48
Figura 19 Sensor de presión [6]	50
Figura 20 Celda de carga [6].....	50
Figura 21 Amplificador, conversor A/D [6]	50
Figura 22 Amplificador, conversor A/D, Notebook [6]	51
Figura 23 Equipo de registro filmográfico para prueba de motores cohete [6]	52
Figura 24 Tipo horizontal y vertical [14]	62
Figura 25 Banco de pruebas RMTS. Tipo horizontal [15].....	63
Figura 26 Banco de pruebas. Tipo horizontal [14]	64
Figura 27 Banco de pruebas tipo horizontal [14].....	64
Figura 28 Banco de pruebas para motores híbridos [16]	65
Figura 29 Banco de pruebas de tipo horizontal [17].....	66
Figura 30 Banco de pruebas para motores híbridos [18]	67
Figura 31 Ubicación de la celda de carga [18]	68
Figura 32 Banco de pruebas SPL de 100 kN [19].....	68
Figura 33 Boceto banco de pruebas inicial	71
Figura 34 Primer diseño banco de pruebas	72
Figura 35 Diseño preliminar del banco de pruebas	73
Figura 36 Diseño final banco de pruebas.....	74
Figura 37 Diseño detallado banco de pruebas.....	75
Figura 38 Planos banco de pruebas	76
Figura 39 Sistema de sujeción del motor.....	76
Figura 40 Estructura de soporte del motor.....	77
Figura 41 Perfiles de sujeción de piso.....	77
Figura 42 Estructura de sujeción de pared	78
Figura 43 Placa de sección central	78
Figura 44 Banco de pruebas con sistema de adquisición de datos	79
Figura 45 Relación de aspecto [22]	85
Figura 46 Definición de frontera en las zonas de mallado [22]	86
Figura 47 Mallas generadas mediante métodos algebraicos [34]	88
Figura 48 Mallas bidimensionales generadas mediante la resolución de EDPs: a) Laplace, b) Poisson, c) Hiperbólico [34].....	89
Figura 49 Superposición de retícula: a) Retícula inicial, b) Intersección con el dominio [34]	90

Figura 50 Ajuste al contorno: a) deformación de cuadrados, b) Retícula jerárquica [34]	90
Figura 51 Mallas hexaédricas de crecimiento estructurado [34]	91
Figura 52 Triangulación de Delaunay: a) Inserción de nodo, b) Detección y eliminación de elementos, c) Triangulación local [34]	94
Figura 53 Evolución de una triangulación de Delaunay bidimensional [34]	94
Figura 54 Tratamiento del frente de avance en mallas bidimensionales [34]	96
Figura 55 Evolución de la malla en el método de frente de avance [34]	96
Figura 56 Mallas no estructuradas cuadriláteras y hexaédricas [34]	97
Figura 57 Generación de malla multibloque: a) Descomposición inicial, b) Malla final [34]	98
Figura 58 Malla por defecto de ANSYS	99
Figura 59 Calidad del elemento en malla generada por defecto	100
Figura 60 Relación de aspecto en malla generada por defecto	100
Figura 61 Aplicación de técnicas de mallado avanzadas. Elementos tetraédricos	101
Figura 62 Malla con elementos tetraédricos	101
Figura 63 Calidad del elemento en mallado con refinamiento	102
Figura 64 Relación de aspecto de los elementos	103
Figura 65 Máximo ángulo de esquina en los elementos del dominio	103
Figura 66 sesgo de los elementos en el dominio	104
Figura 67 Métodos de mallado estructurado, mediando elementos hexaédricos	104
Figura 68 Discretización del dominio en zonas con curvatura	105
Figura 69 Mallado hexaédrico y optimización topológica del dominio	105
Figura 70 Calidad de elementos hexaédricos en la malla	106
Figura 71 Relación de aspecto elementos hexaédricos	107
Figura 72 Máximo ángulo de esquina de los elementos hexaédricos	107
Figura 73 Elementos con ángulo de esquina de 89,4° en el dominio	107
Figura 74 Sesgo de los elementos hexaédricos	108
Figura 75 Elementos con sesgo de 0,0482 en el dominio	108
Figura 76 Malla tetraédrico de la estructura	110
Figura 77 Calidad de los elementos	110
Figura 78 Relación de aspecto de los elementos	110
Figura 79 Máximo ángulo de esquina	111
Figura 80 Sesgo de los elementos	111
Figura 81 Deformación total en el punto de aplicación de la carga	111
Figura 82 Esfuerzo equivalente (Von Mises) en el punto de aplicación de la carga	112
Figura 83 Punto de la estructura en el cual se tiene el factor de seguridad mínimo	112
Figura 84 Mallado de la estructura con elementos tetraédricos	113
Figura 85 Calidad de los elementos	113
Figura 86 Elementos calidad inferior a 0,2	114
Figura 87 Relación de aspecto	114
Figura 88 elementos con relación de aspecto mayor a 10	115
Figura 89 Máximo ángulo de esquina	115
Figura 90 Elementos con máximo ángulo de esquina superior a 150°	116
Figura 91 Sesgo de los elementos	116
Figura 92 Superficies de soporte fijo en el banco de pruebas	117
Figura 93 Ubicación fuerza de empuje	117
Figura 94 Resultados de deformación total	118
Figura 95 Esfuerzo equivalente de Von-Mises	118
Figura 96 Factor de seguridad mínimo	120
Figura 97 Análisis de convergencia esfuerzo de Von-Mises	122
Figura 98 Análisis de convergencia deformación total	123

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 clasificación de motores por letra [8].....	43
Tabla 2 Dimensiones motores cohete [8]	57
Tabla 3 Características motores cohete [8]	57
Tabla 4 Composición química AISI 1020 [12].....	58
Tabla 5 Propiedades mecánicas AISI 1020 [12].....	59
Tabla 6 Composición química ASTM-A36 [12]	59
Tabla 7 Propiedades mecánicas ASTM-A36 [12].....	59
Tabla 8 Composición química aluminio [12]	60
Tabla 9 Propiedades mecánicas aluminio [12].....	60
Tabla 10 Matriz de selección ponderada [13].....	61
Tabla 11 Clasificación de los elementos tetraédricos según el valor del sesgo.....	117
Tabla 12 Número de elementos vs Esfuerzo equivalente de Von – Misses	121
Tabla 13 Número de elementos vs Deformación total	123

RESUMEN

Se ha realizado el diseño y análisis estructural preliminar de un banco de pruebas para coherencia experimental, haciendo uso de la herramienta de análisis computacional ANSYS, en específico de su módulo de análisis estructural y la metodología elementos finitos. Para llevar a cabo esto, primero se pasó por un proceso de investigación de configuraciones, diseño, selección de materiales, procedimientos de generación de malla y posterior implementación del software de análisis.

PALABRAS CLAVE

Banco de pruebas, malla, software de análisis, motor cohete, elementos finitos, análisis estructural

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El programa de Ingeniería Aeronáutica de la Universidad Pontificia Bolivariana tiene como objetivo formar profesionales en el ámbito de la industria aeronáutica y aeroespacial con las herramientas adecuadas y de la mejor calidad para poder desarrollar cada una de las competencias que ésta exige, es por esto por lo que la realización de un proyecto que busque afianzar las capacidades que tiene la universidad de brindarle al estudiante estas herramientas se muestra necesaria y el motivo principal por el cual este proyecto ha sido emprendido.

Un banco de pruebas para cohetes experimental permite en muchas formas tener un acercamiento más objetivo a la hora de hacer el análisis de una configuración en específico de motor cohete, o de todo el conjunto que compone uno de ellos. Este brinda la oportunidad de apropiarse de los análisis con criterios cuantitativos y estableciendo parámetros de desarrollo basados en la experimentación, de esta forma la comprensión acerca del funcionamiento de estos mecanismos se fortalecerá y hará de este un equipo de vital importancia para las generaciones de futuros ingenieros aeronáuticos quienes sienten un interés particular por el tema.

A lo largo de este proyecto se realizará un proceso de investigación en busca de materiales, configuración y un diseño preliminar que ofrezca el mejor desempeño de acuerdo con las necesidades y requerimientos observados en la academia.

La construcción de un banco de pruebas con los parámetros mínimos para cumplir los requerimientos básicos de un desarrollo objetivo, se hace entonces de gran importancia en busca de obtener mejores resultados, brindándole herramientas al estudiante para que a partir de esas experiencias pueda desarrollar en el resto de su formación un criterio de análisis basado en datos obtenidos de procesos experimentales que le ayuden a tomar mejores decisiones y de esa forma implementar herramientas sobre las cuales sustentar su criterio y sus argumentos, y con ese criterio proveer soluciones a los diferentes problemas que se presenten.

Es así pues que el problema que se plantea solucionar con el desarrollo de este proyecto va

más allá del hecho de suplir a futuro una necesidad material, sino también el de otorgarle a los estudiantes una herramienta que les permita analizar de forma objetiva las características de los componentes o parámetros presentes en el ámbito de la coherencia experimental. Para los estudiantes de ingeniería aeronáutica el análisis de los fenómenos es de vital importancia para su formación, su correcta interpretación y los posibles procedimientos ingenieriles que podrían seguirse para darle solución a los inconvenientes encontrados.

¿Cómo obtener mejores resultados? Claramente con herramientas que permitan un estudio juicioso de las variables que alteran el funcionamiento adecuado de los componentes, la utilización de un banco de pruebas provee estas facultades y ofrece la oportunidad de establecer un criterio dado por los datos experimentales que se puedan obtener y sobre el cual realizar apreciaciones objetivas y llevar a cabo correcciones oportunas y pertinentes.

Es aquí donde realizar un estudio del diseño y análisis estructural preliminar del banco de pruebas, en cuanto a sus principales componentes, capacidades y alcances prácticos se hace importante, se hace entonces un tema de carácter complementario y que funge como herramienta que permite afianzar el conocimiento teórico obtenido en los cursos previos a los cuales se dirige el presente desarrollo, y que es una de las razones por las cuales se piensa llevar a cabo esta investigación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseño y análisis estructural preliminar de un banco de pruebas para motores de cohería experimental, en el que se puedan analizar las principales características y consideraciones que se deberían atender en el proceso de diseño de un motor cohete, realizando validaciones de funcionamiento y desempeño en software especializado, con el fin de proveer un diseño final que sea en teoría capaz de cumplir con todos los requerimientos y exigencias a las cuales podría ser sometido en condiciones de operación normal.

Objetivos específicos

- Establecer el tipo y rango de operación del banco de pruebas.
- Establecer las condiciones de operación del banco de pruebas.
- Establecer y analizar las fuerzas físicas a las que se verá sometido el banco de pruebas.
- Diseñar preliminarmente el banco de pruebas.
- Analizar el funcionamiento del banco de pruebas en condiciones de operación normales y críticas.
- Desarrollar el análisis estructural del diseño de banco de pruebas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes de desarrollo específico

Es importante determinar en qué punto de desarrollo tecnológico se encuentra el objeto de estudio, y obtener así una vista periférica lo suficientemente amplia como para fundamentar aún más los objetivos de esta investigación, y si así lo requiere, limitar o extender el alcance de lo que se pretende hacer. En el desarrollo de la coherencia experimental, se han llevado a cabo muchos avances para conocer y definir de mejor manera los parámetros e implicaciones que tiene cada uno de los componentes que en conjunto hacen un cohete de carácter experimental, de ahí que uno de los elementos más importantes en este proceso sea la consecución de un análisis del artefacto, la totalidad de sus componentes trabajando en conjunto para el objetivo planteado; siendo así el banco de pruebas el que cumple esta finalidad, entregando datos del comportamiento físico del mismo, y dejando en claro el rendimiento que pueda ofrecer.

En Colombia, el desarrollo de la coherencia experimental ha tenido un crecimiento considerable en los últimos años, debido al interés de diversas universidades por ofrecer programas que permiten extender los conocimientos en el ámbito académico de la ingeniería aeroespacial y más específicamente en la ingeniería de cohetes y satélites, centros de educación superior como la Universidad de los Andes (UNIANDES), Universidad Pontificia Bolivariana (U.P.B), Universidad de San Buenaventura (U.S.B), Universidad de Antioquia (U. de A.), Universidad Nacional de Colombia (UNAL) entre otras, han visto la necesidad de implementar en sus respectivas facultades los mecanismos necesarios para brindar la mejor experiencia a nivel educativo y esto ha implicado el estudio y desarrollo de distintas configuraciones de bancos de prueba, todos con una misma finalidad claro está, pero también todos siguiendo métodos de desarrollo distintos, primando parámetros diferentes y estableciendo las configuraciones de acuerdo a las variables físicas de mayor interés.

La Universidad de los Andes ha venido trabajando en proyectos de desarrollo principalmente en diseño, construcción y pruebas de cohetes. En el marco del proyecto

uniandino aeroespacial se han llevado a cabo un total de XII misiones desde el 2009. En su estudio [1] se encuentra todo el proceso de desarrollo del cohete para la misión SENECA I, la cual consistió en el desarrollo de un modelo de cohete de combustible sólido en el que serían descritos los procesos de manufactura, construcción y lanzamiento.

Remitiéndose al trabajo desarrollado por Javier José De la Hoz Gonzáles (2011) [2], de la facultad de ingeniería aeronáutica de la universidad de San Buenaventura se observa un desarrollo con la metodología adecuada de análisis juicioso y con la rigurosidad pertinente en el que se establecieron objetivos claros, y que tenía como finalidad la construcción del prototipo, y la realización de pruebas de un motor cohete. Se observan diferentes fases de diseño, análisis estructural, y procedimientos de selección de configuraciones adecuadas en función de las capacidades operacionales y la facilidad de construcción, es aquí donde es posible ver que este proyecto presenta objetivos menos ambiciosos debido al alcance puramente conceptual, que se prevé tendrá el mismo.

Puesto que la implementación y la construcción no son la finalidad del presente proyecto, será posible abarcar aspectos más particulares y centrarse en una forma mucho más apropiada en la busca de un diseño que ofrezca mejores capacidades de operación, con sistemas de toma de datos electrónicos que ofrezcan más precisión en la toma de datos, y rangos operacionales más amplios y un diseño mucho más ambicioso respecto de los requerimientos a los que podría ser exigido el banco de pruebas en la academia, es importante notar también que en este caso en particular el banco de pruebas realizado por De La Hoz Gonzáles, el proceso de selección de materiales realizada se basó en la disponibilidad que tenía, de nuevo se cuenta con un rango más amplio de posibilidades en este aspecto, en el que en busca de hacer más eficiente y de mejor calidad un posible producto final basado en el desarrollo que se llevará a cabo aquí, deberán seleccionarse materiales que presenten mejor desempeño en las condiciones de operación a las cuales estará sujeto el dispositivo.

Claro está, esa no es la única referencia que se tiene en el país respecto al desarrollo de un banco de pruebas para motores en cohetaría experimental, la Universidad Nacional de Colombia, en cabeza de los ingenieros mecánicos del CIAG-UN, Nelson Álvarez rojas,

Jerson Leonardo Huérfano romero y Oscar Iván Ojeda Ramírez [3], desarrollaron el diseño y la posterior construcción de un banco de pruebas para motores cohete de combustible sólido, líquido e híbrido, con empuje pico máximo de 1000 N, enfocando el diseño en dos principales ejes, diseño mecánico y electrónico. Aquí es observar también una metodología de diseño basada en el objetivo final que sería la implementación del sistema, partiendo de una fase análisis y caracterización de materiales en la que se buscaba a priori seleccionar los materiales adecuados para obtener valores predeterminados en función del rendimiento operacional que se planteó desde el inicio, también que las fases de diseño previo, y la discretización adecuada del modelo matemático es de vital importancia para definir parámetros sobre los cuales puedan llevarse a cabo las simulaciones propuestas, en este sentido se deja claro que el desarrollo de bancos de prueba en el país está bien fundamentado, se tienen muy claro los requerimientos que necesariamente debería cumplir un banco de pruebas y todas las variables a tener en consideración a la hora de desarrollar estudios o análisis similares.

Es importante hacer referencia a los avances y desarrollos hechos hasta el momento en el ámbito internacional, esto servirá para definir de cierto modo las limitaciones que pueden presentarse en una comparativa de disponibilidad de recursos frente a desarrollos llevados en el país, se consultan entonces documentos referentes al tema, se hace referencia tan solo a algunos de ellos y las principales características de sus desarrollos para conocer de primera mano el avance respecto del campo nacional.

Haciendo referencia entonces al llevado a cabo por Douglas Moraes Soares, Francisco Telöken, Tiago Cassol Severo y por último Matheus Poletto [4], analizar el rendimiento de un motor de cohetaría experimental fue el objetivo de este estudio y se observa en él la descripción adecuada de las principales características que se deseaban estudiar y que representaban para ellos una parte importante en todo diseño y desarrollo, es importante notar que establecer un rango o límite de esfuerzo o fuerzas que se quieren medir se hace necesario cuando se desea llevar a cabo la implementación del mismo, puesto que esto define las características que debería cumplir el banco de pruebas, parámetros como; calidad y rendimiento del propelente, estructura a utilizar, geometría del banco de pruebas, cargas a las cuales estará sometido entre otros, fueron algunos de los mecanismos que utilizaron

para demarcar su desarrollo, y que están dentro de la metodología que se llevó a cabo para el proyecto.

Los desarrollos llevados a cabo para concebir un diseño e implementación adecuado en Colombia y otros países se observa siguen lineamientos similares y por tanto se puede afirmar que la conceptualización desde el proceso de caracterización inicial de la idea, la estructuración del objetivo y la finalidad que ha tenido cada uno de los objetivos que se han planteado en los distintos diseños, están claramente muy bien fundamentos en las diferentes teorías desarrolladas para esto.

Algo que fundamentará en gran medida el trabajo que se planea desarrollar, es el análisis mediante elementos finitos, y esto hace necesario centrarse en los aspectos importantes de esta metodología, su construcción analítica, las bases físicas inmersa en ellas y de tal modo, comprender el trasfondo para darle un manejo adecuado a la teoría.

El trabajo presentador por Luiza Fabrino Favato y el Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior [5], muestra de forma clara la metodología computacional y los pasos a seguir en el procedimiento de análisis estructural mediante elementos finitos, empezando por determinar el tipo de elemento, desarrollando el modelo matemático, la discretización del modelo y por último obteniendo los parámetros de interés para ser analizados.

Como parámetro primordial para un buen análisis de elementos finitos, la definición de la malla se convierte en este punto en un elemento de especial cuidado, sus características de tamaño y distribución sobre el elemento, definirán la precisión sobre puntos específicos de la estructura y los lleva a tener zonas de mallado más preciso y de tamaño de elemento más pequeño, conservando la relación de aspecto adecuada entre elementos para proporcionar la menor cantidad de desviaciones posibles en los datos a obtener, otro elemento de interés aquí expuesto es la necesidad de definir también hipótesis de carga sobre los elementos, hacer esto garantizará la distribución correcta de la misma sobre la estructura y permite obtener las respectivas características de deformación y esfuerzos.

La relación entre las cargas variables en el tiempo y las frecuencias naturales se convierte

también en un parámetro de especial interés y de mucho cuidado en los bancos de prueba, esto debido a que, por lo general, hacen parte de estructuras rígidas apoyadas sobre la superficie. Esto también lleva a ver el tipo de condiciones de frontera planteadas por los desarrolladores de la investigación y establecer claridad respecto a que estas son dependientes de la geometría específica de cada elemento, características de diseño que podrían facilitar el análisis subsecuente.

Si bien los fundamentos prácticos de construcción e implementación, la características de estos se limitan mucho en el tipo de motor cohete que se puede poner a prueba en cada uno de los bancos, es aquí donde se nota que hace falta explorar el campo de la multifuncionalidad operativa del mecanismo, ampliando así el tipo de motores cohete que se puedan someter a pruebas de rendimiento operacional, la respuesta a este requerimiento es, claro, un banco de pruebas para motores cohete de combustibles sólidos y líquidos. Un híbrido. Ya que estos ofrecen particulares como multifuncionalidad que permiten la caracterización de motores tanto de combustible sólido como líquido, por ejemplo, la modularidad, o capacidad de desarrollar la estructura en módulos, es una de las características de los bancos de prueba híbridos, esto hace que sean fáciles de adaptar a diferentes configuraciones de motor cohete lo cual es conveniente en caso de que el motor a probar sea sólido o líquido, pues las estructura de su diseño tiende a ser diferente, y no solo la estructura, las características operacionales, los motores cohete de combustible líquido poseen sistemas más complejos, sistemas de inyección/mezclado de combustible, bombas de presión entre otros elementos, que los hacen de mayor tamaño y sobre todo, más inestables a la hora de ponerlos a prueba. Por esto, la condición de estructura rígida debe ser una característica primordial en el diseño.

1.2. Descripción y formulación del problema

¿De qué manera se puede proporcionar las herramientas necesarias y más idóneas para realizar un adecuado estudio de las características principales de un prototipo de cohetaría experimental? Al centrarse en el desarrollo de la cohetaría experimental en el ámbito educativo, es de suma importancia la toma de datos para el posterior análisis de estos y a partir de los mismos lograr un grado de fundamentación teórica-experimental sobre la cual basarse para posibles avances y mejoras en los prototipos. Es ahí donde este proyecto quiere llegar, ya que el objetivo es hacer mucho más eficiente el proceso de aprendizaje del estudiantado de la facultad.

Al someter un motor cohete a una prueba de rendimiento de sus principales parámetros, estos deben estar bien definidos, puesto que los resultados cuantitativos y cualitativos que se busque conocer y posteriormente optimizar necesariamente deben pasar por un proceso de comparación respecto de un diseño inicial. Los parámetros principales de un motor cohete tales como el empuje, el impulso específico, tiempo de quemado, temperatura máxima en la cámara de combustión, temperatura de flama, presión en las zonas convergente-divergente, entre otras, son las que definen las características de diseño de un motor. Uno de los motivos por los cuales se optó por desarrollar este proyecto, es debido a la carencia de herramientas de primera mano que redujeran las dificultades que se presentaron a la hora de obtener datos sólidos sobre el rendimiento operacional de prototipos de motor y capacidad de propelente, específicamente en el curso de ingeniería de cohetes y satélites, donde debido en parte a la imposibilidad de realizar un análisis concreto del rendimiento adecuado del motor y el propelente que se utilizaría en el diseño final, no se obtuvieron los resultados esperados. Esto representa en sí mismo una desviación considerable de la objetividad investigativa y del correcto procedimiento al cual conduce un proceso de desarrollo, investigación y construcción de un producto final con el fin de ser implementado, la calidad final de un diseño se juzga con base en la cantidad de datos obtenidos mediante desarrollos de prototipos, pero la imposibilidad de obtener datos cuantitativos específicos, que describieran el comportamiento general de éstos, conlleva en sí mismo la pérdida de objetividad y claridad del proceso de desarrollo que a la postre se vio afectado.

1.3. Alcance y limitaciones del proyecto

1.3.1. Alcances

El diseño y análisis estructural preliminar del banco de pruebas, se hará hasta su fundamento físico, matemático y computacional, entregando así en la fase final del proyecto un diseño que cumpla con los requerimientos planteados inicialmente, habiendo seleccionado y utilizado las teorías adecuadas para los distintos planteamientos, tanto de comportamiento estático, importante para definir condiciones de operación estable, como de elementos finitos, que se utilizará para definir el tipo de modelo matemático-computacional que se utilizará para el análisis estructural del diseño.

1.3.2. Limitaciones

Las principales limitaciones que a priori se tendrán serán en principio de carácter computacional, esto debido a que se hará uso en cada uno de los procesos, tanto de diseño de la estructura, como del análisis estructural por elementos finitos, de software con licencias de tipo estudiantil que, aunque son buenas y servirán para nuestro objetivo, no brindaran la calidad deseada, y la precisión necesaria que se desearía en función de un diseño y estudio estructural riguroso. Esta limitación al final no primó en el proceso de simulación final puesto que se llevó a cabo en una versión licenciada.

1.4. Metodología

En busca de cumplir con los objetivos anteriormente planteados, se seguirá una metodología de investigación basada en hechos experimentales y teorías analíticas, que nos permitan obtener datos para que puedan ser estudiados y analizados con los respectivos criterios ingenieriles de diseño, análisis estructural, modelos matemáticos de los fenómenos, entre otros; y de esta manera poder establecer los parámetros que en teoría nos significarían el mejor desempeño del banco de pruebas.

Para poder establecer una metodología consecuente con los objetivos que se plantean es importante esclarecer en principio como se llevaran a cabo cada uno de ellos, construir el proceso de investigación partiendo de un orden lógico coherente y claro.

El planteamiento del tipo, rango y condiciones de operación de todo banco de pruebas dependerá en gran medida del uso que se le planea dar, el tipo de motores, cohetes o cualquiera que sea el mecanismo que será sometido a pruebas, para este caso en específico el banco de pruebas estará sometido a diferentes fuerzas físicas que actuarán a lo largo del eje longitudinal sobre el cual se tomarán las respectivas medidas, los rangos operacionales serán definidos por el tipo de cohetes o motor cohete puesto a ensayo, y se delimitará de acuerdo a la cantidad y tipo de combustible que se utilice, estableceremos esos rangos operacionales basados en el conocimiento teórico que se tiene sobre los materiales y el tipo de estructura que se proponga en el diseño preliminar y que se irá evaluando a medida que se desarrollen cada uno de los objetivos.

Los análisis teóricos que se establezcan alrededor de todas las posibles fuerzas físicas involucradas en el desarrollo de una prueba para motores en cohetaría experimental es de suma importancia, y es principalmente porque conociendo en detalle estas, se podrán definir los parámetros críticos y la exigencia estructural que debería en teoría ser capaz de soportar y sobre la cual obtener el mejor desempeño posible, esto ayuda a extender o bien por el contrario, limitar algunas características en el área de diseño.

Habiendo tratado de manera adecuada cada uno de los parámetros objetivos y después de

haberlos cumplido, se pasará al proceso de diseño en el cual se realizarán las respectivas consideraciones de carácter estructural, que han de surgir del correcto planteamiento del rango de operación, de las condiciones de operación, los esfuerzos, y fuerzas a las cuales se verá sometido el artefacto en pruebas.

Esto significa seguir procedimientos sistemáticos ordenados, fases preliminares de diseño del banco de pruebas, modelos matemáticos y ecuaciones gobernantes de las variables físicas que afecten el diseño en condiciones de operación estables, y de análisis estructural en software. Siendo esta la forma en la cual se llevará a cabo de la mejor manera un proceso en el cual también se optimice el tiempo y los recursos, objetivo principal por el cual se desarrolla una metodología a seguir en un proceso de investigación.

Las fases preliminares de diseño son de suma importancia para el desarrollo de la respectiva investigación como tal, puesto que estas se harán basadas en los planteamientos iniciales y cuyo objetivo primario será cumplir con los requerimientos para los cuales está siendo diseñado el banco de pruebas, y que lo haga de la manera más eficaz y eficiente posible. Siendo ésta tratada al final, porque el diseño es un aparte posterior a los análisis y modelos matemáticos que se seguirán y que regirán la construcción de este, basados en teorías de elementos finitos para cada uno de los elementos estructurales de interés.

A la hora de realizar una investigación es importante conocer detalladamente la forma en la cual la llevaremos a cabo y la metodología científica a seguir, reconocer los parámetros y las variables cualitativas y cuantitativas necesarias para su posterior análisis. Por las características, los objetivos y la finalidad a la cual se planea llegar se define en primera instancia una metodología de investigación descriptiva, en la cual como parámetros importantes y delimitadores del desarrollo se encuentra el hecho de haber definido claramente el objetivo y los procesos de análisis que llevarán a las conclusiones correspondientes, haciendo un estudio específico en un tema bien particularizado y delimitado por los correspondientes requerimientos que debería ser capaz de cumplir el mecanismo en su última fase de diseño.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco contextual

En el proceso se debe tener en cuenta el sector específico de la sociedad en el cual se llevará a cabo la investigación y posterior desarrollo del proyecto. La facultad de ingeniería aeronáutica de la universidad pontificia bolivariana es el ente final al cual se quiere llegar, estableciendo como objetivo final, entregar un estudio y análisis detallado de los procedimientos necesarios para la construcción de un banco de pruebas adecuado a los requerimientos específicos de los cursos en los cuales se implementa, teniendo en cuenta que el curso en específico al cual va dirigido el desarrollo de este proyecto es en principio el curso de ingeniería de cohetes y satélites, que es donde se implementa con un mayor grado de rigurosidad debido a las implicaciones finales que tiene un buen análisis en el diseño final de los prototipos de cohete desarrollados a lo largo del mismo.

La respectiva implementación de un banco de pruebas que a futuro pueda hacer la universidad con base en el diseño y análisis estructural que se pretende realizar aquí, se planea que sirva como herramienta para las generaciones futuras de estudiantes que reciban los cursos en los cuales este dispositivo pueda ser usado, sería un avance importante en busca de obtener mejores resultados en las capacidades de análisis de las características principales de un motor, propelente o el conjunto completo de cohete experimental, para obtener el mejor desempeño de los elementos en cuestión y por tanto, dejar afianzados en los estudiantes los conocimientos y todos los posibles parámetros para tener en cuenta en el desarrollo de esta actividad a nivel académica y en la industria.

2.2. Marco conceptual

Es importante establecer de manera clara los conceptos de los cuales se ha hablado hasta el momento y los que claramente se seguirán utilizando y ampliando a lo largo del proceso de desarrollo del trabajo investigativo.

Las distintas herramientas que como estudiantes de ingeniería se utilizan no están frecuentemente relacionadas con la sociedad en general, es importante entonces abrir el campo de análisis y desarrollar ideas de tal forma que sean entendibles en sus bases más simples y de esta forma obtener opiniones de diversas fuentes que en este caso en particular permitirán ampliar el alcance del proyecto.

El proceso de investigación y desarrollo consta de procedimientos ingenieriles de diseño, análisis estructural, caracterización de materiales, combustibles utilizados frecuentemente en cohetes experimental, entre otros conceptos que se irán desarrollando y aclarando posteriormente, cada uno de los anteriormente mencionados, constan de características particulares que hacen de ellos de importancia relevante en el proceso investigativo por las facultades de arrojar características cualitativas y datos cuantitativos de distintos apartes del proceso, y por lo cual una descripción detallada de ellos debe ser llevada a cabo. La información presentada en los siguientes literales fue obtenida de [6], y ampliada con información de [2] [7] y [8].

2.2.1. Principales características de un banco de pruebas

Un banco de prueba de motores cohete, es un elemento en el cual se ubican los cohetes o motores cohete para su caracterización, permitiendo evaluar parámetros de suma importancia tales como: empuje, impulso específico, tiempo de combustión, temperatura de combustión, presión en la cámara de combustión, uniformidad de flujo por la tobera, entre otros. Es por esto por lo que el diseño de un banco de prueba que nos ayuda a evaluar de la forma más precisa, estable y segura. Lo anteriormente mencionado se considera como una etapa fundamental en el proceso de desarrollo de motores cohete.

La forma, materiales y diseño de un banco de pruebas se suele realizar en función de la

disponibilidad de materiales, habilidades y principalmente el tipo de cohetes o motores cohete que se planea probar (de combustible sólido, líquido, o híbrido). En vista de lo variable en cuanto a los parámetros de diseño este no se define desde el inicio, se presentan diferentes conceptos e ideas constructivas para que el diseño final sea una solución de compromiso entre los elementos disponibles y las necesidades.

En cuanto a las características estructurales de un banco de pruebas, es importante resaltar que existen una innumerable cantidad de diseños propuestos cada uno con sus respectivas ventajas y desventajas, aquí se darán descripciones generales de algunos de ellos, estableciendo un marco global sobre estos y las principales partes que los componen. La complejidad del diseño es algo que se analiza también en una fase de conceptualización como la que se está llevando a cabo puesto que establecerá la dificultad o no, que puedan llegar a tener las personas que lo construyan si llegado el caso se fuese a hacer, aunque ese no sea el objetivo final del presente trabajo es muy importante tenerlo en cuenta porque el objetivo del mismo es establecer el mejor diseño posible basado en los requerimientos y necesidades que se han reconocido y establecido con anterioridad.

Es posible ensayar un cohete totalmente construido, listo para vuelo, o simplemente la configuración de motor, con los respectivos refuerzos y ajustes mecánicos para la correcta instalación y proceso de prueba. Estos posibles cambios en la configuración también deben ser consideradas.

2.2.2. Partes principales que componen un banco de pruebas

Existen muchos tipos de bancos de pruebas, pero todos tiene características y componentes muy similares. Las partes principales que integran un banco de pruebas son:

- Dispositivo en el cual irá soportado el cohete o motor cohete.
- Dispositivos de adquisición de datos: presión, empuje, temperatura, etc.
- Dispositivos de registro visual del ensayo.

Al igual que el banco de pruebas está sujeto a ciertos componentes estructurales principales,

también está sujeto a condiciones particulares que deben ser tenidas en cuenta en el proceso de diseño.

- El banco de pruebas debe ser rígido y fuerte para soportar las fuerzas que desarrolla el motor cohete.
- El motor cohete debe estar firmemente sujeto al banco de pruebas, en caso de que el motor tenga características específicas como empuje vectorial (capacidad de redireccionar el flujo en distintos ángulos, cambiando así la componente de empuje), el motor debe poder moverse libremente y estar sujeto a sus guías, y estas deben asegurar que el motor no quede libre.
- Los componentes del banco de pruebas que puedan sufrir daños ante una posible explosión del motor cohete deberán estar protegidos.
- La calibración de los dispositivos de adquisición de datos deberá ser fácil y rápida.

2.2.3. Materiales para la estructura de un banco de pruebas

Los materiales con los que usualmente se construyen bancos de prueba tienen que cumplir con una característica en especial y de importancia, esta es la rigidez. Cualquier material que asegure esta condición es apto para la construcción de este [6]. Los materiales típicos son:

- Perfiles estructurales laminados de acero (L, I, C, T).
- Perfiles de aluminio (L, I, C, T).
- Tubos de acero y/o aluminio.
- Ángulos de acero perforados para estanterías.

Siendo el objetivo principal del presente entregar un diseño conceptual, habrán de elegirse materiales de acuerdo con el costo, disponibilidad y facilidad de conformado. Esto con el fin de establecer un punto de inicio pensando en una posible construcción futura. Para bancos de prueba de coherencia experimental pequeños con empujes relativamente reducidos suelen utilizarse ángulos de acero estructural, que pueden ofrecer una estructura rígida y liviana.

Por otra parte, si lo que se desea es obtener un diseño para motores cohete con grandes

empujes es preferible entonces utilizar perfiles de acero estructural ASTM-A36 como los que se muestran en la figura 1, los cuales requieren soldadura y empernado, con los que es posible conseguir una estructura rígida, liviana y bastante resistente.



Figura 1 Perfiles de acero estructural ASTM-A36 [9]

De igual manera es posible realizar un diseño de tipo modular, con esto se podrían realizar adaptaciones para probar distintos tipos de motores cohetes; así, si se hace necesario el transporte de este a un sitio diferente esta característica representa una ventaja por el hecho de poder desarmarse y favorecer el traslado.

2.3. Clasificación de los bancos de prueba

Es posible hacer la clasificación de los bancos de prueba de distintas formas, una de ellas consiste en clasificarlos por la forma en la cual se ubica el motor cohete en este, que pueden ser:

- a. Motor cohete en posición horizontal [figura 2]
- b. Motor cohete en posición vertical, con la tobera hacia arriba [figura 3]
- c. Motor cohete en posición vertical, con la tobera hacia abajo [figura 4]

Esta clasificación es importante desde el punto de vista físico por un simple motivo, la dirección hacia la cual se ejercerá la fuerza de empuje. Por ejemplo, en la configuración vertical con la tobera hacia arriba la fuerza de empuje que ejerce el motor es transferida

contra el suelo, en los demás casos será importante conseguir un apoyo rígido que soporte las fuerzas ejercidas por el motor sin afectar la estabilidad de esta, es decir, sin sufrir ningún tipo de deformación que libere presión sobre la superficie y por ende entregue datos erróneos en las mediciones.

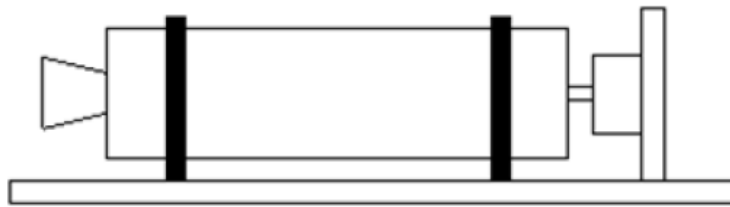


Figura 2 Motor cohete en posición horizontal [6]

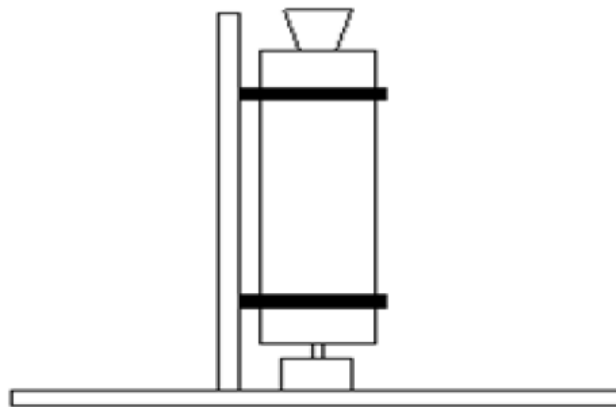


Figura 3 Motor cohete en posición vertical con tobera hacia arriba [6]

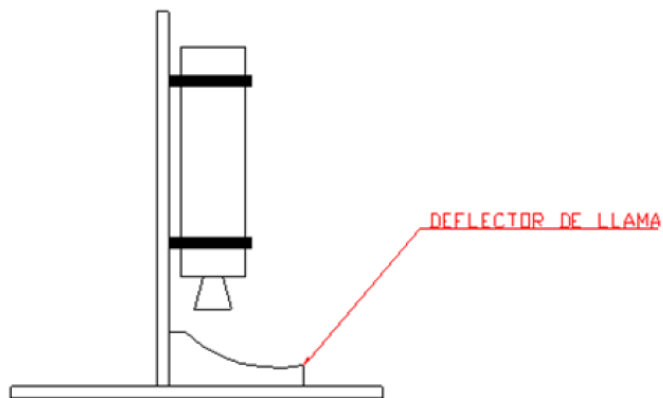


Figura 4 Motor cohete en posición vertical con tobera hacia abajo [6]

2.3.1. Banco de pruebas estático elemental

La forma de banco de prueba más simple y menos adecuada en términos de precisión consiste en poner el motor sostenido sobre cualquier superficie de alguna forma particular y realizar su encendido para comprobar su funcionamiento, conocer la velocidad de combustión del propelente, evaluar la efectividad de los mecanismos de sellado del motor (O' Rings), etc.

Se puede realizar la ubicación de manera artesanal semienterrado o sujeto a alguna base sencilla como se muestra en las figuras 5 y 6. Claro está que no cumple con muchas de las condiciones que anteriormente se han mencionado y es algo apresurado atrevernos a llamar a esta configuración como banco de pruebas, pero en cuanto a coherencia experimental se refiere es una buena aproximación.



Figura 5 Motor Tango en sus pruebas, semienterrado [6]



Figura 6 Motor Tola en su primer prueba semienterrado [6]

Ahora bien, ya que varios procesos químicos y físicos ocurren en un motor cohete durante la combustión, es conveniente tener un registro permanente de la prueba, o pruebas realizadas

de esta forma para establecer la fiabilidad del funcionamiento y obtener información útil que permita analizar el desempeño del motor cohete. Estos incluyen las reacciones químicas que ocurren durante la combustión, la forma en que se consume el propelente, el comportamiento del flujo de los gases de escape a medida que se forman en la superficie externa en la tobera, como el flujo viaja a través de la cámara y sale a través de la tobera la interacción entre los gases de escape, velocidad de combustión y valor de empuje estimado, estos últimos parámetros de especial interés para nuestro objetivo.

2.3.1.1. Cálculo de velocidad de combustión

Conociendo los parámetros que definen el espesor del propulsante y el tiempo de combustión se calcula la velocidad de combustión mostrada en la Ecuación 1.

$$r = \frac{W_{eb}}{t} \quad (1)$$

Donde:

- r: velocidad de combustión promedio (mm/s).
- Web: Espesor propelente.
- t: Tiempo de combustión.

2.3.1.2. Cálculo del valor de empuje

Con la ecuación 2 es posible estimar el valor del empuje asumiendo un valor de impulso específico.

$$E = \frac{I_{sp} * W_P}{t} \quad (2)$$

Donde:

- E: Empuje, [N]
- Isp: Impulso específico [s]
- t: tiempo de combustión [s]
- Wp: peso del propulsante [kgf]

2.3.2. Banco de pruebas estáticas simple

A medida que agregamos componentes y por tanto variamos las características específicas del sistema, obtenemos bancos de pruebas con mayor complejidad. En esta configuración se ubica el motor cohete sobre una base fija y se procede a medir la presión en la cámara de combustión, conociendo la presión en función del tiempo se evalúa el funcionamiento del motor y con este parámetro se evalúa si existe o no la necesidad de hacer correcciones en la relación del Kn, que es la relación entre el área de combustión y el área de la garganta de la tobera.

El objetivo de esto es establecer los límites de presión bajo los que se encuentra el motor, ya que es crítico que este opere dentro de estos límites de presión de diseño. De lo contrario:

- Si la presión es muy alta se corre el riesgo de explosión. Lo que usualmente se hace para establecer un límite de operación estable y seguro es aumentar el área de la garganta de la tobera.
- Si la presión es baja se pierde eficiencia, cuya reducción se hace notoria en el empuje (menor empuje). Lo usual para corregir esto, es reducir el área de la garganta de la tobera.

Queda claro entonces, que debido a la relación existente entre el rendimiento, eficiencia y seguridad que establecen los límites de presión y la reducción o aumento del área de la garganta de la tobera se debe llegar a un compromiso en la cual el diseño satisfaga todos los requerimientos a un nivel aceptable, esto se traduce en encontrar un punto de diseño.

2.3.2.1. Cálculo del valor de empuje

Es importante tener una estimación inicial del empuje, para esto es necesario haber medido la presión; si se mide solo el valor de la presión, es posible con la ecuación 3, estimar el empuje asumiendo un valor de rendimiento de la tobera C_F (coeficiente de empuje).

$$E = P_C A_t C_F \quad (3)$$

Donde:

- E: Empuje [N]
- P_C : Presión de la cámara de combustión [MPa]
- A_t : Área de la garganta de la tobera [m^2]
- C_F : Coeficiente de empuje (adimensional)

Los valores típicos de C_F para los propulsores a base de azúcares y nitrato de potasio (KNO_3), más conocidos como (“Candy”), que usualmente se utilizan en cohetaría experimental son:

- Motor cohete con tobera de buen rendimiento: 1,4 a 1,5
- Motor cohete con tobera de rendimiento medio: 1,3 a 1,4
- Motor cohete con tobera de bajo rendimiento: 1,0 a 1,3

En caso de registrar el valor de "Empuje vs Tiempo" con la ecuación N° 3 se obtiene un valor de empuje instantáneo. Si se desea se puede promediar todos los valores instantáneos del empuje y así obtener un valor promedio de empuje. También sumando el resultado de multiplicar el empuje por el intervalo de tiempo en el cual este se registra se obtiene el empuje total.

2.3.3. Sistemas modulares

Por último y como se ha mencionado con anterioridad, a medida que avanzamos en el mejoramiento de los sistemas individuales que componen un banco de pruebas obtenemos diseños más complejos, que a la postre representarán mejor eficiencia en cuanto a la medida de los parámetros de interés. Uno de los conceptos aplicables a esto es el diseño de bancos de pruebas de tipo modular, esto se refiere a que el sistema se diseña de tal forma que funcione para cierto tipo de motores y con algunos cambios específicos en uno o varios de los sistemas que componen el banco de pruebas, sirvan también para otro rango de motores. Una de las ventajas de estos sistemas consiste en eliminar costos, cantidad de material y trabajo, al ser posible probar un amplio rango de mecanismos con el mismo componente.

A continuación, algunos ejemplos de bancos de prueba modulares, inicialmente concebidos para el tipo Tango, que es una serie de motores concebida para impulsar a los cohetes EMI, utilizan combustible sólido a base de Dextrosa y Nitrato de Potasio, en la figura 7 se observa un ejemplo de esta serie, que luego se modificaron para usar en motores tipo Tola, que corresponde un tipo de motor de mayores dimensiones que el tipo Tango. Los siguientes ejemplos están basados en pruebas hechas a motores con propelente sólido, para configuraciones de motores de propelente líquido e híbrido tanto la configuración de motor como de banco de prueba puede variar.



Figura 7 Motores de la serie Tango [6]

2.3.3.1. Ejemplos de bancos de pruebas modulares para motores de propulsante sólido

La configuración es motor vertical tobera hacia “arriba”, Figura 8. Está montado un motor de la serie Tango, listo para llevar a cabo el ensayo, con el sistema de ignición completamente montado. Consta de una base en H con una columna para soporte y guía del motor. La presión se mide directamente con un manómetro a través de una línea con fluido hidráulico. El empuje se mide transformando la fuerza en presión mediante un pistón, en la parte superior se tiene una manija para facilitar su transporte. Se observan las superficies de apoyo que son regulables e intercambiables; ahí donde van fijadas permite tomar la base para ponerlo en una base que pueda ofrecer un mayor apoyo.



Figura 8 Banco de ensayo para motores cohete No. 1. [6]

El banco de pruebas para motores del tipo Tango se modifica para usar con motor tipo Tola. La configuración es un motor vertical, con la tobera hacia "arriba" Figura 9. En el caso que se presenta se ve el banco de pruebas para un motor Tango, luego cambiando la torre de guía del motor (para acomodar al motor Tola que es de mayor tamaño), agregando unas patas de soporte (para tener una mayor base de apoyo) y cambiando el pistón del medidor de empuje (para adecuar el manómetro existente al nuevo rango de trabajo) tengo un banco de pruebas para el motor más grande.



Figura 9 Banco de ensayo de motores cohete No. 2. [6]

Una de las ventajas que representa hacer los bancos de prueba modulares es la posibilidad de hacerlos a su vez desarmables. Esto facilitará el transporte y ayudará a reducir el espacio necesario para guardarlos. Esta configuración se muestra en la figura 10.



Figura 10 Banco de ensayo de motores cohete No. 3. Desarmado. [6]

2.3.3.2. Ejemplo de banco de prueba modular para motores híbridos

Una de las ventajas más significativas de diseñar y construir un sistema modular consiste en la capacidad de ajustar las características para permitir la prueba de motores tanto de combustibles sólidos como líquidos, figura 11. Esto representa un rango de operación bastante amplio para el banco de pruebas, por su versatilidad. Claro está que el diseño y la posterior construcción de este representa nuevos desafíos, se debe llegar de igual forma a una solución de compromiso entre todos los factores asociados a la consecución de los objetivos para los cuales se diseñan, primando en ellos la seguridad.



Figura 11 Banco de ensayo de motores cohete híbridos No. 3. [6]

2.4. Clasificación de los motores cohete

Los motores en cohetaría experimental pueden ser clasificados dependiendo del tipo de propelente que utilizan o según la fuerza de su impulso.

2.4.1. Según el tipo de propelente

Pueden ser de propelentes sólidos, líquidos o híbridos.

2.4.1.1. Sólidos

Son motores de cohetaría experimental cuyo propelente es de composición sólida, figura 12. Formados por combustibles sólidos y agente oxidante para producir empuje.

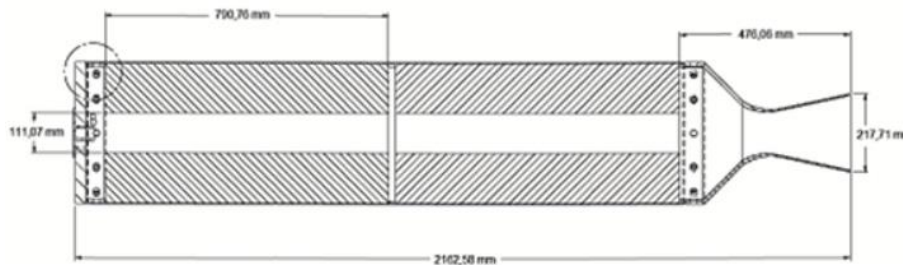


Figura 12 Motor de propelente sólido [10]

Están formados por una carcasa, una tobera, la carga del propulsor o veta y el encendedor; y su diseño depende del impulso total requerido, lo que determina la masa de combustible y oxidante necesario. La carga del propulsor o veta se comporta como una masa sólida, que tiene una combustión predecible; la cual nos da una idea de cómo debe de ser el área de la carcasa y la presión que va a tener que soportar, en función de los gases de combustión y del orificio de la tobera.

El empuje es producido por el aumento de energía térmica debida a la combustión del propelente, esta energía térmica es convertida en energía cinética, y su duración depende del espesor del grano del combustible. En este tipo de motores, la mayor parte de su masa está formada por combustible utilizable y aunque tienen menos riesgos que los motores de combustible líquido y pueden ser almacenados y utilizados más adelante, su eficiencia es más baja y no pueden detenerse.

A continuación, propelentes sólidos comúnmente utilizados en cohetes experimentales:

- Pólvoras negras (KNO₃/Carbón/Azufre)

Están formados por pólvoras comprimidas, las cuales tienen un impulso bajo, de alrededor de 80s y son poco eficientes; son baratos y fáciles de hacer, su velocidad de combustión depende de la composición exacta y de las condiciones de funcionamiento, pueden romperse, ya que normalmente hay imperfecciones, y hacer que el cohete explote; y normalmente solo se usan para motores de menos de 40N·s. [8]

- Micrograno (Zinc/Azufre)

Están formados por pólvoras muy finas y compactadas de zinc y azufre que se comprimen dentro de la cámara de combustión. Este tipo de motores tienen tiempos de operación cortos, lo que lleva a grandes aceleraciones y velocidades de combustión de alrededor de 2 m/s, dichas aceleraciones pueden llegar a ser incontrolables por ser tan grandes, de manera que hay que diseñar el motor para que pueda soportar grandes aceleraciones y presiones; tienen un bajo impulso específico, y cuando se encienden no se quema ni se oxida, sino que se hace una reducción rápida por la ausencia de oxígeno, que acaba generando grandes cantidades de gases de color verde y amarillo, lo cual proporciona el empuje. Estos motores solo se utilizan en cohetes experimentales por ser relativamente inestables. [8]

- Candy

Están formados por una fusión térmica de combustible y oxidante, donde normalmente se usa como oxidante el nitrato de potasio y como combustible se usa un azúcar, el cual puede ser dextrosa anhidra, sorbitol, sucrosa o mono hidrato de dextrosa. Este tipo de motor tiene un impulso específico bajo, de alrededor de 130 s, y por esto solo se usan en cohetes amateur, además de porque son seguros de elaborar y son eficientes para motores de hasta clase K; como inconvenientes tienen que el grano puede quebrarse y hacer que el cohete explote, que se funden a temperaturas altas y que no son fáciles de encender. [8]

- Propelente de doble base

Están formados por dos mono propelentes combustibles, donde existe una diferencia entre la

energía generada por uno y otro, que sirve para estabilizar. Se usan en aplicaciones donde se necesita muy poco humo y un rendimiento alto, con un impulso específico de alrededor de 235 s; si se quisiese aumentar el impulso específico, se tendría que añadir un combustible metálico, y se conseguiría un impulso específico de hasta 250 s, pero el humo se volvería más opaco. Algunos de los propelentes pertenecientes a esta conjunto son: JDN/EDB, CDB o CMCDDB. [11]

- **Propelentes compuestos**

Están formados por un oxidante en polvo y como combustible usan metal en polvo, que se mezclan y se inmovilizan con goma. Normalmente esta compuestos por nitrato de amonio y aluminio como combustible, teniendo un rendimiento medio y un impulso específico de 265 s; estos son de fácil fabricación y coste medio, y se usan en cohetes espaciales, militares y en cohetería amateur. [8]

- **Propelentes compuestos de alta energía**

Están formados por una mezcla estándar de combustible híbrido, normalmente APCP, al cual después se le añade un explosivo de alta energía, que está en forma de pequeños cristales RDX o HMX. Los impulsos específicos conseguidos son de alrededor de 275s; y su aplicación es limitada debido a su alta posibilidad de explotar. [8]

2.4.1.2. Líquidos

Los motores del tipo líquido son aquellos que están formados por un combustible en forma líquida. Pueden ser mono-propelentes, bi-propelentes si usan un combustible líquido y un oxidante líquido, como hidrógeno y oxígeno líquidos, o tri-propelentes. El empuje se consigue por la combustión del propelente, el cual desprende calor que se transforma en energía cinética. Este tipo de motor tiene una serie de ventajas y desventajas.

Ventajas:

- Son totalmente regulables
- Tienen un mayor impulso específico que los sólidos y los híbridos.
- Tienen mayor eficiencia de tanque, ya que normalmente tienen un propelente con una densidad parecida a la del agua.

- Requieren poca presión
- Esta combinación de baja presión y densidad parecida a la del agua, hace que el tanque tenga bajo peso.
- Para la inyección del carburante en la cámara de combustión de éste, la presión ha de ser mayor que en la cámara de los inyectores; esto se logra con una bomba.
- Las bombas usadas son usualmente turbobombas debido a su alta potencia, bajo peso y gran rendimiento.
- Se pueden regular en tiempo real ya que tienen un buen control sobre la relación de mezcla, además de que se pueden apagar.
- Es posible usar sistemas de refrigeración regenerativa, utilizando el combustible o el oxidante para enfriar la cámara de combustión y la boquilla.
- Son reutilizables, lo que permite hacer pruebas.

Desventajas:

- El centro de masa está muy atrás, porque el propulsor pesa mucho.
- Si el centro de masas se acerca demasiado al centro de resistencia, se puede perder el control.
- Las paredes de los depósitos de carburante han de garantizar la presión manométrica positiva en todo momento para evitar el colapso del tanque.
- Puede haber agitación dentro del tanque, sobre todo al final de la combustión, y esto puede hacer que los gases sean absorbidos por el motor o la bomba.
- Si se escapa algo de líquido puede formarse una mezcla explosiva.
- Las turbobombas son complicadas de construir y pueden sufrir roturas.
- Requieren más preparación antes del lanzamiento que los otros tipos de motores de cohetes.
- Son menos prácticos.
- Los combustibles que usan pueden causar hielo en el exterior del tanque, el cual puede caer y dañar al vehículo.

2.4.1.3. Híbridos

Los motores del tipo híbrido son aquellos que usan un combustible en estado sólido y un

oxidante en estado líquido. El combustible sólido se encuentra en una cámara de combustión bajo la forma de un cilindro con un canal o canales con una configuración geométrica adecuada al grano del combustible.

El encendido se da cuando el oxidante líquido pasa a la precámara de encendido a través de un conducto que es regulado con una válvula, una vez allí en lugar de mezclarse con el combustible líquido, el oxidante pasa a través de un canal, el cual está rodeado por el combustible sólido y allí se produce el encendido; la combustión se produce en el canal, dado que la liberación de calor por parte de los compuestos químicos se transfiere al grano y lo abla, de esta forma se incorpora el combustible necesario para producir la combustión. Una vez iniciada la combustión, parte del calor generado se transmite desde el gas al sólido por radiación, conducción y convección; después de esto los gases salen por la tobera.

Los motores híbridos tienen la ventaja de que reducen el riesgo de explosión, ya que una grieta en el grano combustible no lleva a una explosión inmediata como en los sólidos, esto es debido a que la reacción está gobernada por el caudal de inyección oxidante; también se pueden apagar y encender varias veces y de forma fácil, se puede regular su empuje de forma sencilla, graduando el flujo del oxidante; tienen mucha versatilidad; tienen impulsos específicos del orden de los 210 – 230 s, lo cual hace que se encuentren en un valor intermedio entre sólidos y líquidos; expulsan gases a gran velocidad y son muy seguros ya que usan combustibles sólidos.

2.4.2. Según la fuerza de impulso

Dependiendo del rango de impulso del motor se clasifican nombrándolos con una serie de letras y números.

2.4.2.1. La letra

La letra nos indica el rango total del impulso del motor medido en N·s. Estas van desde la “A”, hasta la “O”; siendo los de categoría “A” los menos potentes, teniendo las versiones 1/2, 1/4 y 1/8-A, y los de categoría “O” los más potentes; cada letra dobla el impulso de la letra anterior. En la tabla 1 se observan las características de impulso con relación al tipo de motor.

Tabla	Impulso total
A	1.26 – 2.50 N.s
B	2.51 – 5.00 N.s
C	5.01 – 10.00 N.s
D	10.01 – 20.00 N.s
E	20.01 – 40.00 N.s
F	40.01 – 80.00 N.s
G	80.01 – 160.00 N.s
H	160.01 – 320.00 N.s
I	320.01 – 640.00 N.s
J	640.01 – 1280.00 N.s
K	1280.01 – 2560.00 N.s
L	2560.01 – 5120.00 N.s
M	5120.01 – 10240.00 N.s
N	10240.01 – 20480.00 N.s
O	20480.01 – 40960.00 N.s

Tabla 1 clasificación de motores por letra [8]

2.4.2.2. El número

Primer numero

El primer número después de la letra nos indica el empuje medio del motor encendido en Newtons. Si tienen la misma letra, un número mayor nos indica un tiempo inferior de combustión.

Ejemplo: D10

Segundo número

El segundo número nos indica el retraso en segundos entre el final de la fase de empuje y la carga de eyección. Si hay una “P”, esto nos indica que el motor está conectado y en este caso no hay carga de eyección; este tipo de motor conectado se utiliza en los cohetes cuando no hay carga de eyección; este tipo de motor conectado se utiliza en los cohetes cuando no es necesario incorporar un sistema de recuperación, como es el caso de cohetes pequeños; o en los cohetes grandes, donde los altímetros electrónicos o temporizadores se utilizan para provocar el despliegue del sistema de recuperación.

Ejemplo: D10-3

Esta nomenclatura indica que se trata de un motor con un impulso total “D”, es decir, un impulso que está en un rango de 10.01-20.00 N.s, con un empuje medio de 10N y un retraso de 3s desde que se acaba el combustible hasta que se lanza la carga de eyección.

2.4.2.3. Longitudes

- Las clases A, B y C estándar tienen 18 mm de diámetro y 70 mm de largo.
- Las clases C y D más largas de pólvoras negras tienen un diámetro de 24 mm y 70 mm de largo.
- La clase E tiene 24 mm de diámetro y 95 mm de largo.
- Hay algunos motores de clase F y G, de un solo uso, con un diámetro de 24 mm.
- Los motores más potentes, es decir de clase G en adelante, pueden tener 38 mm, 54 mm, 75 mm y hasta 98 mm de diámetro.

2.5. Sistemas de adquisición de datos

Diferentes parámetros son medidos en una prueba del rendimiento de un motor cohete, por esta razón es importante contar con un sistema integrado de adquisición de datos en los cuales los valores como función del tiempo de la presión en la cámara de combustión y el empuje generado serán medidos, esto permitirá hacer un análisis objetivo del rendimiento del motor. Se evaluarán dos sistemas de adquisición de datos, uno para realizar la respectiva medida de la presión y el otro para la medida del empuje generado. Estos son:

2.5.1. Sistemas de medición de presión

Para realizar la medida de la presión en la cámara de combustión de los motores cohete se pueden usar varios sistemas, siendo los de mayor aplicación los siguientes tipos:

- Manómetros
- Transductores de presión

2.5.1.1. Manómetros

El sistema consiste en una toma de presión unida a un manómetro mediante una tubería con líquido, figura 13. Este líquido es de alto punto de ebullición y sirve para hacer un sello hidráulico que evita el contacto de los gases de combustión con los delicados materiales del manómetro. Usualmente es aceite, o fluido hidráulico (que es usualmente el más usado).

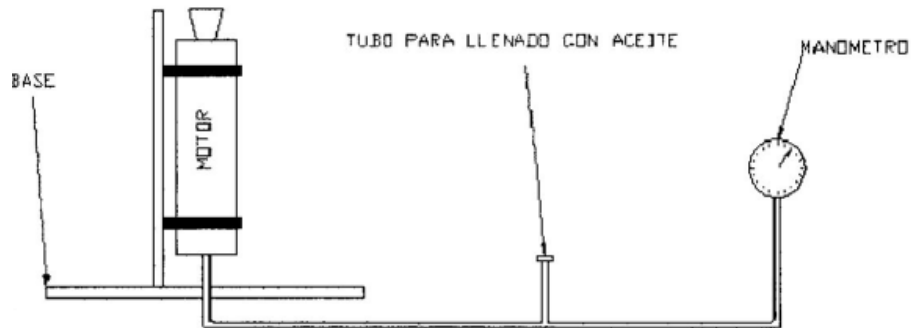


Figura 13 Esquema de un sistema de medición de presión con manómetro [6]

La idea de describir estos sistemas es dejar en claro sus beneficios, capacidades y por lo tanto desventajas, a continuación, veremos algunas de estas características.

Algunas ventajas son:

- Es un sistema sencillo
- Sistema de bajo costo
- Es un sistema de precisión aceptable

Algunas desventajas son:

- Requiere tener un sistema de registro visual de los valores del manómetro.
- Requiere algún tipo de calibración si lo que se desean son valores exactos de presión.

2.5.1.2. Transductor de presión electrónico

Es un sistema que consta de un transductor electrónico, un conversor analógico-digital y un sistema que almacena la información, de igual forma es conveniente también tener un sistema de calibración, figura 14. Al igual que con la celda de carga conviene hacer la calibración antes de realizar el ensayo para evitar errores debido a las variaciones de la temperatura.

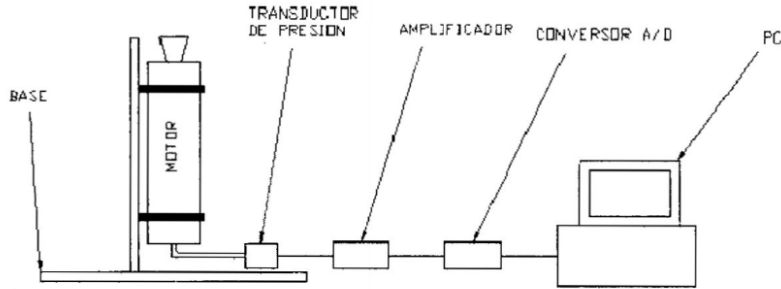


Figura 14 Esquema de un sistema de medición de empuje con transductor de presión [6]

De hecho, este es el sistema que se ha impuesto en los bancos de prueba profesionales y es comúnmente usado en coherencia experimental. Así, teniendo un conversor analógico-digital de varios canales y una sola notebook, permite tener valores de empuje versus tiempo y presión versus tiempo, además de permitir registrar más parámetros de ensayo.

Algunas ventajas son:

- Técnicamente es el que da las mejores prestaciones, en cuanto a precisión.

Algunas desventajas son:

- Es un sistema de mayor coste económico.
- Requiere un sistema de protección del transductor para no sobrepasar su presión máxima de trabajo, en particular en caso de explosión del motor. En general la protección de este es utilizar transductores sobredimensionados generosamente. Ejemplo típico: para presiones de trabajo máximas esperadas de 10 MPa se utilizan transductores con rango de operación de 35 MPa como mínimo.

2.5.2. Sistemas de medición de empuje

Al igual que con la presión se tienen sistemas de medición de empuje que se clasifican en las siguientes categorías.

- Medición de empuje con sistema elástico o peso
- Medición de empuje con sistema de manómetro y pistón
- Medición de empuje con sistema de celda de carga

2.5.2.1. Medición de empuje con sistema elástico o peso

Sirve en general para registrar empuje de motores de poca potencia, del orden de hasta 10-20N. Se puede hacer simplemente con un resorte que se calibra con pesas. O mediante un sistema de palanca que actúa sobre un peso, tal como si fuese una balanza. También se puede utilizar un fleje elástico. Esta configuración se muestra en la figura 15.

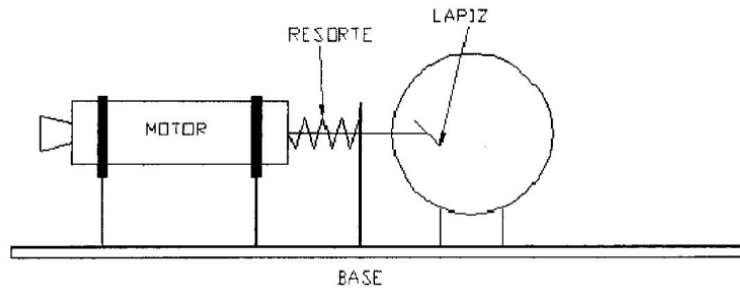


Figura 15 Esquema de un sistema de medición de empuje con resorte [6]

2.5.2.2. Medición de empuje con sistema de manómetro y pistón

Se puede hacer con un pistón donde actúa la fuerza de empuje del motor; la fuerza se convierte en presión la cual se mide mediante un manómetro, figura 16. El registro se realiza por ejemplo con una cámara de vídeo.

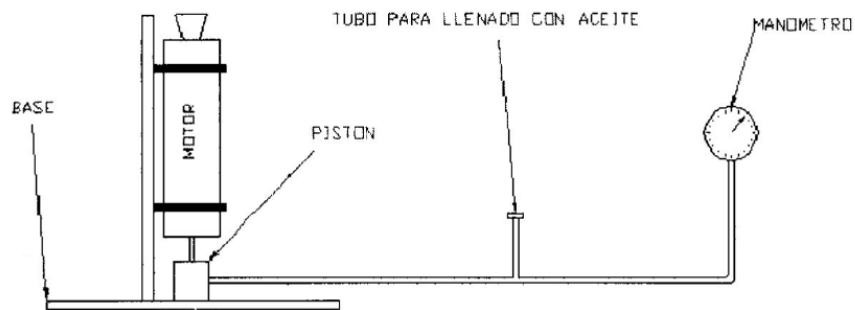


Figura 16 Esquema de un sistema de medición de empuje con sistema de manómetro y pistón [6]

2.5.2.3. Medición de empuje con sistema de celda de carga

El sistema está integrado por una celda de carga, un amplificador de la celda de carga, un conversor analógico- digital, un sistema que almacena la información (que puede ser un data-logger o una notebook) y un sistema de calibración, figura 17. La calibración conviene

hacerla antes de cada ensayo para evitar problemas de errores por variaciones de temperatura, entre otros. Es el sistema que se impuso en los bancos de prueba profesionales y es muy usado en la cohetería experimental.

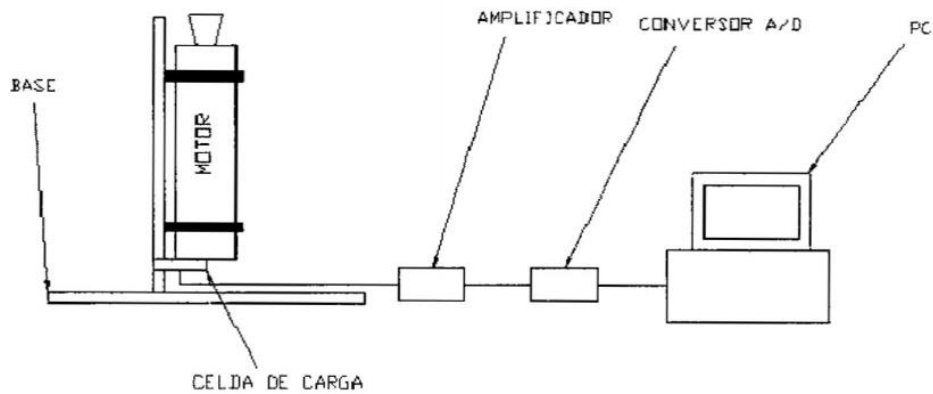


Figura 17 Esquema de un sistema de medición de empuje con sistema de celda de carga [6]

Ventajas

- Técnicamente es el que puede dar las mejores prestaciones.

Desventajas

- Este sistema es el de mayor costo.
- Requiere un sistema de protección de la celda de carga para no sobrepasar su carga de máxima. Lo típico es utilizar topes mecánicos que limitan la deformación de la celda de carga.

La figura 18, muestra otra configuración de banco de pruebas con sistema de medición de celda de carga.



Figura 18 Banco de pruebas con sistema de medición de celda de carga [6]

2.5.3. Sistemas de medición de presión y empuje

Lo usual es medir presión y empuje en función del tiempo. Para ello basta combinar los sistemas de medición de presión y empuje mencionados anteriormente. En general lo usual es, ordenado de lo más sencillo y barato, a lo más caro y complejo. Por lo que la secuencia lógica que se sigue en el desarrollo de este mecanismo en función de esos parámetros es:

- Motor enterrado en tierra o sujeto a una base sencilla.
- Banco de pruebas con resorte.
- Banco de pruebas con manómetros y registro de video.
- Banco de pruebas con celda de carga y transductor de presión.

2.5.3.1. Sistema de medición con celda de carga y transductor de presión

Las partes que lo integran, tal como se explicara anteriormente, son:

- Sensor del parámetro a medir, por ejemplo, transductor de presión para la presión de cámara de combustión, celda de carga para medición de empuje, termocupla para medición de temperatura, etc.
- Amplificador, su necesidad depende del nivel de tensión de salida del sensor respecto al conversor analógico-digital. Su función es elevar el nivel de salida del sensor al valor de tensión de trabajo del conversor analógico-digital.
- Conversor analógico-digital (conversor A/D). Su función es pasar la información que entrega el sensor al sistema digital.
- Notebook o computadora personal donde está el programa que registra los valores obtenidos y luego los presenta para su análisis.

En las figuras 19 a 22 se muestran el sensor de presión, celda de carga, amplificador conversor A/D y el sistema de toma de datos amplificador conversor A/D completo, respectivamente.



Figura 19 Sensor de presión [6]



Figura 20 Celda de carga [6]



Figura 21 Amplificador, conversor A/D [6]



Figura 22 Amplificador, conversor A/D, Notebook [6]

2.5.4. Sistemas de medición y registro

Los sistemas de medición y registro anteriormente mencionados funcionan muy bien, sin embargo, es importante adentrarse en nuevos sistemas que ofrezcan prestaciones iguales o mejores en tanto sean posibles. Otro sistema de medición y registro conocido es el potenciómetro, el cual consiste básicamente en ubicar el motor cohete sobre una base basculante y que se eleva al generar empuje.

- Si se desea experimentar con nuevos diseños de sistemas de medición y registro para bancos de prueba, cabe recordar que lo peor que se puede hacer es no intentarlo.
- Si se desea tener un banco de prueba con un sistema de medición que le sirva y poder avanzar en el desarrollo de los motores cohete no pierda tiempo y esfuerzo en diseños nuevos del tipo “innovador” o con “cambios radicales”. Use lo conocido.
- Para los sistemas de registro se pueden aplicar sistemas de registro sobre papel. En general, han quedado obsoletos. Se aplican a los casos de motores chicos de bajas potencias o donde esta se puede aplicar la política de “mejor tener algo que nada”.

2.6. Sitio físico donde realizar las pruebas

Los ensayos en bancos de prueba son por su propia naturaleza los que presentan mayores riesgos de explosión. Se debe seleccionar el sitio de prueba y ubicación con sumo cuidado y

respetar las normas de seguridad el máximo.

Lo ideal es contar con un lugar apartado y con alguna forma de reparo natural, como por ejemplo: zanjas, colinas, rocas grandes, etc. La mejor forma de tener condiciones seguras es estando lejos. No olvidar de proteger los equipos de registro. Prever que en caso de una explosión los resultados de esta no dañen a ninguna persona ni bienes materiales de nadie.

De ser necesario tener los permisos oficiales para hacer este tipo de pruebas según la legislación en vigencia del lugar donde se realiza. Así también lo necesario para transportar el motor cohete.

2.6.1. Filmación de las pruebas

Es muy útil filmar el ensayo del motor y luego hacer su análisis detallado. Se puede usar filmadoras analógicas, figura 23. Las cuales dan en general una resolución de 33 imágenes por segundo, o digitales que permiten el doble o más de imágenes de alta definición. Actualmente hay cámaras fotográficas digitales que permiten hacer filmaciones breves de 10 a 40 s.



Figura 23 Equipo de registro filmográfico para prueba de motores cohete [6]

2.7. Análisis de resultados obtenidos

Los bancos de prueba se usan para obtener información. La misma se basa en registrar datos antes, durante y después del ensayo. Es importante antes del encendido del motor cohete

registrar todos los datos de pesos y características de lo que se va a ensayar, en particular peso del propulsante y diámetro garganta de la tobera.

Del análisis de los valores registrados durante el ensayo no solamente se obtienen las curvas de "Empuje versus Tiempo" y "Presión de cámara de combustión versus Tiempo" sino también:

- Tiempo de combustión.
- Empuje neto (total).
- Empuje promedio y máximo.
- Impulso específico.
- Presión de cámara de combustión promedio y valor máximo.
- Retardo en el inicio de la combustión
- Flujo de masa
- Coeficiente de empuje

El cálculo de estos se da en los puntos anteriores. Luego del ensayo, y aparte del análisis de los valores registrados, se realiza un "análisis post-encendido" donde se determina:

- Restos de propulsante sin quemar.
- Erosión en las distintas partes de la tobera.
- Restos de residuos de la combustión del propulsante.
- Indicaciones de sobre-temperatura en la cámara de combustión.
- Peso de las distintas partes.
- Deterioro de componentes que conforman el motor cohete.
- Deterioro de los sellos en la cámara de combustión.
- Daños en la estructura del motor.

2.8. Seguridad

Algunos detalles relativos a la seguridad son en particular:

- Contar con medios para extinguir posibles incendios.

- Tener medios de protección personal, en particular guantes para tocar cosas calientes.
- Cuidar del medio ambiente. No dejar basura.
- Verificar que el humo y ruido que se genera no afecten a las personas ni perturbe a la fauna local.
- Estar lo suficientemente alejado del banco de pruebas para no ser alcanzado por esquirlas en caso de explosión.
- Considere siempre la posibilidad de una explosión y prevea las medidas para reducir los posibles daños.

2.9. Reproducibilidad

Se insiste en recomendar probar los motores en un banco de pruebas, para no tener "sorpresas" desagradables al momento de realizar un lanzamiento con un cohete. Sin embargo, un ensayo estático exitoso no es garantía de funcionamiento del motor cohete en vuelo.

- Falta de reproducibilidad en la fabricación del motor. Tanto por usar materiales distintos como por un proceso de fabricación diferente. La sugerencia es tratar de mantener procesos de preparación de propulsantes que estén escritos y que tengan todos los parámetros controlados. O sea "Control de Calidad". Controlar la calidad del propulsante (densidad correcta, velocidad de combustión a presión atmosférica igual en todas las partidas), la calidad de toda la parte mecánica (hacer siempre prueba hidráulica del tubo motor completo).
- Condiciones de trabajo del motor diferentes a las de la prueba. Ejemplos típicos son diferentes temperaturas iniciales entre el ensayo y las condiciones para vuelo, tener un propulsante envejecido. Aquí la sugerencia es mantener las mismas condiciones de prueba que las de aplicación.
- Condiciones dinámicas sobre el motor que no están presentes en un ensayo estático. Aquí la sugerencia es prever en lo posible las mismas y eventualmente hacer algún ensayo en vuelo con un cohete sencillo que reproduzca el proyecto final. En la

práctica lo que se realiza es mantener un control de calidad de lo que se hace y hacer varios vuelos para tener confianza en el funcionamiento del motor. La práctica de la coherencia experimental permite "ineficiencias" al tener mayores márgenes de seguridad, o sea utilizar tubos motores con mayores presiones de rotura. Esto da un mayor peso que se compensa con tener un motor un poco más potente pero el beneficio es reducir el riesgo de una explosión.

3. DISEÑO PRELIMINAR DEL BANCO DE PRUEBAS

3.1. Justificación del diseño

Teniendo en cuenta los diferentes tipos de bancos de pruebas analizados con anterioridad, de los cuales se logró recopilar información importante en cuenta a sus características físicas y estructurales, y a las condiciones específicas de operación establecidas entre otras, se optó por el diseño de un banco de pruebas de estructura semi-modular. Selección llevaba a cabo con criterios basados en la investigación hecha anteriormente, y conocimiento previo que ayudaron a determinar para este caso, que la mejor opción con vistas a obtener el diseño que mejor se adapte a las necesidades y requerimientos impuestos es este concepto de banco de pruebas en particular.

3.2. Características principales de diseño

Este banco de pruebas contará con un rango de operación en el cual se encuentran los motores cohete a nivel aficionado o de cohería experimental, entre estos motores se tienen los motores clase G, H, I, J, K, L y todo motor cohete que no sobrepase los 2318 N de empuje y los 2500 psi de presión.

Los datos obtenidos (valores de empuje, presión en la cámara de combustión, entre otros) dependerán del tipo de motor utilizado, tipo de propelente y sistema de adquisición de datos utilizado, para este caso se definió conforme la etapa de investigación que el sistema de adquisición de datos estaría compuesto por una celda de carga y un transductor de presión, que serán los encargados de sensar el empuje obtenido del motor cohete y la presión en la cámara de combustión respectivamente.

Habiendo establecido el tipo de motores cohete que se probarán, se hace necesario tener información más objetiva respecto a ellos como lo son características geométricas y de operación, como la presión y el empuje. En la tabla 2, se adjuntarán las principales características geométricas de éstos.

Tipo	Diámetro (cm)	Longitud cuerpo (cm)	Longitud tobera (cm)	Longitud total (cm)
Motor G	3,0	15,7	7,1	22,9
Motor H	3,8	21,2	6,8	28,0
Motor I	4,4	22,9	12,1	34,9
Motor J	4,8	36,8	6,2	43,0
Motor K	6,4	48,4	10,0	58,4
Motor L	7,4	61,0	8,4	69,4

Tabla 2 Dimensiones motores cohete [8]

La obtención de estos datos como se ha mencionado con anterioridad servirá para hacer análisis del rendimiento y establecer mejoras en el diseño inicial de cada uno de ellos y de sus características principales.

Se establecerán las condiciones de empuje máximo permisible y presión máxima en la cámara de combustión, esto se hace en función de los tipos de motores a probar que se han mencionado con anterioridad. En este orden de ideas, el empuje máximo permisible será entonces el del motor tipo L con un valor de 2318 N; y una presión máxima de 7798,0 KPa.

En la tabla 3, se muestran los datos correspondiente a las características de rendimiento operacional de cada uno de los tipos de motor cohete: Altitud, presión y empuje.

Tipo	Altitud (m)	Empuje (N)	Presión (KPa)
Motor G	600,0	1156,6	6881,0
Motor H	900,0	1445,7	7784,2
Motor I	410,0	391,5	2261,5
Motor J	3352,8	1601,4	8273,7
Motor K	1800,0	1739,3	6784,4
Motor L	6096,0	2317,5	7798,0

Tabla 3 Características motores cohete [8]

3.2.1. Selección de material

Al momento de diseñar una estructura que será sometida a distintos tipos de fuerzas o

esfuerzos es importante asegurar en ella, y por ende en el material que la componen, características como rigidez y dureza. Los materiales normalmente utilizados en el diseño y construcción de bancos de prueba son aceros y aluminios, la selección de uno u otro dependerá de las condiciones de operación a las cuales estará sometido, asegurando que las fuerzas generadas en el momento de la prueba no excedan los esfuerzos nominales y máximos de los materiales y por ende la estructura. Algunos de los materiales utilizados, según distintos desarrollos de bancos de prueba llevados a cabo en el país y otros regiones [2] [3] son:

- Acero AISI 1020

Este es un acero al carbono que puede utilizarse en estado cementado, templado y revenido, o simplemente en estado calibrado. Por su contenido de carbono estos aceros se utilizan para la fabricación de piezas estructurales o de maquinaria de mediana resistencia con una gran tenacidad. Es fácilmente soldable con soplete o soldadura con arco. No hay otro material que al mismo tiempo sea tan fuerte, tenaz, tan fácilmente conformable, y tan barato. Los aceros al carbono son aleaciones de hierro con carbón y a menudo un poco de manganeso, níquel y silicio. Los bajos en carbono o aceros “suaves” tienen menos contenido de carbono (por debajo del 0.25%). Son los más económicos de todos los aceros estructurales y se utilizan para armaduras, estructuras en obras civiles, entre otras. En las tablas 4 y 5, muestran características concernientes a su composición química y propiedades mecánicas.

Composición química (%)	
C	0,18-0,23
Mn	0,30-0,60
P	0,04 Max
S	0,05 Max

Tabla 4 Composición química AISI 1020 [12]

Propiedades Mecánicas - Laminado en caliente	
Esfuerzo último	392,3 - 441,3 MPa
Límite de fluencia	265 MPa
Elongación	20%
Reducción de área	50%

Maquinabilidad	72%
Dureza (HB)	110-140

Tabla 5 Propiedades mecánicas AISI 1020 [12]

- Acero ASTM A-36

Es un acero comúnmente utilizado en ingeniería, ampliamente recomendable para diseñar y construir estructuras y equipo menos pesado. El acero estructural A-36 se produce bajo la especificación ASTM A-36, que le permite abarcar perfiles moldeados en acero al carbono, placas y barras de calidad estructural para componentes de distintos propósitos. En las tablas 6 y 7, se verán características concernientes a su composición química y mecánica, del acero en cuestión.

Composición química (%)	
C	0,26
Si	0,4
Mn	No requiere
P	0,04
S	0,05
Cu	0,2

Tabla 6 Composición química ASTM-A36 [12]

Propiedades mecánicas	
Esfuerzo último	400 MPa
Límite de fluencia	250 MPa
Elongación	23%
Dureza (HB)	119-162

Tabla 7 Propiedades mecánicas ASTM-A36 [12]

- Aluminio

El aluminio es el material más ampliamente utilizado tanto en la industria como en muchas otras aplicaciones. Su buen comportamiento en cuanto a resistencia mecánica de muchas de sus aleaciones, su alta conductividad térmica y eléctrica, su durabilidad (el aluminio es estable al aire) y resistencia a la corrosión (con un correcto tratamiento superficial es resistente tanto al agua de mar, como a muchas soluciones acuosas y otros agentes químicos), hacen de este material el ideal para aplicaciones estructurales que puedan verse expuestas.

El aluminio puro prácticamente no tiene aplicación, dado que se trata de un material blando y de poca resistencia mecánica. Sin embargo, aleados con otros elementos permite aumentar su resistencia y adquirir otras cualidades, que varían según la naturaleza de los aleantes utilizados.

Sera de interés entonces según la designación interpuesta por AS (Aluminum Association) para las diferentes series de aluminio dependiendo del tipo de elementos aleantes, las aleaciones serie 6, específicamente la aleación de aluminio **6061-T6** cuyos elementos aleantes principales son el magnesio y el silicio. Es utilizada para perfiles y estructuras en general. En las tablas 8 y 9, se verán características concernientes a su composición química y mecánica, del acero en cuestión

Composición química (%)	
Si	0,40-0,8
Fe	0,7
Cu	0,15-0,40
Mn	0,15
Mg	0,8-1,2
Cr	0,04-0,35
Zn	0,25
Ti	0,15
Otros (cada uno)	0,05
Otros (en total)	0,15
Aluminio	Resto

Tabla 8 Composición química aluminio [12]

Propiedades mecánicas	
Esfuerzo último	280 MPa
Límite de fluencia	240 MPa
Elongación	8%
Dureza (HB)	119-162

Tabla 9 Propiedades mecánicas aluminio [12]

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumple el material. Por tanto, no se deben considerar como valores estrictos en etapas de diseño y por tal motivo debe asegurarse un factor de seguridad.

Se tienen en principio 3 materiales seleccionados basándose en la información recolectada de trabajos desarrollados al respecto. Para seleccionar entonces el que mejor se acople a los requerimientos, se hará una matriz de selección ponderada donde los parámetros de mayor peso serán las propiedades mecánicas anteriormente mostradas: Esfuerzo último, límite de fluencia, elongación y dureza. Se justifica la selección de estos parámetros como preponderantes debido a las características de rigidez que se desea tenga la estructura del banco de pruebas.

La matriz de selección ponderada se construye con la información recolectada de los materiales en la cual a cada uno de los parámetros recibe un peso de acuerdo con el que se considere sea más importante, el rango de pesos se establece entre 1 y 10, siendo 10 el de mejor rendimiento del factor, y 1 el de menor. Así, a cada uno de los materiales preseleccionados se le ponderó de acuerdo con los valores de sus propiedades mecánicas. La tabla 10 muestra la matriz de selección ponderada.

Descripción	Acero AISI 1020		Acero ASTM- A36		Aluminio 6061-T6	
Esfuerzo ultimo (MPa)	441,3	10,00	400	9,06	280	5,09
Límite de fluencia (MPa)	265	10,00	250	9,43	240	9,05
Elongación (%)	20	8,69	23	10,00	8	3,47
Dureza (HB)	140	8,64	120	7,40	162	10,00
		37,33		35,89		27,61

Tabla 10 Matriz de selección ponderada [13]

Después de realizar el análisis de los respectivos materiales seleccionados y evaluados en la matriz de la tabla 10, y de los resultados que esta arroja se decide optar, para el diseño de la estructura del banco de pruebas, por el acero de bajo carbono **AISI 1020** debido a sus propiedades mecánicas y características de conformabilidad, teniendo en cuenta también la facilidad de adquisición, el costo, y que éste cumple con los requerimientos establecidos.

3.2.2. Análisis de fuerzas y factor de seguridad

Dadas las características de los diferentes tipos de motores que se espera puedan ser probados en el banco de pruebas, se ha decidido establecer un límite de esfuerzo máximo permisible en función del máximo empuje disponible entre la gama de motores anteriormente expuesta, siendo así el motor L el que mejores prestaciones tiene con un empuje de 2318 N, lo que equivale aproximadamente a 236,32 Kg, y cuyo máximo peso no debe superar los 50.98 Kg lo que equivale a 500 N aproximadamente. Con esta consideración, el diseño de la estructura deberá ser concebida para que soporte en sus puntos más críticos el valor de empuje multiplicado por un factor de seguridad mínimo de 1.5, factor que establecerá condiciones de seguridad en las pruebas.

3.3. Proceso de diseño

El proceso de diseño empieza entonces con una vista general de diferentes tipos de bancos de pruebas que fueron preseleccionados basándose en la investigación previamente realizada, en los cuales analizando ventajas, desventajas y facilidad de diseño, ayudarán a crear una idea inicial del diseño que en función de los requerimientos anteriormente planteados se esperaría dé el mejor desempeño para el presente proyecto y sus objetivos.



Figura 24 Tipo horizontal y vertical [14]

En la figura 24 se muestra una forma simple y sencilla de banco de pruebas, posee una estructura que puede tener una disposición tanto horizontal como vertical, esto representa ventajas desde el punto de vista operativo ya que dependiendo de la fuerza de empuje generada será necesario limitar los grados de libertad, y por tanto, variar la disposición de acuerdo con los requerimientos de la prueba en específico. Posee un sistema de sujeción gradual a lo largo del motor, una superficie rectangular compuesta por 4 perfiles, y en el medio de ella un perfil en U en el que está ubicada la celda de carga, y el transductor de presión, el cual es el sistema electrónico encargado de la medición del empuje generado por el motor cohete y la presión en la cámara de combustión respectivamente. Algunas de estas características serán de consideración dentro de la concepción de un diseño preliminar en el presente desarrollo, la disposición horizontal, utilización de perfiles estructurales y sistema de sujeción gradual resultan de interés particular.



Figura 25 Banco de pruebas RMTS. Tipo horizontal [15]

En la figura 25 se muestra un dispositivo para prueba de motores cohete capaz de registrar el tiempo de empuje de motores que generen hasta 220 libras de empuje máximo. El banco de pruebas RMTS, fue fabricado en aluminio 6061-T6, utilizando una placa de 3/4" de espesor para los componentes del chasis principal en el cual se instala el motor cohete. Hace uso de un sistema de adquisición de datos conocido como "DI-158-UP DATAQ instruments", el cual está conformado por una celda de carga de un solo punto (Celtron), capaz de soportar una sobrecarga de empuje de 331 libras, que sensa el empuje del motor, un dispositivo de recepción de señal AGnd ("Ground"), y una fuente de potencia que mediante el dispositivo AGnd transportará las señales hasta un computador con un software de lectura de datos

llamado “WinDaq”. Más información sobre la estructura del banco de pruebas y el sistema de adquisición de datos se puede encontrar en [14] [15]. Este sistema es un buen punto de referencia para el objetivo del presente proyecto, algunas de las ventajas observadas radican en la rigidez y capacidad en cuanto a rango operativo que establece y un sistema de adquisición de datos correspondientemente diseñado. Ahora bien, la robustez de este hace difícil su transporte y ubicación en lugares que no dispongan de amplio espacio. Otra limitación radica en que el sistema por sí solo puede medir el tiempo de empuje, y por ende el empuje, pero es necesario configurar el sistema de adquisición de datos para conseguir medidas de temperatura y presión, lo que implica anexar más sistemas y esto posiblemente altere la disposición del sistema de adquisición en la estructura.



Figura 26 Banco de pruebas. Tipo horizontal [14]



Figura 27 Banco de pruebas tipo horizontal [14]

Las figuras 26 y 27 muestran una configuración de banco de pruebas para motores de

combustible líquido, este tipo particular de estructura es de interés puesto que el empuje generado por estos motores es en muchos casos mayor al de combustibles sólidos [8]. En la figura 26 se observa la celda de carga ubicada en el canal en C de acero. A simple vista es una estructura rudimentaria, pero puesto que su propósito es el de medir empuje no necesita un sistema de recolección de datos complejo. Por otra parte, la estructura se compone de dos canales en C ubicados de forma vertical, y un canal en C ubicado de forma horizontal (en el cual se ubica la celda de carga), por último como se observa en la figura 27, la estructura sobre la que reposa el motor cohete consiste en 4 perfiles estructurales que sostienen una base rectangular sobre la que se soporta el motor cohete. Este sistema si bien su mayor ventaja es el tipo de motor cohete que permite probar, presenta dificultades inherentes a su tamaño y robustez, de igual forma, no se precisa de puntos de anclaje que ofrezcan seguridad para los soportes, puesto que estos están enterrados en la zona, lo que conllevaría (de adoptar un sistema similar) a tener una superficie lo suficientemente sólida donde ubicarlo y asegurar un correcto anclaje.

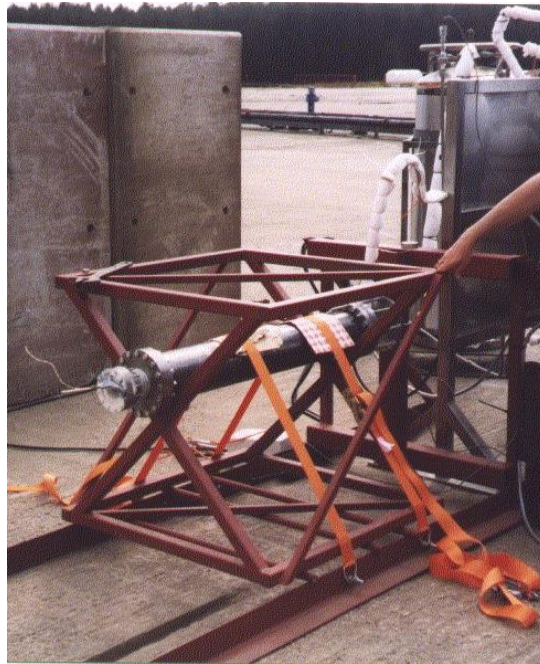


Figura 28 Banco de pruebas para motores híbridos [16]

La figura 28 muestra un banco de pruebas horizontal para motores híbridos, capaz de soportar sin ningún esfuerzo empujes de hasta 2000 N [16]. El motor cohete se monta en una estructura con perfiles de tubo cuadrados, sujeta con cintas de amarre, esta estructura posee un entramado de perfiles tubulares que forman una “X”, los cuales son soportados por una base rectangular tanto superior como inferior, y soldadas entre sí, esto le da rigidez a la estructura.

Toda la estructura se acopla a una sección central en la cual está sujeta la celda de carga, esta disposición particular de banco de pruebas reduce la vibración estructural de la sección que soporta el motor cohete [16]. Los rieles de piso están atornillados directamente al hormigón. En cuanto al sistema de adquisición de datos, posee 3 sensores de presión, termopares y la celda de carga. Las válvulas de alimentación de combustible se activan de forma electrónica o de forma remota. De nuevo el tamaño resulta ser un inconveniente para la implementación en el diseño de una estructura con características similares, puesto que es un parámetro de diseño a optimizar, aunque el sistema de sujeción a piso y la utilización de soldadura en la unión de algunas partes será de consideración en el proceso por las ventajas que ofrece en cuanto a homogeneidad y soporte de esfuerzos.



Figura 29 Banco de pruebas de tipo horizontal [17]

Este banco de pruebas desarrollado por el grupo de investigación del “*Dartmouth College*” se construyó para soportar empujes de hasta 1000 libras. Su estructura se fabricó con placas de aluminio de extrusión 1010 de 1/4” y 3/8” [17]. La estructura del banco de pruebas está conformada por 3 placas de sección cuadrada igualmente espaciadas a lo largo de donde va soportado el motor cohete, en la zona posterior se ubica el sistema de adquisición de datos que lo conforma únicamente una celda de carga. Por último, la sujeción a la superficie se hace mediante 4 placas rectangulares soldadas a perfiles que funcionan como “pies” de soporte para la estructura. Esta estructura presenta ventajas en cuanto a su simpleza, fácil diseño y peso, ahora bien, construir una estructura rígida es de suma importancia a la hora de probar motores cohetes debido a su volatilidad, y es ahí donde esta no dé las mejores prestaciones. También se ve limitada en cuanto al tipo de motores a probar ya que las placas cuadradas centrales que posee la estructura tienen un diámetro definido y sería necesario desarmar la estructura completa para probar otro tipo de motores de las clasificaciones anteriormente

mostradas. Esto establece una importante limitación.



Figura 30 Banco de pruebas para motores híbridos [18]

El tipo de estructura mostrado en la figura 30 fue diseñado para prueba y caracterización de motores híbridos impulsados por combustible de PARAFINA/NOX con un empuje de hasta 330 libras. La estructura consiste en un entramado de perfiles tubulares, formando un soporte apoyado en una sección rectangular, en él se disponen dos perfiles estructurales en posición vertical y sobre ellos una base en la cual se sostiene el sistema de sujeción del motor cohete, dicha base está sujeta al sitio de prueba con pernos de anclaje, y el sistema de adquisición de datos que consiste en un sensor electrónico para la medida de la fuerza empuje (celda de carga), un control remoto para la válvula y el sistema de ignición, y calentamiento del tanque [18]. Desde el punto de vista estructural es un diseño que provee versatilidad, puesto que el sistema de sujeción del motor cohete de característica gradual permite ubicar en el motores de distintos diámetros, factor importante en el presente proyecto. El sistema de adquisición de datos y su ubicación es una característica idónea puesto que el diseño establece una distancia segura para este y la estructura a la cual está sujeto, anclado a la sección horizontal del banco de pruebas, con dos perfiles estructurales tubulares en forma de L y un perfil de menor dimensión inclinado formando un triángulo como se muestra en la figura 31, que provee rigidez limitando el movimiento de la celda debido al empuje del motor, y por lo tanto precisión a la hora de medir dicho parámetro.

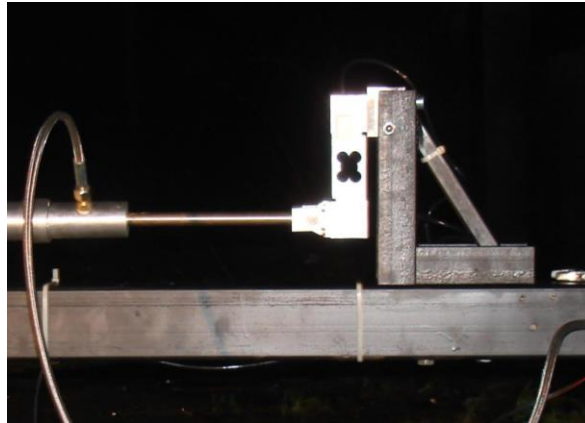


Figura 31 Ubicación de la celda de carga [18]

El tamaño es un tema importante para tratar si lo que se busca como en este caso particular, poder disponer de él para su transporte, y la estructura de este diseño es grande y robusta, lo que implicaría complicaciones para encontrar un sitio adecuado para la realización de las pruebas. Como se mostró en la figura 31 todo el entramado de la estructura central está sujeta a una base rectangular mediante pernos de anclaje la cual puede ser desarmada, y a su vez la sección central también está sujeta con pernos de unión, así pues, el sistema semi-modular puede ser desarmado y armado de nuevo con facilidad. La anterior estructura de banco de pruebas y sus sistemas poseen como se mencionó características que ofrecen mucha versatilidad, seguridad y rigidez. Cualidades de interés particular para el desarrollo del presente proyecto y debido a eso algunos de sus sistemas serán considerados en el proceso de diseño que será llevado a cabo.



Figura 32 Banco de pruebas SPL de 100 kN [19]

En la figura 32 se muestra el banco de pruebas desarrollado por el “Swiss Propulsion Laboratory”, y en ubicado el motor de combustible sólido “THETIS-I”. En él es posible

realizar pruebas a motores de combustible tanto sólido como líquido con un empuje máximo de hasta 10 kN (10 toneladas métricas). La mesa de medición está montada en 8 juntas "Flex" libres (con extensiones de tope de seguridad). La mesa está hecha de aluminio y tiene ranuras en "T" integradas para facilitar el montaje de diferentes tipos de motores, válvulas y el sistema de adquisición de datos, en el que las celdas de carga se pueden cambiar al rango de medición requerido para cada motor en particular, y posee un marco relleno con concreto con el fin de prevenir oscilaciones [19]. Esta estructura compacta, rígida, de sistema de sujeción variable y transportable presenta características que para el desarrollo del presente proyecto son de suma importancia, puesta que se establecieron desde un inicio como parámetros de diseño. Por este motivo serán de consideración en el desarrollo del proceso de conceptualización, por su simplicidad en la estructura, seguridad y rango de operación.

El motivo por el cual se realizó la descripción de estas configuraciones, tipo de estructura, ventajas, desventajas, y tipo de posicionamiento del motor cohete sobre esta, fue darse una idea de las configuraciones más comunes, el porqué de estas y a la postre, sacar el mejor provecho de cada uno de ellos, tomar las características que mejor se acoplaran a los requerimientos que se buscaban y establecer una configuración inicial de banco de pruebas basándose en desarrollos probados y que fuesen funcionales. De esta forma, en la selección del tipo de banco estático a diseñar teniendo en cuenta los diferentes tipos de estructuras considerados, costos, ventajas y desventajas se optó por un banco de pruebas semi-modular, de tipo horizontal debido a que el movimiento en los ejes coordenados puede ser controlado de manera más fácil con sistemas de sujeción y reducir así los grados de libertad a la hora de la realizar la prueba y porque como se puede observar en los diseños considerados, estas ventajas resultan predominante y es el tipo de disposición más utilizado para caracterización de motores cohete, por otro lado, el peso puede ser distribuido de manera uniforme sobre la estructura que soporte el motor, a diferencia de los bancos de pruebas verticales, en los que el peso representa una variables más a considerar debido a su variación en el tiempo, esto puede generar errores de medición del empuje por el cambio en el centro de gravedad, y porque además requeriría de sistemas de control de presión y bombeo de combustible en caso tal de probar motores cohete de combustibles líquidos. El sistema constará de la estructura del banco de pruebas, que se prevé sea sujeta a una superficie sólida (pared), una sección central en la cual irá ubicada la celda de carga sujeta a la estructura de sujeción central de

pared mediante pernos de unión, un transductor de presión cuyo sistema irá también ubicado en la placa de la sección central esta configuración atiende a los diferentes diseños antes mostrados y como todos tenía una estructura rígida en la cual ubicar la celda de carga y los sistemas electrónicos y se ubicaba por obvias razones en el punto en el cual el empuje del motor era aplicado como se puede ver en [14] [15] [18], y un sistema de sujeción variable para los motores. Las principales ventajas que se observan en esta configuración en particular son: configuración ideal para caracterización de cohetes, alto grado de seguridad y la no necesidad de un sistema de deflexión de llama. Y como desventajas claro está también se tienen, es importante notar que si se quiere simular un motor cohete con fines de aplicaciones en cohetería experimental para lanzamientos a baja, media y gran altitud, la ubicación en posición vertical sería la más adecuada, pero debido a los inconvenientes que plantea este tipo de configuración y por facilidad de diseño, se decide por el tipo de posicionamiento horizontal.

Después del análisis de fuerzas y esfuerzos, se define entonces la estructura del banco de pruebas, que deberá cumplir con los requerimientos anteriormente expuestos. El diseño parte de la observación a lo largo del desarrollo de investigación de distintos modelos de bancos de prueba, todos ellos con características particulares de acuerdo con el requerimiento de diseño para el cual fueron concebidos.

El proceso de diseño inicia con una serie de bocetos de lo que se desearía fuese la estructura inicial del banco de pruebas, basándose en las diferentes configuraciones vistas con anterioridad que han demostrado ser funcionales y cumplir con los requerimientos propuestos. Dichos bocetos y sus respectivas medidas fueron tomadas a partir de las medidas del motor más grande en cuanto a dimensiones que se busca pueda ser caracterizado. En [8] se pueden encontrar diferentes configuraciones de bancos de prueba. Así entonces se procede con diseños en papel. La figura 33 muestra un boceto de la primera aproximación de diseño.

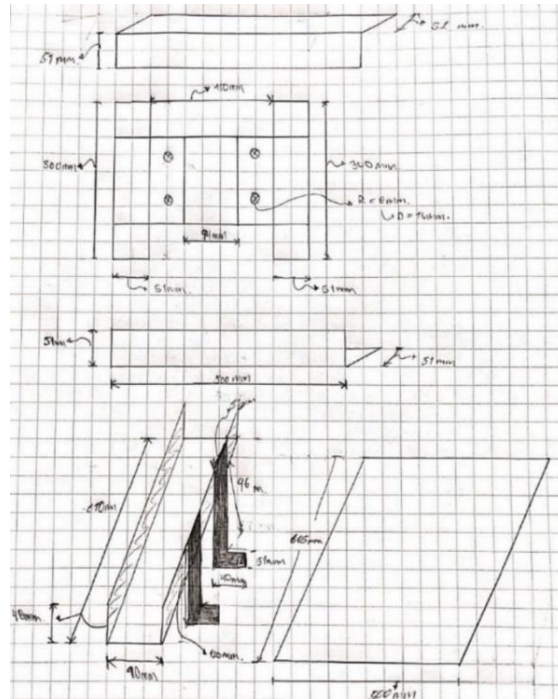


Figura 33 Boceto banco de pruebas inicial

La primer etapa de diseño consiste en un conjunto compuesto por dos perfiles en ubicación horizontal de 51x51 mm, con una longitud de 500 mm, y un espesor de 4 mm, dos placas verticales de 51x300 mm, de 4 mm de espesor, una placa horizontal de 252x100 mm, de 4 mm de espesor ubicada horizontalmente y acoplada a las dos placas verticales, se piensa para que este acople se haga mediante soldadura ya que es un acero de fácil soldabilidad, se recomienda soldadura A.W.S (American Welding Society), clase E-6010, E-6011, y E-6013 [20]. En esta placa se ubican dos perfiles de 51x51 mm con una longitud de 100 mm, y espesor de 4 mm, esta sección de la estructura será la que soporte las cargas impuestas por el empuje del motor a la hora de la prueba, por lo tanto se ubican en cada uno de los perfiles 2 orificios de sujeción de 16 mm de diámetro, que servirán para unir los perfiles con la placa central. Estas partes conformarán la estructura que irá sujeta a una superficie o pared sólida que no permita el desplazamiento en la dirección de empuje del motor.

Por último se tiene la estructura en la cual irá sujeto el motor a ser caracterizado, esta consiste en un perfil en U, también de acero estructural, con 90 mm de base por 48 mm de altura, con una longitud de 610 mm. Estas medidas corresponden a las dimensiones necesarias para albergar en ella un motor tipo L, cuyas dimensiones de diámetro y longitud se pueden encontrar en la tabla 2, es importante hacer la precisión respecto a la sección de la tobera del

motor, que decidió dejarse sin apoyo debido a que las altas temperaturas podrían degradar el material de la estructura de soporte del motor, por lo que esta sección quedará fuera de la estructura de soporte del motor . Esta estructura se planea lleve 4 soportes, que serán perfiles estructurales de 120x50 mm, de 4 mm de espesor, con una base de 51x51 mm, que se desea sean soldados a una placa de acero de 500x665 mm y 4 mm de espesor, que servirá como base de toda la estructura. La figura 34 muestra el diseño obtenido después de la primera etapa.

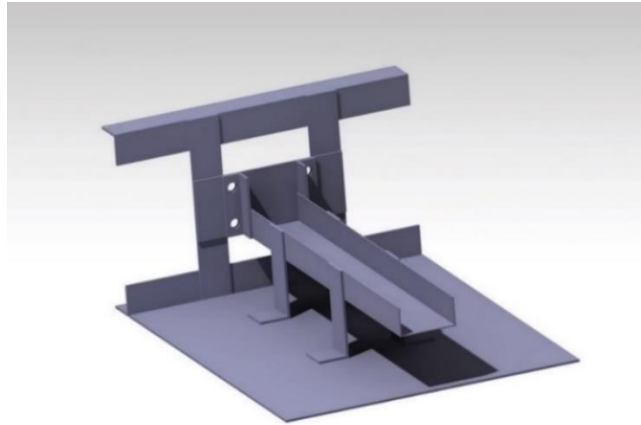


Figura 34 Primer diseño banco de pruebas

En esta primera etapa se evidencia la necesidad de hacer más consideraciones en el proceso de diseño respecto a la estructura, puntos de sujeción a la superficie, medidas, tipos de pernos a utilizar que no fueron definidos, entre otras. Las más importantes serían: Eliminar la placa de soporte de toda la estructura, puesto que conllevaría a tener material y peso innecesario, así mismo, se replanteó el diseño de los perfiles estructurales horizontales, propuestos para sujeción de la estructura central del banco de pruebas a alguna superficie rígida, con vistas de hacerlos más livianos y prácticos a la hora de realizarse la sujeción.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, y conservando algunas de las dimensiones iniciales, se procede a las modificaciones propuestas luego del análisis de la estructura del primer diseño. La figura 35 muestra el diseño preliminar del banco de pruebas, obtenidos después de la segunda etapa.

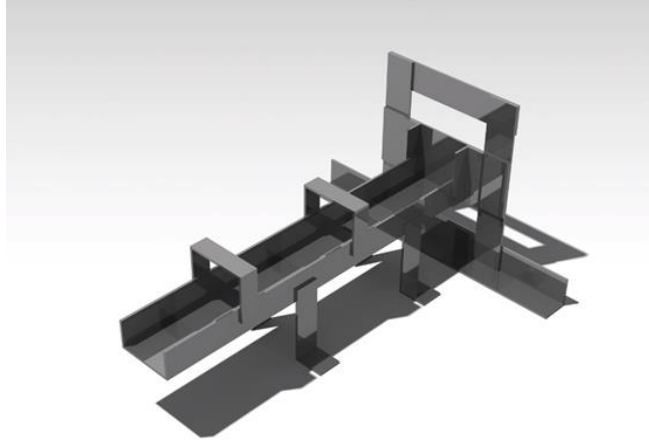


Figura 35 Diseño preliminar del banco de pruebas

Se observa en la estructura los cambios considerados después de la primera etapa de diseño. Como se mencionó con anterioridad, la necesidad de disminuir peso, y la cantidad de material necesario conllevó a pensar en ideas diferentes para la sujeción del soporte del motor cohete, así, los perfiles de acero estructural dispuestos a lo largo del perfil en U ya no serían soldados, se concibió entonces hacer uso de pernos de anclaje que son utilizados para sujetar elementos estructurales a superficies de hormigón, de características aún por definir.

Otra consideración en el diseño preliminar consistió en ofrecer elementos que dieran mayor seguridad al momento de sujetar el motor cohete, para esto se pensó en ubicar dos componentes estructurales de geometría en U invertida, de 102 mm de base, por 79 mm de altura, con un espesor de 4 mm y un ancho de 30 mm, la función de estos componentes será ofrecer un sistema de acople, sujeción y guía para los motores al momentos de ser ubicados en el banco, contará con pernos de punta de bola, que aprisionarán el motor y mantendrán su posición fija.

De esta forma se evitará que el motor en etapa de pruebas presente movimiento en alguno de sus ejes lo que podría afectar toma de datos, en especial el valor de empuje, por último se observa el cambio de geometría del perfil estructural horizontal superior, que se reemplazó por una placa del mismo material de 252x50 mm, de 4 mm de espesor, que irá soldada a las placas verticales y sujeto a la superficie rígida mediante pernos de anclaje.

Después de haber pasado por las etapas de concepción del diseño, bocetos, y dos etapas preliminares de diseño en CAD (“computer-aided design”) por sus siglas en inglés; se llega

a una última etapa de diseño, en la cual se refinarán los parámetros hasta ahora vistos, entre ellos, definir geometría, tamaño, cantidad y disposición de los pernos que se utilizarán en cada una de las partes, si bien ya se tienen estos parámetros para algunos, para otros se les designará de acuerdo a la función a realizar dentro de la estructura.

Es así, como se llega a la última etapa de diseño en la cual se acoplan y posteriormente se describe la posición, tamaño y geometría final de todos y cada uno de los componentes que conforman la estructura del banco de pruebas. La figura 36 muestra el diseño final.

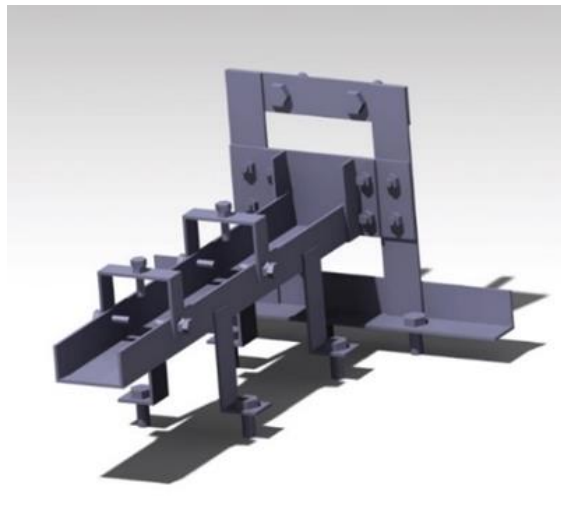


Figura 36 Diseño final banco de pruebas

Habiendo definido ya la mayoría de las dimensiones y partes que componen la estructura del banco de pruebas se abordará entonces lo correspondiente a definir las características de los tornillos y pernos utilizados en cada uno de los componentes estructurales.

Los perfiles que soportaran la estructura en U en el cual irán ubicados los motores a probar, el perfil estructural horizontal inferior, y la placa horizontal superior, se sujetaran mediante 4, 3 y 2 pernos de anclaje de cabeza hexagonal, con un diámetro de 16 mm y una longitud de vástago de 60 mm, respectivamente. Así mismo, los pernos guía en la sección de sujeción del motor serán de cabeza hexagonal y punta redonda, con un diámetro de 10 mm y una longitud de vástago de 40 mm. Esta sección tiene como particularidad una rosca soldada, esta se agregó con el fin de permitir la graduación del perno, de esta forma, motores cohete de diferentes diámetros pueden ser ajustados correctamente. Por último, la placa de la sección central del banco de pruebas tendrá un total de 8 pernos de sujeción, de cabeza hexagonal,

con un diámetro de 10 mm, y una longitud de vástago de 20 mm. Todos los pernos aquí mencionados se diseñaron siguiendo las recomendaciones, en cuanto a geometría, de la norma ASTM- A563 – 15 [21]. En ella se encontrarán las longitudes y características de cada uno de los pernos utilizados.

De esta forma, cada uno de los componentes estructurales que conforman la estructura del banco de pruebas ha sido definida mediante su ubicación, geometría y puntos de anclaje.

3.4. Configuración final y planos

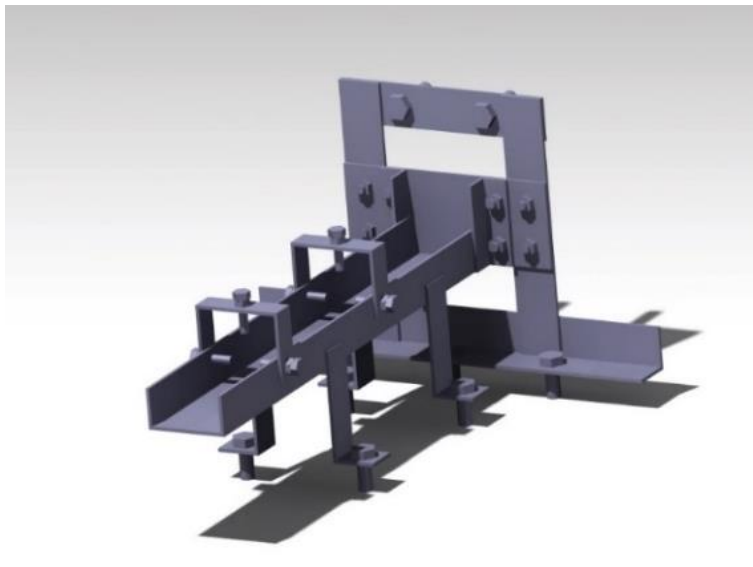


Figura 37 Diseño detallado banco de pruebas

En la figura 37 se puede observar en detalle la estructura final, está ya cuenta con los pernos de anclaje al sitio de prueba, y con los pernos de ajuste que serán los encargados de fijar el motor y alinearlos con la celda de carga para una correcta medida del empuje. A continuación, en la figura 38 los planos de la estructura y sus medidas.

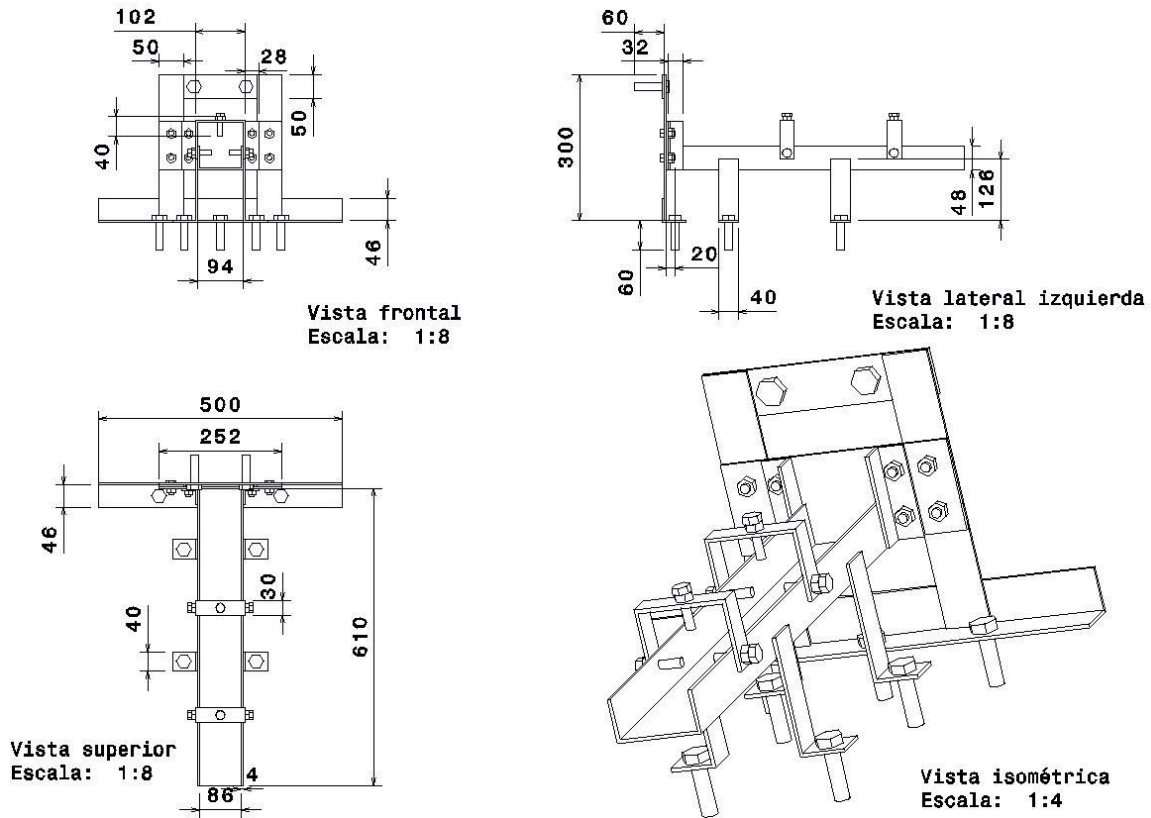


Figura 38 Planos banco de pruebas

En las siguientes figuras 38, 39, 40, 41, 42, y 43 se podrá observar en detalle el plano de cada componente de la estructura y su función.

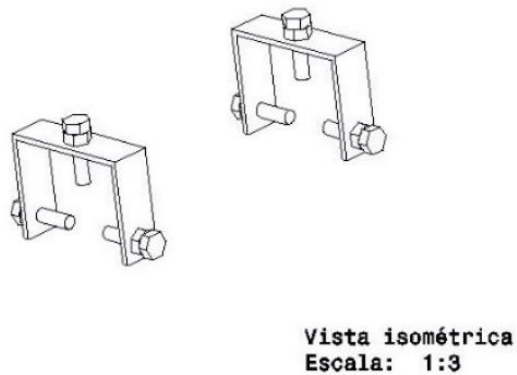
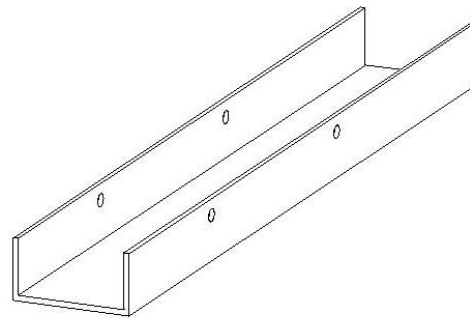


Figura 39 Sistema de sujeción del motor

La figura 39 muestra el sistema de sujeción gradual del motor cohete a probar, este consiste en 3 pernos ubicados 1 en posición vertical y 2 en posición lateral, separados 190 mm el uno del otro. Estos pernos serán los encargados de graduarse para centrar el motor cohete en la posición correcta, evitando errores de medida debido al movimiento del motor en uno de sus

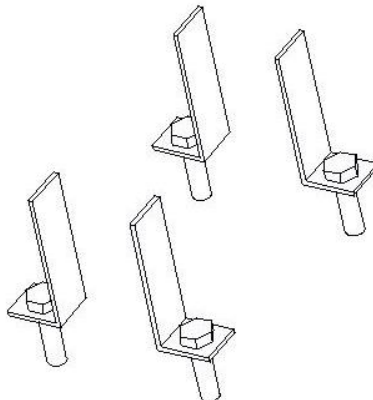
ejes y reduciendo vibraciones.



Vista isométrica
Escala: 1:3

Figura 40 Estructura de soporte del motor

La figura 40 muestra el perfil estructural en U que será el encargado de sostener el cuerpo del motor cohete, lo alineará y servirá como guía del sistema de sujeción el cual irá soldado a éste, las pestañas del perfil ofrecen seguridad en caso de explosión o de presentarse algún desajuste servirán como sistema de parada para reducir la vibración.



Vista isométrica
Escala: 1:4

Figura 41 Perfiles de sujeción de piso

La figura 41 muestra los 4 perfiles en L y sus respectivos pernos de anclaje, estos componentes estructurales serán los encargados de sostener la estructura de soporte del motor cohete (figura 40), puesto que irán soldados a ésta, y de anclarla a la superficie en la cual se ubique el banco el banco de pruebas. Estos perfiles soportarán esfuerzos de tensión y esfuerzos cortantes.

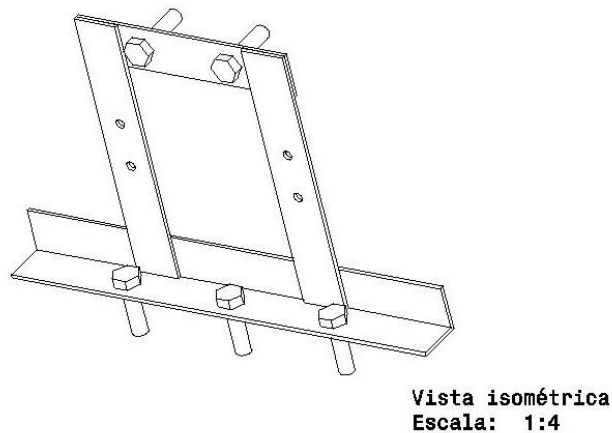


Figura 42 Estructura de sujeción de pared

La figura 42 muestra parte de la estructura de la sección central, en específico la que se denomina de sujeción de pared, está conformada por 2 placas en posición vertical un perfil en L de lados iguales en la parte inferior y una placa rectangular en parte superior. Estos componentes irán soldados entre sí y sujetos a una superficie sólida (una pared por ejemplo), mediante pernos de anclaje de igual denominación a los utilizados para fijar la estructura de soporte del motor (figura 40) a la superficie. En esta irá sujeta la placa central, que se acoplará a la estructura de sujeción de pared mediante pernos de unión.

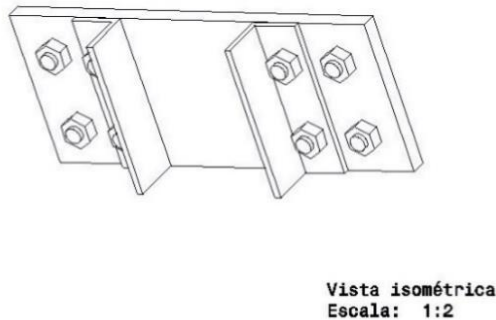


Figura 43 Placa de sección central

En la figura 43 se muestra la placa central, esta será la encargada de soportar el empuje generado por el motor, sobre ella se sujetarán dos perfiles en L de lados iguales, los cuales servirán para unir la estructura de soporte del motor a la placa de sección central, y por ende a la estructura de sujeción de pared, a la cual la placa se sujetará mediante 8 pernos de unión simple. En esta placa irá ubicada el sistema de medición de presión (celda de carga).

En la figura 44 se muestra la estructura final del banco de pruebas junto con el sistema de adquisición de datos, el cual consta de un sistema electrónico con celda de carga para la medida del empuje generado, este dispositivo constará de una barra que conectará la parte superior del motor cohete (también llamada culata) con la celda de carga sujeta a la placa rectangular de la sección central, el transductor de presión electrónico irá de igual forma ubicado en la parte superior del motor cohete cuya señal de salida se conecta al sistema de lectura de datos ubicado en la parte inferior derecha.

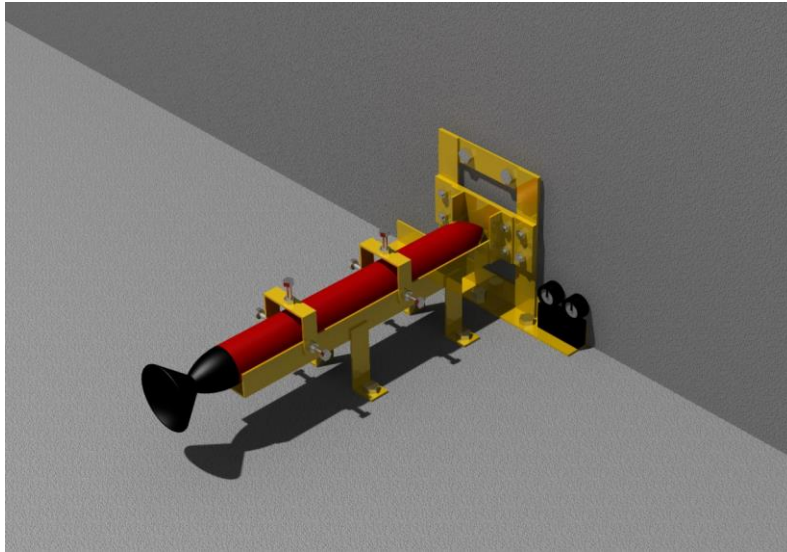


Figura 44 Banco de pruebas con sistema de adquisición de datos

Por último sistema iniciador de la combustión, en caso de utilizarse combustibles sólidos, se prevé sea un elemento roscado a través del cual pasan los cables de alimentación procedentes de una fuente de 14 VA, que a su vez están conectados a un alambre resistivo encapsulado en un cilindro aislante eléctrico.

4. METODOLOGÍA DE GENERACIÓN DE MALLA EN ELEMENTOS FINITOS

4.1 Generalidades

La simulación computacional ha representado para la industria aeronáutica y aeroespacial un avance significativo en cuanto a las capacidades de análisis del comportamiento de una cantidad inmensa de componentes en las diferentes etapas de conceptualización y diseño que se llevan a cabo en el ámbito académico y la industria. Al efectuar una clasificación de las estructuras, suelen dividirse en discretas o reticulares y continuas. Las primeras son aquellas que están formadas por un ensamblaje de elementos claramente diferenciados unos de otros y unidos en una serie de puntos concretos, de tal manera que el sistema total tiene forma de malla o retícula [22]. El método de análisis de elementos finitos es un método numérico que permite llevar a cabo el análisis de problemas lineales y no lineales, de carácter transitorio (en función del tiempo), y de estado estacionario, principalmente análisis de elementos estructurales sometidos a diferentes cargas o esfuerzos, transferencia térmica, electromagnetismo o mecánica de fluidos (CFD) [23].

Estos problemas tienen una característica en común y es que implican enormes dificultades al tratar de llevar a cabo resoluciones analíticas, esto se debe principalmente a tres razones:

1. Complejidad de las ecuaciones diferenciales asociadas al problema en cuestión.
2. Complejidad de la geometría a analizar.
3. Dificultad para establecer condiciones de contorno iniciales.

Dados estos obstáculos, incluso realizar cálculos en teoría simples requeriría un costo en tiempo y recursos muy elevado. El método ofrece una solución numérica aproximada ya que por lo anteriormente expuesto será muy complicado o en ocasiones imposible obtener una solución exacta (por ejemplo, en la solución de las ecuaciones para la mecánica de fluidos de Navier-Stokes), pero teniendo en cuenta el nivel de precisión que es posible alcanzar, lo hace el método más adecuado para realizar simulaciones en el ámbito físico y tecnológico. Ahora bien, es importante tener en cuenta que la solución numérica que arroja el método depende de muchos factores y de la facilidad que se tenga para tratar con ellos

en cada una de las situaciones de análisis, ya que cada problema establece parámetros particulares requerirá entonces un estudio completo y detallado de las condiciones que lo definen y de esta manera acercarnos de forma más precisa a la solución, al resultado que se planearía obtener, en este orden de ideas la calidad y el tipo de malla que se utilice en el elemento, para ese caso en particular una estructura será de vital importancia para establecer un nivel de precisión.

Ya que uno de los objetivos es llevar a cabo un análisis estructural mediante un software que hace uso de análisis elementos finitos sobre la estructura del banco de pruebas, el entendimiento del fenómeno a modelar, la física impuesta en el problema y las ventajas que pueda ofrecer tener un conocimiento claro sobre la formulación algebraica utilizada, es de suma importancia, por tal motivo fue necesario desarrollar a lo largo de este capítulo el fundamento teórico al respecto. En adelante se harán uso de conceptos ya mencionados que ayudarán a entender mejor las características del dominio a discretizar, de los nodos que lo conformarán, que son los puntos en los cuales el valor de la variable dependiente se interpola, lo que significa que será en estos puntos en los que se lleve a cabo el cálculo de los desplazamientos asociados en la estructura del banco de pruebas; de los elementos que resultan, el tipo de mallado que se buscará optimizar sobre la estructura del banco de pruebas, y principalmente de las condiciones de contorno, que serán las que definen las condiciones a las que se encuentra el banco de pruebas en un espacio determinado, permitirá hacer un mejor uso de las herramientas y hará el trabajo de discretización, procesado y post-procesado efectivo.

El objetivo de la discretización y la formulación anteriormente expuesta, es entonces esclarecer los parámetros de interés sobre los cuales la formulación débil trabaja, esta ofrece continuidad a la estructura del dominio, y ya que se está tratando con un elemento compuestos de partes geoméricamente distintas, las funciones de interpolación de acuerdo a los nodos, elementos y tipo de mallado (local o global) que se utilicen pueden generar discontinuidad sobre la discretización del dominio y puede que las ecuaciones diferenciales asociadas a la metodología de elementos finitos tengan disparidad, lo que conllevaría a tener a no tener buenos resultados en las zonas sobre cierta división del dominio (en la cual los elementos no tenga dicha continuidad), se colapse la formulación

debido al tipo de elemento generado. De ahí la importancia de conocer el trasfondo de este y otros parámetros.

Entre las aplicaciones que el método de elementos finitos tiene, para este caso en particular será de especial interés aquella que en la que se describe su aplicación a la mecánica del sólido real. Es importante conocer esta formulación porque la estructura del banco de pruebas es un sólido, en la cual como incógnita tenemos el campo de desplazamientos al que estará sometido, teniendo en cuenta los elementos de sujeción y las cargas impuestas. De nuevo, cuando la estructura haya sido mallada, deberá prestarse atención especial a los nodos aledaños a zonas de particular interés sobre esta; ya que la formulación para la mecánica del sólido real, establece como se mencionó anteriormente, que el campo de desplazamientos se expresará en función de los desplazamientos de los nodos, y ya que el objetivo del presente es conocer el comportamiento y la respuesta de la estructura a la fuerza de empuje sobre una sección en específico del banco de pruebas, el refinamiento de los elementos (lo que conlleva a disminuir el distanciamiento entre los nodos), será un herramienta de suma importancia, puesto que el cálculo del vector de desplazamientos \vec{x} se hará de forma más precisa.

Otro proceso de fundamentación teórica que se trajo a colación fue el análisis de problemas no lineales y los diferentes tipos de no linealidades. Las hipótesis de linealidad establecen que las ecuaciones que describen los fenómenos están compuestas por polinomios de primer grado, y esto se presente únicamente en problemas de poca o nula complejidad en ingeniería. Ya que la estructura del banco de pruebas estará sometida a fuerzas de empuje de magnitud considerable, la hipótesis de pequeños desplazamientos, no se contempla por lo que es claro que el análisis de problemas no lineales en la mecánica del sólido real debía ser tratada.

Ahora bien, la estructura del banco de pruebas se espera presenta no linealidad geométrica ya que como se mencionó las cargas impuestas sobre ella posiblemente generaran tanto tensiones como deformaciones lo suficientemente grandes como para provocar cambios en la forma de la estructura, lo que conlleva consigo un cambio de rigidez en la misma. La rigidez es un parámetro de diseño, por lo que cambios drásticos en este no pueden ser

aceptados y el análisis por elementos finitos ayudará a definir si estos desplazamientos y deformaciones son de consideración para así replantear características del diseño de ser necesario. El estudio y caracterización de estos fenómenos se llevan a cabo mediante el principio de trabajos virtuales, como se mencionó con anterioridad, y la aplicación del método de Newton-Raphson para llevar a cabo cálculos de los desplazamientos provocados en este caso, por la fuerza aplicada sobre la estructura del banco de pruebas.

Ahora bien, todos los materiales presentan comportamientos mecánicos diferentes, dependiendo del problema en específico a tratar de carácter lineal o no lineal, si bien es sabido las cargas a las cuales será sometido el banco de pruebas generará desplazamientos y tensiones que podrían afectar la rigidez del material, conocer el modelo matemático utilizado para describir dicho comportamiento. Al tratarse de un material que puede sufrir deformación elastoplásticas, el parámetro de interés que permitirá evaluar el campo de deformaciones sobre la estructura será el modelo de Von Mises.

La no linealidad en las condiciones de contorno, no solo se asocian a vigas, cualquier tipo de estructura puede tener este comportamiento y el banco de pruebas podría presentarla principalmente en la sección en la cual se ubica el motor cohete, específicamente por condiciones de fricción.

4.2 Consideraciones generales para el mallado del modelo

Uno de los factores más importantes a la hora de realizar una simulación por medio de cualquier aplicación que use el método de los elementos finitos, es, sin duda alguna, el mallado de la geometría objeto de la simulación. El caso que se trata aquí corresponde a una estructura que, en su mayor parte está conformada por elementos estructurales tipo L, de configuración a priori sencilla, en ese orden de ideas se deben realizar una serie de consideraciones que permiten obtener una malla efectiva en función de las características a analizar, reduciendo costos computacionales y tiempo de simulación.

Por consiguiente, es importante seleccionar el tipo de malla que mejor se acople al problema en particular. Para ellos han de considerarse los siguiente aspectos:

- Tiempo necesario para crear la malla.
- Costes computacionales.
- El efecto de la difusión numérica.

La geometría de la mayor parte de los problemas que se analizan por el método de elementos finitos hoy en día, son complejas. La creación de mallas estructuradas, o estructuradas por bloques (compuestas por elementos cuadriláteros o hexaédricos) para tales problemas puede ser, o bien, complejas requiriendo grandes consumos de tiempo y coste computacional, o simplemente imposibles.

Cuando se tratan con geometrías complejas, un mallado triangular/tetraédrico suele ser el más apropiado, requiriendo un menor número de celdas que un mallado cuadrilátero/hexaédrico. No obstante, cuando se trata de geometrías con un grado de complejidad medio, las mallas no estructuradas de tipo cuadriláteras/hexaédricas, ofrecen muchas de las ventajas de las mallas triangulares/tetraédricas. Así también, no es lo mismo mallar con elementos triangulares que hacerlo con elementos rectangulares, como se ha venido mencionando, puesto que la adaptabilidad de los elementos triangulares/tetraédricos es mejor para zonas curvas, claro, esto significa mayor densidad de elementos por lo que se requerirá mayor poder computacional. En tanto, si el proceso de mallado se hará sobre una superficie plana o compuesta por ese tipo de elementos será entonces conveniente utilizar elementos rectangulares/hexaédricos pues tiene igual validez y consume menos recursos computacionales y tiempo. Queda claro entonces que la correcta definición de la geometría es de suma importancia a la hora de llevar a cabo el proceso de discretización y construcción del mallado.

En otros aspectos, las mallas cuadriláteras/hexaédricas ofrecen también ventajas respecto a las triangulares/tetraédricas. Las primeras permiten mayores relaciones de aspecto, una relación de aspecto elevada en mallas triangulares/tetraédricas implica necesariamente mayores esquinamientos en las celdas, lo que debe evitarse siempre que sea posible, dada la repercusión negativa en la convergencia y exactitud del problema.

En cuanto a la difusión numérica (también llamada difusión ficticia, dado que no se trata de una difusión física real), se trata de una de las fuentes de error dominantes en situaciones multidimensionales. La difusión numérica está muy relacionada con la resolución de la malla. Así mallas refinadas proporcionarán menor difusión numérica.

4.3 Calidad de malla

Cuando se hace uso del método de elementos finitos, siempre se debe definir la malla, y con ella las características que definen de igual forma su calidad. La malla es el grado de aproximación que tiene el modelo planteado comparado con la realidad, de manera que cuanto más densa sea ésta, el error será menor.

Aquí se definirán parámetros que definen la calidad de una malla y como pueden afectar de forma positiva o negativa la calidad de la malla y, por ende, la aproximación de la solución generada.

4.3.1 Relación de aspecto

La relación entre dimensión no debe ser desproporcional, es decir la relación de aspecto de ser próxima a 1. Esto está directamente relacionado con la forma de cada uno de los elementos en los que se divide el dominio, en tres dimensiones una visión de una buena relación de aspecto se evidencia como se puede observar en la figura 45:



Figura 45 Relación de aspecto [22]

4.3.2 Frontera

Los nodos no deben estar en la superficie inter-elemental y saltar de un elemento a otro sin haberse definido con anterioridad una frontera. En la figura 46 se muestra un ejemplo

de este caso.



Figura 46 Definición de frontera en las zonas de mallado [22]

4.3.3 Simetría

En casos en los cuales la geometría a analizar tiene simetría, aplicar la simulación solo a la mitad del elemento y utilizar la condición de simetría puede ahorrar costos computacionales y aumentar la calidad y precisión de los resultados, ya que permite una utilizar una mayor cantidad de elementos.

4.4 Tipos de malla

Como se ha venido mencionando, el tipo de malla a utilizar depende mucho de la geometría que se planea estudiar, por tanto, a continuación se verán los dos tipos de mallado en elementos finitos y se someterá la estructura del banco de pruebas tanto al tipo de malla estructurada como a la de tipo no estructurada, donde se evaluarán los parámetros que definen su calidad y de esa forma llevar a cabo la selección de la misma teniendo en cuenta su eficiencia, facilidad de implementación, y tiempo de simulación (coste computacional).

- Métodos de generación de malla estructurada:
 - Algebraicos
 - Basados en EDPs
 - Superposición-deformación de retícula
 - Crecimiento estructurado
- Métodos de generación de malla no estructurada
 - inserción de nodos y posterior conexión: Delaunay
 - generación simultánea de nodos y conectividad: Frente de avance.

- Métodos multibloque

La clasificación de estos métodos ha sido realizada por varios autores [23] [24] [25] [26]. En estas referencias se establece como primer criterio de generación el tipo de malla, y en segundo lugar, el modo en que se genera y el tipo de elementos utilizados.

4.4.1 Mallas estructuradas

Por malla estructurada se entiende toda discretización cuya conectividad sigue un patrón reticular. Por esta razón, en este tipo de mallas se utilizan fundamentalmente elementos cuadriláteros (2D), o hexaédricos (3D), aunque a partir de ellos, como se verá posteriormente, se pueden generar triángulos y tetraedros, respectivamente. La creación de esta retícula impone unas fuertes condiciones sobre el contorno del dominio, por lo que en muchos casos este tipo de discretización no es realizable o, siéndolo, presenta una baja calidad, cuando se trata de geometrías complejas, siendo este un método recomendado para aquellas en las cuales la definición de las condiciones de frontera se pueda realizar de forma simple, sin afectar la calidad del mallado y por ende los resultados esperados.

4.4.1.1. Métodos algebraicos

Dado que en la generación de mallas estructuradas la conectividad es conocida, los métodos tienen como objetivo el cálculo de la posición de los nodos que forman la retícula, de modo que los elementos resultantes presenten unas determinadas características de tamaño y regularidad. Las técnicas más sencillas y, por tanto, más rápidas en el cálculo de estas condiciones nodales son las denominadas algebraicas, entre las que destacan, las de transformación en geometrías canónicas o “mapping” y las de interpolación transfinita. En las primeras, se transforma el dominio original, esto es, su contorno discretizado, en un dominio canónico como, por ejemplo, un rectángulo. Sobre él se genera la retícula y los nodos de esta vuelven a ser transportados al dominio real mediante una transformación inversa a la previamente realizada. En el segundo caso, se desarrollan funciones de interpolación entre los lados del dominio de modo que la generación de los nodos internos viene determinada por la posición de los nodos del contorno. Estas técnicas generalmente se aplican sobre geometrías cuadriláteras [27] [28] [29] o hexaédricas [30] [31], aunque

en ocasiones también han sido aplicadas en dominios triangulares [32], tetraédricos o pentaédricos [33]. En la figura 47 se presentan ejemplos de este tipo de discretización.

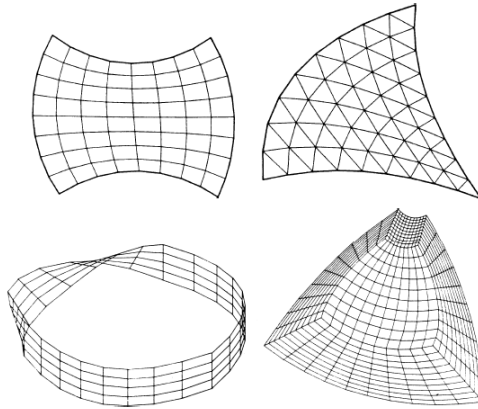


Figura 47 Mallas generadas mediante métodos algebraicos [34]

4.4.1.2. Métodos basados en EDPs

Con el objeto de conseguir una mayor regularidad de los elementos, características de ortogonalidad entre las aristas con nodos comunes y un mayor control de la densidad de la malla, se han desarrollado técnicas de mallado estructurado basadas en la resolución de EDPs, utilizando como condición de contorno la geometría del contorno del dominio que se pretende discretizar [34]. Estas técnicas pueden ser consideradas como métodos algebraicos donde las coordenadas de los nodos interiores vienen determinadas por la resolución de estas EDPs, que relacionan las coordenadas del dominio real (x,y) con las del dominio canónico (ξ,η) o coordenadas naturales.

El objetivo final consiste en obtener las funciones que relacionan las coordenadas reales x e y , con ξ y η , por lo que se hace necesario invertir el sistema y resolver las ecuaciones acopladas resultantes mediante algún método iterativo. Esta solución requiere alta capacidad computacional lo que implica un alto coste, en comparación directa con el método algebraico.

Las ecuaciones por utilizar dependerán directamente de las características que queramos obtener. Por lo tanto, si se lo que se pretende es obtener una malla con buena regularidad se emplea la ecuación de Laplace; por el contrario, si buscamos discretizaciones con densidad de mallado variable, de modo que exista una mayor concentración de elementos

alrededor de una zona determinada, será conveniente utilizar la ecuación de Poisson. Las ecuaciones 45 y 46 describen estos dos casos son:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = P \quad (45)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = Q \quad (46)$$

Donde P y Q controlan la distribución de los nodos en la malla:

- $P > 0$: Los nodos son atraídos hacia la derecha.
- $P < 0$: Los nodos son atraídos hacia la izquierda.
- $Q > 0$: Los nodos son atraídos hacia arriba.
- $Q < 0$: Los nodos son atraídos hacia abajo.

Cuando el dominio del problema viene definido por dos curvas cerradas (2D) o dos superficies cerradas (3D), encontrándose una de ellas hasta el infinito, es decir, en el caso de sistemas abiertos, es recomendable la utilización de sistemas hiperbólicos, pues presentan un menor coste computacional que los elípticos.

En la figura 48 se muestran algunas mallas obtenidas mediante el método de ecuaciones diferenciales parciales. Un análisis más detallado se puede encontrar en [23] y [35].

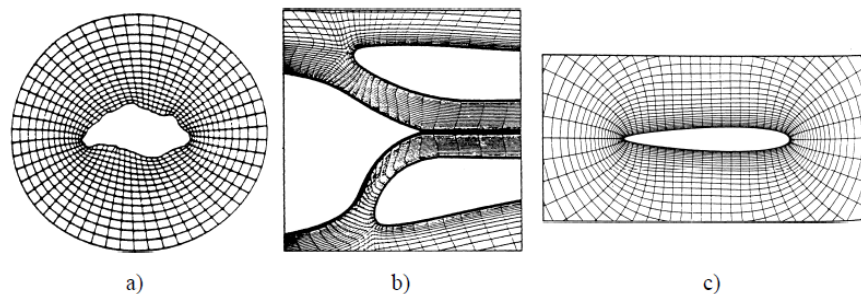


Figura 48 Mallas bidimensionales generadas mediante la resolución de EDPs: a) Laplace, b) Poisson, c) Hiperbólico [34]

4.4.1.3. Métodos de superposición-Deformación de retícula

Estos métodos generan la malla a partir de una retícula cuadrada, como la mostrada en la figura 49a, o cubica que contiene al dominio del problema. El proceso con lleva ciertas etapas que se describen a continuación:

- Eliminación de los cuadrados (2D) o cubos (3D) que no intersecten el dominio. [figura 49b].
- Procesamiento de los cuadrados o cubos que son intersectados parcialmente por el contorno del dominio. Si este procesado no se produce, el ajuste del contorno es muy deficiente, por lo que resulta más apropiado para el método de diferencias finitas, que para el método de elementos finitos. Generalmente para mejorarlo se modifican los cuadrados o cubos de forma que se ajusten perfectamente al contorno [36]. [figura 50a], o bien se utiliza una retícula jerárquica no conforme. [figura 50b].

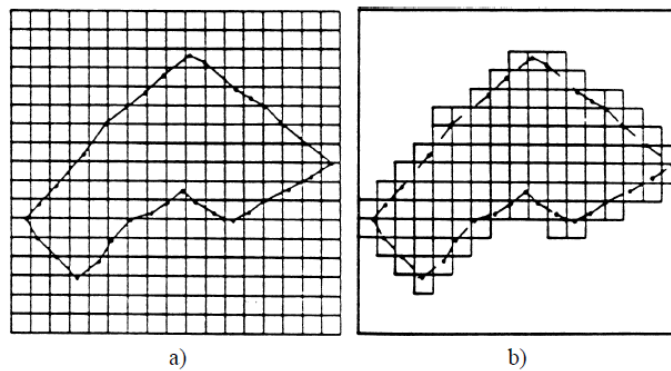


Figura 49 Superposición de retícula: a) Retícula inicial, b) Intersección con el dominio [34]

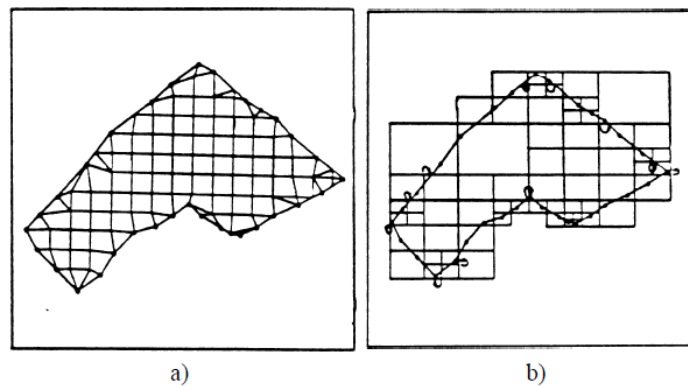


Figura 50 Ajuste al contorno: a) deformación de cuadrados, b) Retícula jerárquica [34]

La práctica habitual es la generación de una retícula jerárquica ajustada el contorno, esta puede ser la malla que utilice el método de elementos finitos, pero dadas las dificultades que plantea su no conformidad, lo habitual es utilizarla como malla de referencia del

tamaño del elemento en métodos de generación de malla no estructurada [37] [38] [39].

4.4.1.4. Métodos de crecimiento estructurado

Estos son métodos de discretización volumétrica indicados para geometrías que se desarrollan a partir de la traslación de una superficie base. El método consiste fundamentalmente en la repetición de la malla superficial de la base, que puede ser estructurada o no, a lo largo del dominio del problema. De acuerdo con este planteamiento, únicamente es posible establecer una malla estructurada en la dirección del crecimiento de la geometría tridimensional [34]. Al igual que los anteriores, este es un método que tiene restricciones en cuanto a las características del mallado, partiendo desde la discretización del contorno, las cuales son:

- La conectividad de las mallas bidimensionales de las dos superficies básicas debe ser la misma.
- La malla de las superficies laterales debe ser estructurada.

En la figura 51 se muestran ejemplos de este tipo de mallado partiendo de mallas bidimensionales cuadriláteras no estructuradas. Mas información respecto a la implementación de esta técnica se puede obtener de [40] [41] [42].

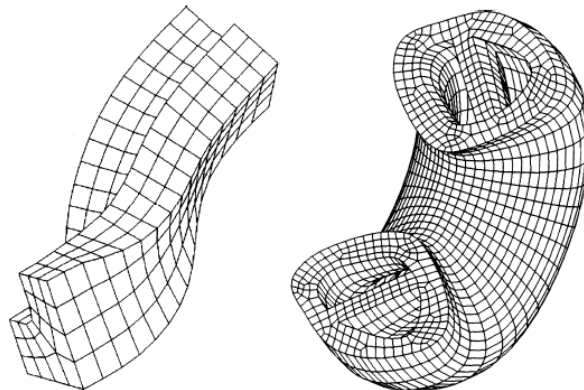


Figura 51 Mallas hexaédricas de crecimiento estructurado [34]

4.4.2 Malla no estructurada

Son aquellas que tienen otro tipo de conectividad, es decir, los elementos vecinos son variados. No presentan un patrón de conectividad predeterminado, esta viene determinada por el contorno de la geometría a discretizar, la posición de los nodos interiores y el método

de discretización utilizado. Esta libertad en la conectividad hace posible la discretización de cualquier dominio a partir de una discretización del contorno arbitraria. Es por esto, que los métodos de mallado no estructurado son de aplicación más general que los de mallado estructurado, esto claro, repercute un mayor coste computacional [34].

Aunque existe una gran diversidad en los métodos de generación de este tipo de discretizaciones, los más empleados en la práctica se pueden dividir entre aquéllos que parten de una distribución determinada de nodos y únicamente se ocupan de obtener una conectividad adecuada, y aquellos otros en los que nodos, aristas y elementos (en el caso bidimensional) o nodos, aristas, caras y elementos (en el caso tridimensional) se generan conforme la malla va creciendo.

En el primer caso, se busca una conexión óptima de modo que los elementos presenten una buena relación de aspecto; esta triangulación óptima está garantizada si se emplea el método de Delaunay-Voronoi. En el segundo caso, estos mismos criterios de regularidad son los que marcan la posición más adecuada para el nuevo nodo generado y su conexión con el resto de la malla. La familia de técnicas que sigue esta última metodología se denomina métodos de frente de avance, pues en ellos la malla se genera iterativamente desde un frente inicial, que coincide con el contorno del problema y que se va modificando conforme el proceso avanza, hasta que el dominio queda completamente mallado, momento en el que el frente queda vacío. A continuación, se describen con mayor detalle estas dos técnicas.

4.4.2.1. Métodos de Delaunay-Voronoi

La triangulación de Delaunay fue una de las primeras técnicas de discretización triangular utilizadas. En 1855 Dirichlet propuso un método con el que, dado un conjunto de puntos P_i , se puede definir un conjunto de regiones poligonales (2D) o poliédricas (3D) V_i asociadas a cada punto, de modo que cualquier punto de la región V_i se encuentra más cercano al punto P_i que a cualquiera del resto, en la ecuación 47 se muestra la descripción matemática. Es decir:

$$V_i = \{p: ||p - P_i|| < ||p - P_j||\} \forall j \neq i \quad (47)$$

A partir de su definición resulta claro que cada lado de estas regiones poligonales se encuentra equidistante de los dos puntos que separa. La unión de todos estos puntos por pares genera otra discretización del dominio, conocida como triangulación de Delaunay, que posee una característica de mucho interés para la generación de mallas: La regularidad de ángulos en los triángulos generados es máxima. Es decir, dado un conjunto finito de nodos, el método Delaunay garantiza una triangulación óptima. Esto claro, para dos dimensiones. Cuando se tratan geometrías en tres dimensiones, la triangulación óptima no garantiza que los tetraedros generados sean óptimos.

Este tipo de discretización posee un método sistemático dividido en las siguientes etapas:

1. En caso de que el dominio del problema no sea convexo, definición de un dominio convexo que incluya al dominio que se pretende discretizar y generación de su triangulación. La forma más sencilla de hacer esto es mediante la especificación de 4 puntos que formen un cuadrado en el caso bidimensional u 8 puntos que formen un cubo en el caso volumétrico.
2. Introducción de un nuevo nodo del dominio.
3. Determinación de los elementos cuyas circunferencias circunscritas (o esferas circunscritas) contienen al nuevo nodo. Estos elementos deben ser eliminados, así como sus aristas (y caras) comunes.
4. Determinación de los nodos pertenecientes a esos elementos.
5. Determinación de las aristas (o caras) exteriores de los elementos eliminados, es decir, del hueco que resulta tras la eliminación de los elementos anteriores.
6. Generación de nuevos elementos mediante la unión de las aristas (o caras) detectadas en el punto 5 con el nuevo nodo.
7. Repetición de la secuencia desde el punto 2 hasta que todos los nodos hayan sido introducidos. La figura 52 muestra un ejemplo de la aplicación de estas 5 etapas en un dominio bidimensional.
8. Eliminación de las aristas y elementos (2D) o aristas, caras y elementos (3D) que no pertenezcan al dominio.

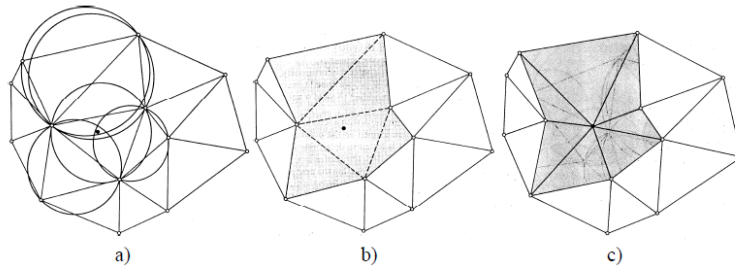


Figura 52 Triangulación de Delaunay: a) Inserción de nodo, b) Detección y eliminación de elementos, c) Triangulación local [34]

Como se ha comentado anteriormente, este algoritmo genera únicamente la conectividad, asumiendo conocidas las posiciones de los nodos de la malla. El cálculo de estas posiciones se realiza generalmente a partir de una malla de referencia, una función de densidad de malla [43] [44] [45] [46] o en el contexto de un procedimiento adaptativo [47]. En este último caso, los nuevos nodos se generan en aquellos elementos que presenten un elevado error. Asimismo, si se parte de una discretización inicial del contorno y éste no es convexo, ésta puede verse modificada en el proceso de inserción de nodos. Ésta es una de las principales desventajas de la triangulación de Delaunay, pues dificulta la utilización de una metodología multibloque, que más adelante es comentada, ya que esta técnica requiere una misma discretización en las interfaces de los distintos bloques que forman el dominio. Existen variantes de la triangulación de Delaunay que fuerzan a mantener la discretización del contorno o bien la restauran tras aplicar el procedimiento general, tanto en discretizaciones bidimensionales [48] como volumétricas [49]. Estas técnicas son conocidas como Delaunay restringidas y, en general, no garantizan la generación de una malla óptima en el sentido anteriormente comentado.

En la figura 53 se muestra la evolución de una triangulación Delaunay bidimensional conforme los nodos son introducidos:

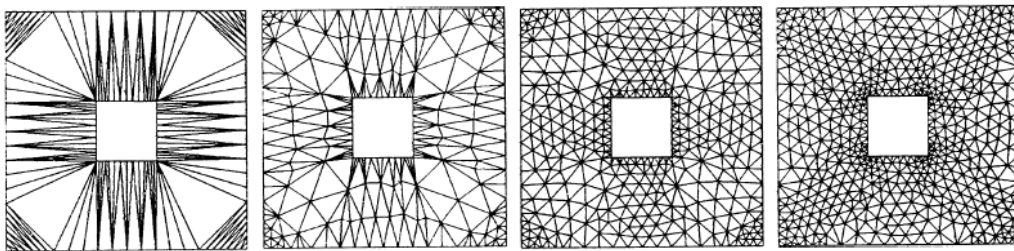


Figura 53 Evolución de una triangulación de Delaunay bidimensional [34]

El coste computacional de este tipo de técnicas, según [50], es $O(n \log(n))$, donde n

es el número de elementos, aunque otros autores han obtenido comportamientos lineales [51], [52], este último mediante el uso de estructuras de datos arbóreas que facilitan la localización de nodos o elementos vecinos. A este coste se debe añadir el necesario para la restauración del contorno, si así se precisa, y, en el caso volumétrico, la detección y corrección de los tetraedros que presenten una mala relación de aspecto.

4.4.2.2. Métodos de frente de avance

En este tipo de métodos la generación de la malla se realiza desde el contorno hacia el interior del dominio, siendo triángulos los elementos utilizados en el caso de dos dimensiones y tetraedros en problemas tridimensionales. Como datos de entrada se requieren los nodos y aristas (y caras en 3D) que forman el contorno del problema, es decir, una discretización poligonal (2D) o poliédrica (3D) de él, y un tamaño de elemento prescrito o una malla de referencia o función de densidad si se pretende generar una malla no uniforme [34].

El proceso de creación de la malla es iterativo: se analiza un frente, inicializado con los datos del contorno, para determinar una zona de partida desde la que se crean uno o varios elementos internos, junto con los correspondientes nodos y aristas (y caras en 3D). Seguidamente se actualiza el frente con los nuevos nodos y aristas generadas (y caras en 3D) y se repite el proceso hasta que el frente quede vacío, es decir, el dominio queda completamente mallado. Ésta es la filosofía general del método, pero su comportamiento viene determinado fundamentalmente por el análisis del frente y el criterio establecido en la creación de los nuevos elementos. Este criterio se basa en las características geométricas de las aristas (2D) o caras (3D) que lo constituyen y en la malla de referencia o función de densidad [53], [45], que controla la generación de la malla. En [23] se puede encontrar un sencillo ejemplo de criterio geométrico en dos dimensiones, según el cual, si α es el ángulo formado por dos aristas consecutivas del frente, se pueden identificar tres posibles situaciones:

- $\alpha < \pi/2$: se crea una arista y un elemento formado por ésta y las aristas que definen el ángulo α (figura 54a).
- $\pi/2 < \alpha < 2\pi/3$: a partir de las dos aristas con ángulo α se genera un nodo interno,

tres aristas y dos elementos (figura 54b).

- $\alpha > 2\pi/3$: se crea un punto interno, las dos aristas que forma éste con los nodos extremos de la arista del frente, y un elemento formado por estas tres aristas (figura 54c).

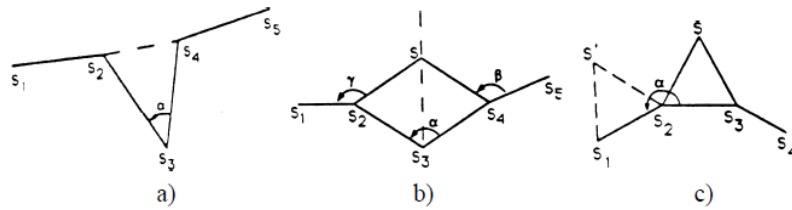


Figura 54 Tratamiento del frente de avance en mallas bidimensionales [34]

El coste computacional de este método viene determinado por las operaciones de búsqueda de partes del frente vecinas o próximas y las comprobaciones de pertenencia al dominio no mallado cuando un nodo es creado. La figura 55 muestra la evolución de una malla bidimensional obtenida con esta técnica.

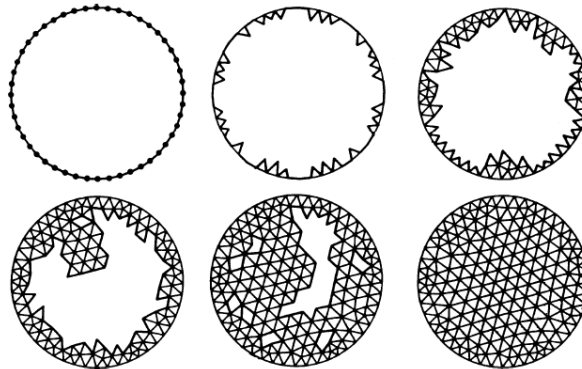


Figura 55 Evolución de la malla en el método de frente de avance [34]

4.4.2.3. Generación de mallas cuadriláteras y hexaédricas no estructuradas.

Como se comentó al comienzo de este capítulo, el elemento cuadrilátero o hexaédrico es inherente a las mallas estructuradas, pudiendo, mediante la división de éstos en dos triángulos o en 5 o 6 tetraedros, respectivamente, obtener las correspondientes mallas triangulares o tetraédricas. Como se ha visto, los principales métodos de generación de mallas no estructuradas emplean el elemento triangular o tetraédrico. La generación de mallas no estructuradas cuadriláteras o hexaédricas requiere técnicas más complejas y no siempre son realizables.

La figura 56 muestra una malla no estructurada compuesta únicamente por elementos cuadriláteros y otra hexaédrica.

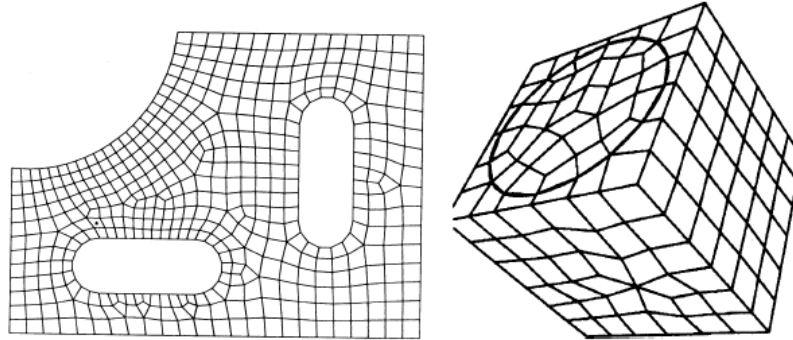


Figura 56 Mallas no estructuradas cuadriláteras y hexaédricas [34]

Existen fundamentalmente dos formas de obtener este tipo de mallas [26]: Mediante técnicas directas y técnicas indirectas. En las indirectas, en una primera fase se discretiza el dominio con triángulos o tetraedros, y posteriormente éstos son transformados en cuadriláteros o hexaedros. Estas transformaciones, en el caso bidimensional, se basan normalmente en la descomposición del triángulo en tres cuadriláteros, en la eliminación de la arista común entre pares de triángulos, en ambas, o en otras estrategias más complejas como, por ejemplo, la eliminación de aristas compartidas por triángulos que tengan un nodo común y que formen un contorno cuadrilátero [54]. En el caso volumétrico, los métodos indirectos se basan fundamentalmente en la descomposición de cada tetraedro en cuatro hexaedros.

4.4.2.4. Metodología multibloque

En los apartados anteriores se han enumerado las distintas técnicas que permiten la discretización de un dominio dado. El éxito en la generación de la mallas dependerá tanto de la robustez del método escogido como de la complejidad de la geometría. La metodología multibloque representa una solución para la creación de mallas de geometrías complejas para las que los métodos descritos previamente no generan resultados satisfactorios o fallan. La idea básica consiste en la división del dominio en bloques de topología más sencilla. Cada bloque de esta partición se procesa posteriormente con alguna de las técnicas descritas en los puntos anteriores. La malla de todo el dominio se

obtiene uniendo las mallas de cada uno de los bloques. Como muestra la figura 57, esta metodología permite la discretización de geometrías relativamente complejas con métodos sencillos. Además, en muchas ocasiones, este tratamiento del dominio es obligado, pues la mayoría de los problemas presenta zonas con distintas propiedades o condiciones de contorno. En tal caso, cada una de estas zonas debe ser definida como un bloque autónomo con el fin de que los componentes de la malla que se generen en él tras la discretización hereden sus propiedades.

Esta técnica presenta dos dificultades fundamentales:

- La creación de los bloques adecuados, pues la malla final depende de la elección de éstos.
- La gestión de los bloques y su relación con los demás (interfaces) para asegurar la correcta unión de sus mallas [55]. En este sentido, es crucial que las líneas (2D) y las superficies (3D) pertenecientes a distintos bloques presenten una única discretización.

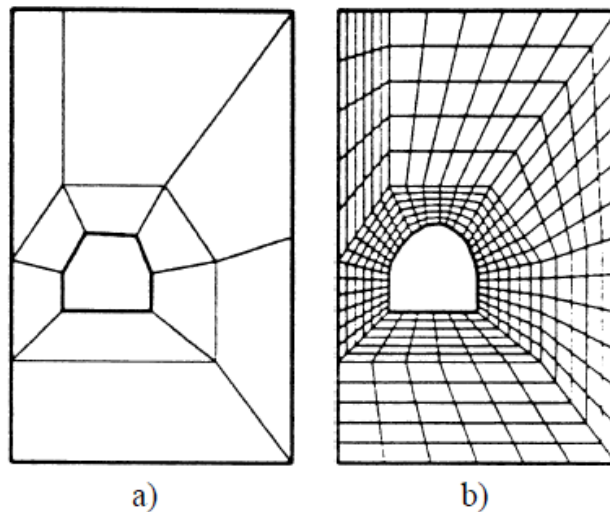


Figura 57 Generación de malla multibloque: a) Descomposición inicial, b) Malla final [34]

La utilización de distintos bloques hace posible que en un problema se puedan utilizar mallas estructuradas y no estructuradas [56]. Esta clase de malla es conocida como híbrida y se utiliza fundamentalmente en problemas de dinámica de fluidos. En estos casos, la zona cercana al cuerpo introducido en el fluido es discretizada de forma estructurada, y para el resto del espacio se emplea una malla no estructurada.

4.5. Mallado de la estructura

Se procede entonces con el mallado de la estructura. Primero se generará una malla por defecto de ANSYS, así se podrá establecer en principio y de acuerdo a la aplicación de las distintas herramientas del software junto con la utilización de las metodologías de mallado que mas convengan para este caso, la mejor malla en función de las necesidades específicas y la cantidad de nodos que aseguren una discretización completa del dominio, se tratara de estructurar la malla dada por defecto, hasta obtener la mejor relación de rendimiento en especificaciones de esta, esto se analizará con las diferentes métricas o medidas de la eficiencia de un mallado en particular.

La figura 58 muestra la generación de malla por defecto que arroja el software.

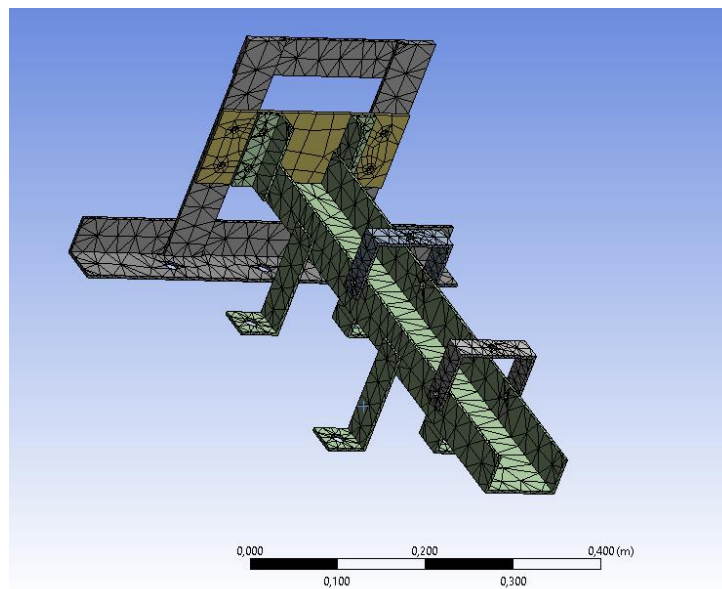


Figura 58 Malla por defecto de ANSYS

Es claro que la calidad del mallado por defecto no representa grandes garantías como para su utilización, puesto que no tiene el refinamiento adecuado, las métricas de importancia como lo son la relación de aspecto, calidad del elemento, máximo ángulo de esquina, sesgo, entre otras, no brindan las garantía requeridas, esto se debe principalmente a que por defecto el software utilizó el mallado adaptativo, lo que corresponde a una distribución de elementos en su mayoría tetraédricos sobre el dominio que tratan de ajustarse al contorno de forma homogénea, por lo que puntos de sujeción o partes de la estructura con

zonas de geometría compleja no son tratadas con minuciosidad. En la figura 59 se puede observar la métrica correspondiente a la calidad del elemento, en la cual se puede apreciar la preponderancia de elementos tetraédricos.

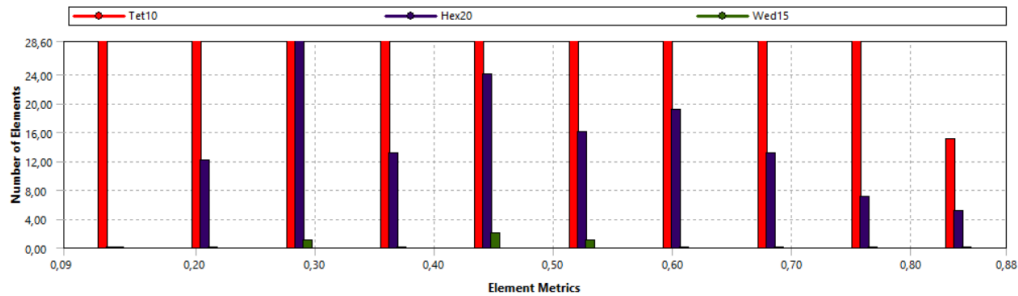


Figura 59 Calidad del elemento en malla generada por defecto

Aparte de la calidad del elemento, la relación de aspecto es otro parámetro de importancia en mallados para análisis de estructuras, ya que esta representa que tan alejados están los elementos actuales, del tipo de elemento ideal que se debería de tener en el dominio. La métrica correspondiente a este parámetro se muestra en la figura 60.

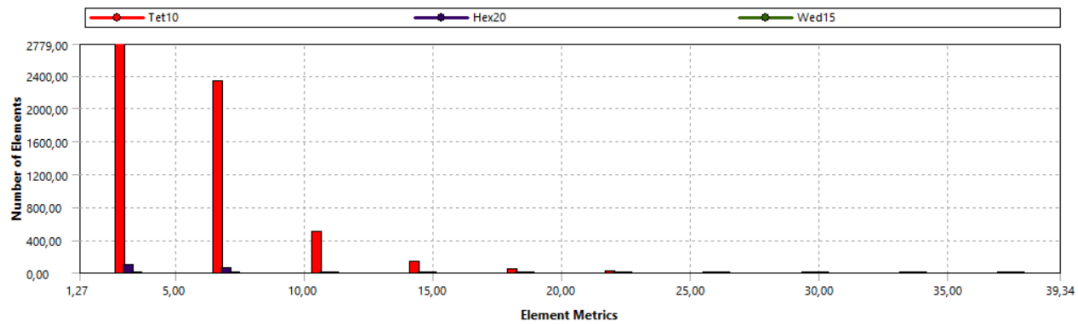


Figura 60 Relación de aspecto en malla generada por defecto

Este tipo de malla, como mencionó con anterioridad pertenecen al tipo de mallado no estructurado y es claro que la herramienta hace uso (entre otras cosas), de la metodología de Delaunay-Voronoi y de frente de avance, lo que a la postre produce un colapso de la malla sobre el dominio al verse obligada a realizar ajustes con elementos no conformes sobre la sección del dominio a discretizar. Aunque haciendo uso herramientas de mallado, es posible hacer mejoras, como se muestra en la figura 61.

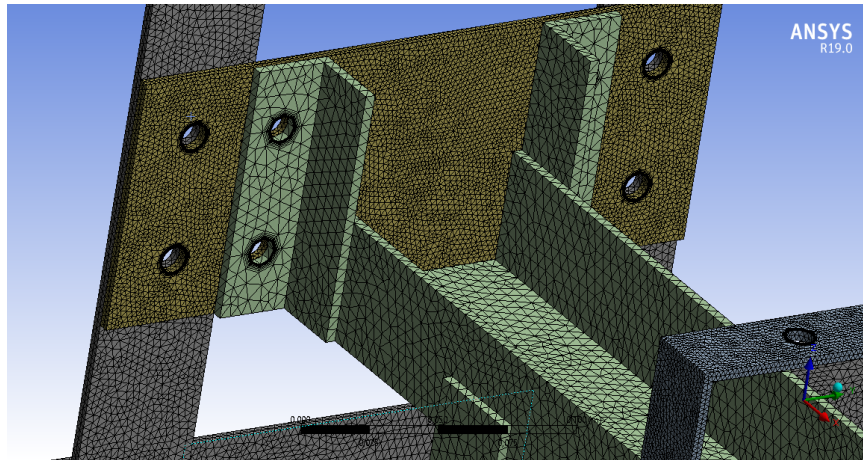


Figura 61 Aplicación de técnicas de mallado avanzadas. Elementos tetraédricos.

Importante aquí notar la cantidad de elementos necesarios para mallar una geometría en teoría simple, además de eso, fue de especial interés enfocar la metodología hacia los puntos del dominio en los cuales se tuvieran orificios que bien pueden funcionar como concentradores de esfuerzos cuando la estructura sea sometida a cargas estáticas o dinámicas. Haciendo uso de la herramienta “inflation”, se enmarca el contorno de los orificios con la finalidad de obtener más precisión en esos puntos.

En la figura 62 se muestra el mallado final de la estructura haciendo uso de las metodologías de mallado no estructurado, y de técnicas de mallado avanzado en ANSYS para elementos tetraédricos.

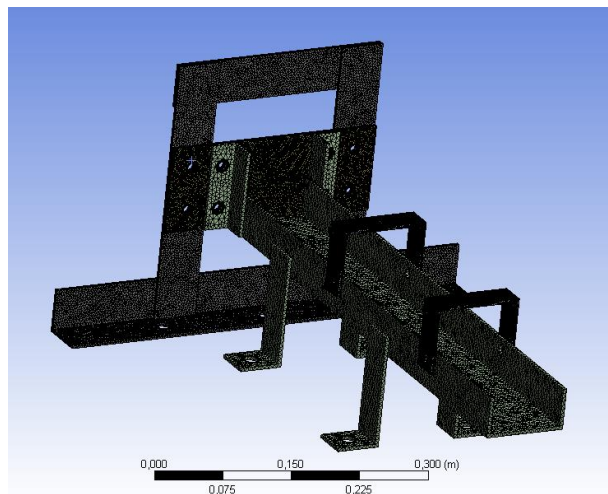


Figura 62 Malla con elementos tetraédricos

La razón por la cual se procede a hacer una descripción de este tipo de mallado es debido a la facilidad que puede obtenerse al utilizarlo para definir geometrías complejas, ya que

la calidad de malla deseada dependiendo del objetivo de estudio es más fácil de obtener con estos elementos. Aparte de eso, la definición de la malla mediante el método “*Patch conforming*” permite que este se concentre en detalles específicos de la geometría que podrían resultar de interés como lo son cambios de sección transversal en el dominio, bordes, entre otras secciones del volumen que requieran especial atención. Como se ha mencionado, estos hacen uso del mallado de Delaunay, con una tasa de crecimiento suave, lo que conlleva a una mayor cantidad de elementos en la geometría.

En la figura 63 y 64 se muestran las métricas correspondientes a la calidad del elemento y relación de aspecto, del mallado tetraédrico.

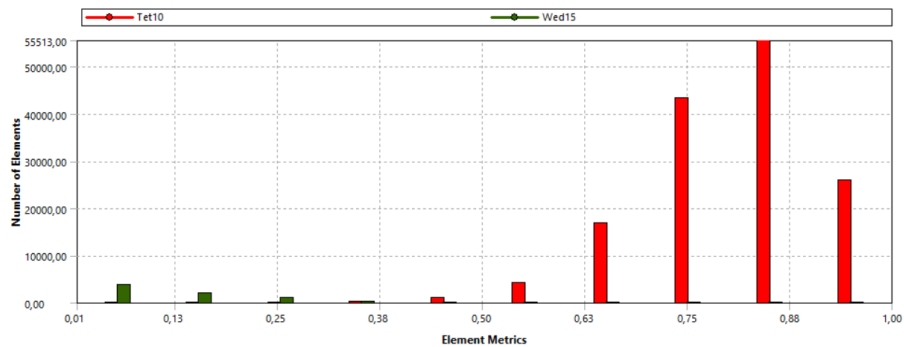


Figura 63 Calidad del elemento en mallado con refinamiento

Como se ha mencionado la calidad del elemento es de suma importancia en cuanto a la calidad de la malla deseada y por tanto puede afectar la solución del problema, como podemos observar con el mallado llevado a cabo, y las distintas condiciones impuestas en la geometría se tiene que la mayoría de los elementos se encuentran entre 0.50 y 1, recordemos que entre más cercano a uno sea este parámetro significara que los elementos tenderán a ser mas regulares en el dominio. Los elementos para tener en cuenta y corregir si es posible dependiendo de la geometría son aquellos que presentan calidades de malla inferiores a 0.25 que para este caso se considera no es un valor significativo, ya que los elementos en esta condiciones como se verá no están en puntos de interés particular para el análisis.

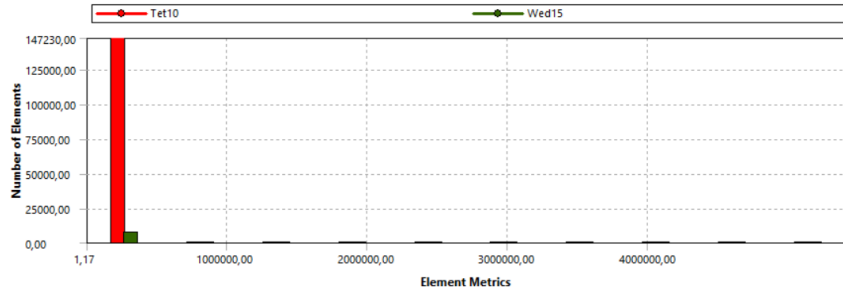


Figura 64 Relación de aspecto de los elementos

Por otro lado, como se puede observar la relación de aspecto en este caso no es la mejor, presenta dificultades, puesto que este parámetro indica que tan distintos son los lados que conforman el tetraedro, una relación de aspecto como la que tenemos presenta problemas en la mayoría de los elementos utilizados para discretizar el dominio. La relación de aspecto ideal es de 1, y valores por encima de 10 ya pueden representar problemas en la interpolación de la variable física en el dominio.

Entrando a evaluar parámetros de calidad de malla que puedan afectar la precisión de los resultados, es de interés entonces el máximo ángulo de esquina el cual es una medida el cual establece el valor del ángulo entre dos lados adyacentes. Para esta métrica de malla, un valor de 60° es lo ideal, valores por encima de 150° , pueden significar errores de interpolación importantes. El comportamiento de los elementos en cuanto a esta métrica se muestra en la figura 65.

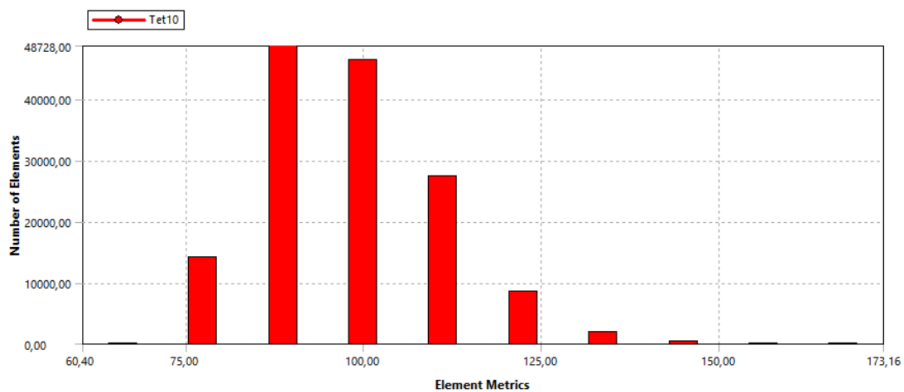


Figura 65 Máximo ángulo de esquina en los elementos del dominio

Por último se evalúa el parámetro correspondiente al sesgo de los elementos el cual es una medida importante ya que establece el nivel de degeneración de los elementos. Para esta métrica un valor de 0 corresponde a elementos perfectos (muy difíciles de obtener en

mallado tetraédrico), y un valor de 1 a un elemento totalmente degenerado. Como se puede observar en la figura 66 que corresponde a esta métrica, los valores de sesgo para diferentes puntos del volumen discretizado presentan un comportamiento adecuado con la mayoría de ellos entre 0.13 y 0.38, lo cual indica que los elementos tienden a conservar cierto nivel de regularidad en el dominio discretizado.

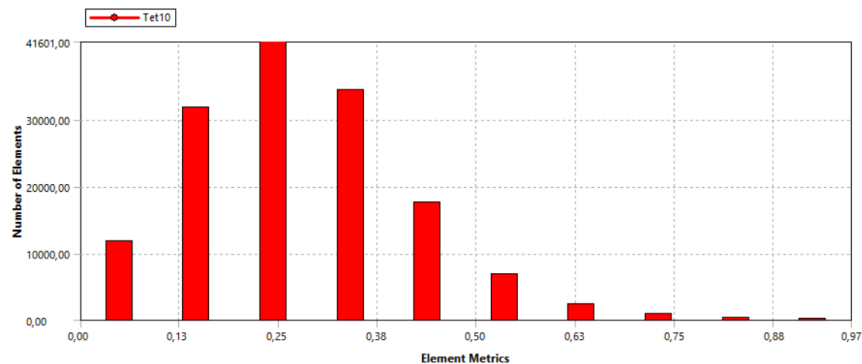


Figura 66 sesgo de los elementos en el dominio

Ahora bien, los elementos tetraédricos son convenientes cuando tenemos geometría complejas, aunque la complejidad de una geometría dependerá de la construcción hecha en los software de diseño (en este caso particular CATIA).

Ya se expuso las ventajas y una primer aproximación al rendimiento que ofrece la metodología de mallado no estructurado, ahora se analizaran con objeto de comparación la metodología de mallado estructurado, en la que se observa la construcción de elementos hexaédricos en el dominio. En la figura 67, se muestra una sección del banco de pruebas con la aplicación de técnicas de mallado estructurado (elementos hexaédricos).

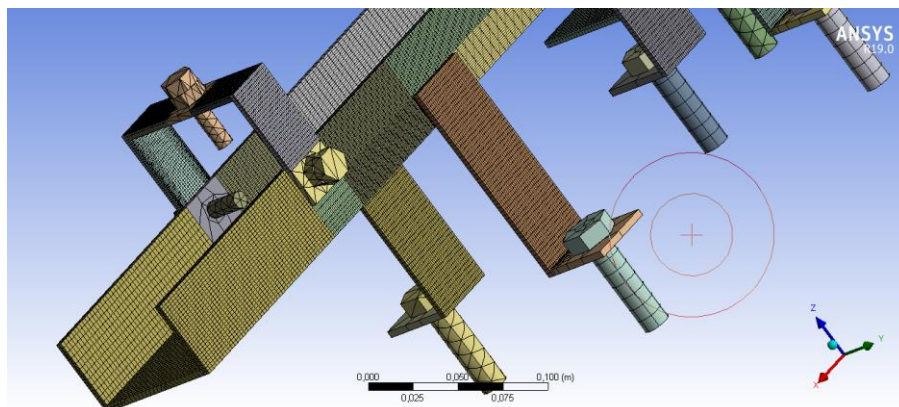


Figura 67 Métodos de mallado estructurado, mediando elementos hexaédricos

Después de llevar a cabo la discretización de la mayor parte de la estructura haciendo uso

de técnicas de mallado estructurado, discretizando el dominio con elementos hexaédricos, y si bien las características de la malla en cuanto a la optimización topológica y la correspondiente reducción de los elementos son buenas, se hace necesario dependiendo del diseño de la geometría, subdividir el dominio en pequeños subdominios de geometrías no complejas para poder generar mallas hexaédricas que se ajusten a los contornos definidos, y estos presentan cierta dificultad cuando se tienen pernos, o uniones, debido a que las condiciones de contacto impuestas, no permiten una fácil discretización de las topologías curvas y se hace necesario darle un tratamiento diferente. En la figura 68 se muestra la malla generada en las zonas en las cuales existen pernos o uniones, en este caso de sujeción entre elementos de la estructura.

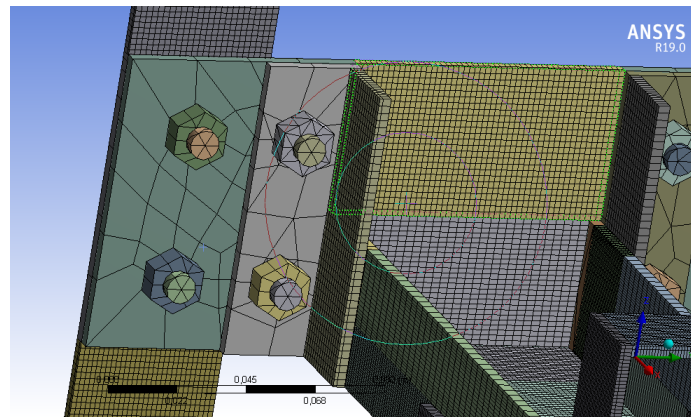


Figura 68 Discretización del dominio en zonas con curvatura

Si bien la mayor parte del volumen se discretizó de forma correcta haciendo uso de las técnicas de mallado estructuradas, lo correspondiente a las zonas en las cuales se tienen pernos o uniones deberán ser tratadas con mayor cuidado. La figura 69 muestra una sección de la estructurada con mallado hexaédrico.

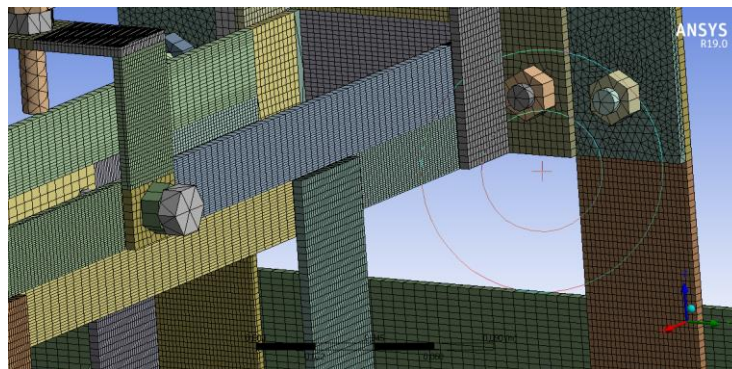


Figura 69 Mallado hexaédrico y optimización topológica del dominio

Ahora, se hará un análisis de las métricas obtenidas en el mallado, desde la cantidad de

elementos, pasando por la relación de aspecto, y por último analizando el sesgo de esta.

En la figura 70 se muestra la métrica correspondiente a la calidad de los elementos hexaédricos en el dominio, como se puede observar, la necesidad de hacer particiones del dominio, generó problemas con la calidad del mismo de nuevo encontramos que los elementos hexaédricos que discretizan el dominio se encuentran entre 0,5 y 1 lo que representa una buena calidad de estos, pero no la mejor, ya que también se ven elementos con calidad entre 0 y 0,1 lo que representa elementos que pueden afectar la matriz de rigidez global de la formulación. Al tener estos comportamientos se recomienda observar que tan significativo es la cantidad de elementos que presentan calidad inferior a 0,25 y si afectará en gran medida o no solución del problema. Ya que lograr el acople de los elementos para lograr la simetría deseada de las diferentes geometrías que conformaban el nuevo dominio (hubiese requerido más trabajo y a la postre un costo computacional más elevado) la calidad de los elementos también se ve disminuida debido a que el sistema se vio forzado a incluir en el proceso de discretización elementos tetraédricos en las zonas en las cuales existen puntos de sujeción, pernos de guía y de anclaje.

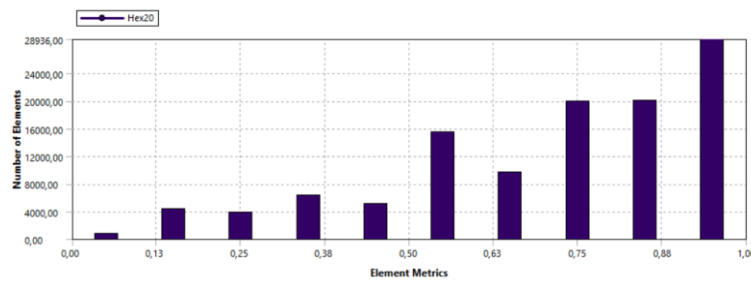


Figura 70 Calidad de elementos hexaédricos en la malla

En la figura 71 se observa la métrica correspondiente a la relación de aspecto de los elementos. En esta caso la relación de aspecto de la mayor cantidad de elementos tuvo un valor de 38, teniendo en cuenta la cantidad de elementos y la forma en la cual se subdividió el dominio y luego se discretizó, era un resultado esperado, debido a que existen zonas en el dominio que el software malló con elementos tetraédricos debido a las condiciones particulares de la geometría contigua. Ya que esta relación tiene un valor superior a 10, que es lo recomendado, sería necesario entrar a revisar los elementos en los cuales los lados del hexaedro que discretizan el dominio evaluar su cantidad, y mejorarlos con alguna técnica de mallado o la subdivisión del dominio.

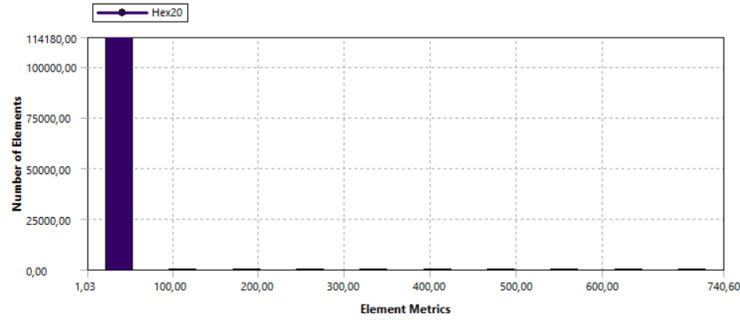


Figura 71 Relación de aspecto elementos hexaédricos

La métrica correspondiente al máximo ángulo esquina en los elementos, figura 72. Se observa se encuentra dentro del rango recomendable (entre 60° y 150°), la mayoría de los elementos se encuentran en un valor determinado de $89,4^\circ$, teniendo en cuenta que el valor ideal para este parámetro es 60° , podemos ver que aunque no son los elementos con mejor comportamiento, si es posible llegar a una buena aproximación de la solución con estos.

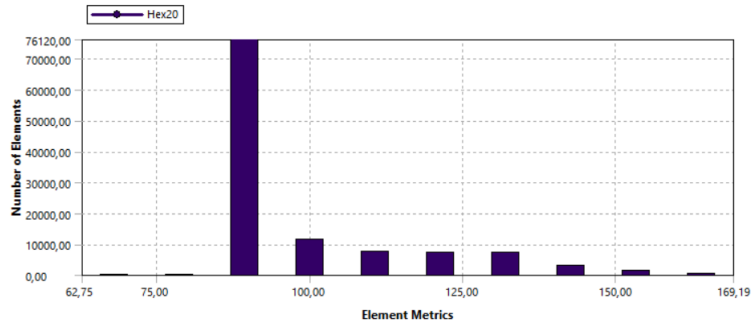


Figura 72 Máximo ángulo de esquina de los elementos hexaédricos

En la figura 72, se observan una sección del banco de pruebas donde se pueden ver la forma de los elementos con un ángulo esquina máximo de $89,4^\circ$.

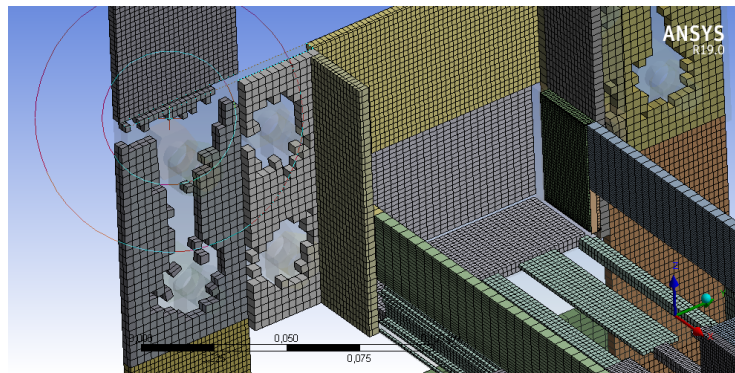


Figura 73 Elementos con ángulo de esquina de $89,4^\circ$ en el dominio

Por último en la figura 74 encontraremos la métrica correspondiente al sesgo de los

elementos que conforman la discretización del dominio.

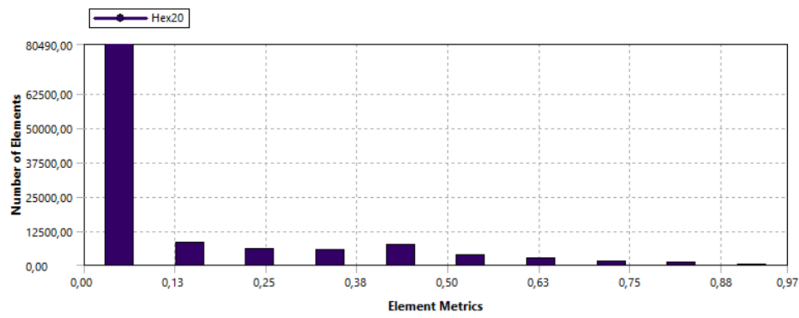


Figura 74 Sesgo de los elementos hexaédricos

Para esta métrica el comportamiento ideal como se ha mencionado con anterioridad es 0, lo que corresponde a un nivel mínimo de degeneración de estos en el dominio, aquí se puede observar que la mayor parte de los elementos de la malla poseen un sesgo de 0,0482 lo que corresponde a un buen comportamiento de estos en cuanto al nivel de sesgo que presentan. En la figura 75 se puede observar el sesgo de los elementos que componen el mallado.

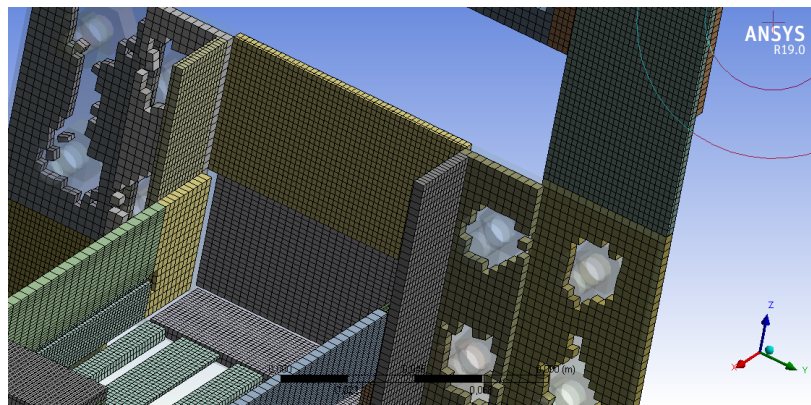


Figura 75 Elementos con sesgo de 0,0482 en el dominio

5. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

La idea principal de haber realizado en el capítulo anterior una comparativa de las métricas correspondientes al mallado de la estructura con elementos tetraédricos y hexaédricos, es decir, haciendo uso de las metodologías de mallado estructurado y no estructurado, era conocer cuál de las dos entregaba el mejor rendimiento, teniendo en cuenta el costo computacional, tiempo y trabajo requerido para lograr un rendimiento aceptable en todos los parámetros. Después de haber analizado ambos mallados, la cantidad de elementos generados y el rendimiento que las métricas dieron se decidió para la simulación de la estructura, mallar con elementos tetraédricos. Esto debido a que la cantidad de elementos generados por ambos métodos fue superior a 150.000, lo que se busca con la implementación de mallado hexaédrico es reducir la cantidad de elementos necesarios y por ende la capacidad computacional necesaria para llevar a cabo la simulación.

En ese orden de ideas, debido a la necesidad de subdividir el dominio, se terminaron generando una mayor cantidad de elementos hexaédricos que los esperados, y representó para este caso en específico una ventaja menor a la esperada respecto del mallado no estructurado con elementos tetraédricos, aparte del tiempo necesario en el proceso de mallado para la realización de la partición del dominio, lo que para no representar grandes ventajas no es del todo provechoso. Por ende, la simulación final se realizará con la metodología de mallado no estructurado haciendo uso de elementos tetraédricos, y el objetivo principal será conocer la deformación y los esfuerzos máximos generados en puntos específicos de la estructura, en especial la sección de placa de acero estructural que soportará el empuje generado por el motor.

5.1 Simulación con mallado tetraédrico

Se realiza entonces la primera simulación, este es un paso importante en cualquier proceso de análisis estructural puesto que brindará los primeros resultados del comportamiento de la estructura frente a las cargas impuestas. En la figura 76 se muestra el mallado con elementos tetraédricos sobre la estructura.

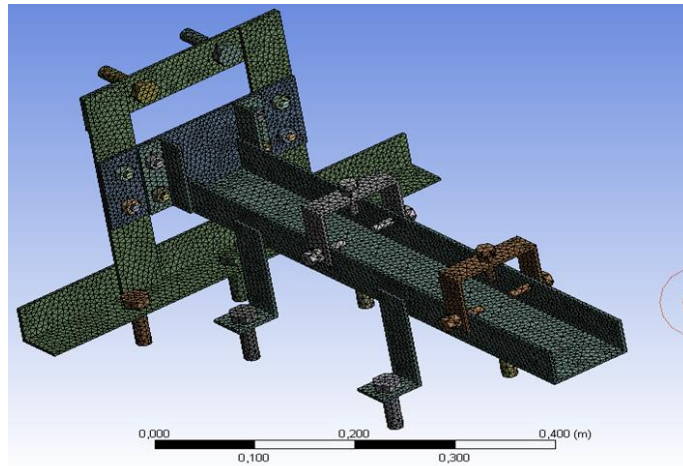


Figura 76 Malla tetraédrico de la estructura

Se sigue un proceso de mallado no estructurado con elementos tetraédricos sobre todo el dominio, por las razones mencionadas en el capítulo anterior. En las figuras 77 a 80 se muestra el mallado de la estructura y las métricas correspondientes a calidad del elemento, relación de aspecto, máximo ángulo de esquina y sesgo respectivamente, de los elementos que conforman la malla.

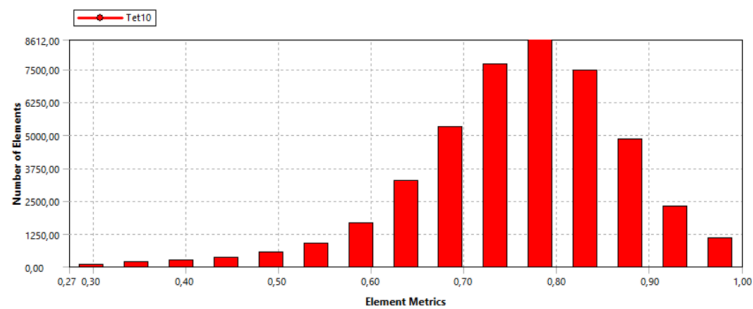


Figura 77 Calidad de los elementos

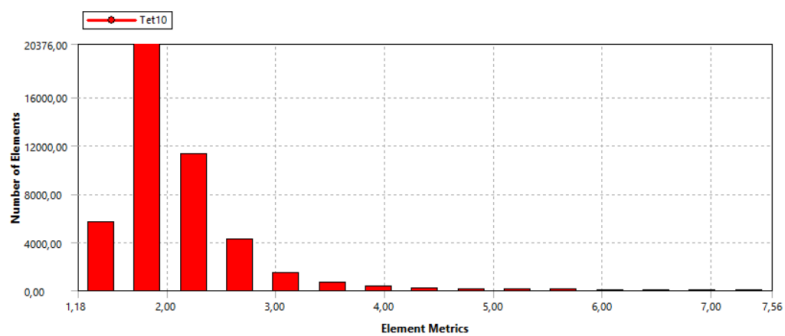


Figura 78 Relación de aspecto de los elementos

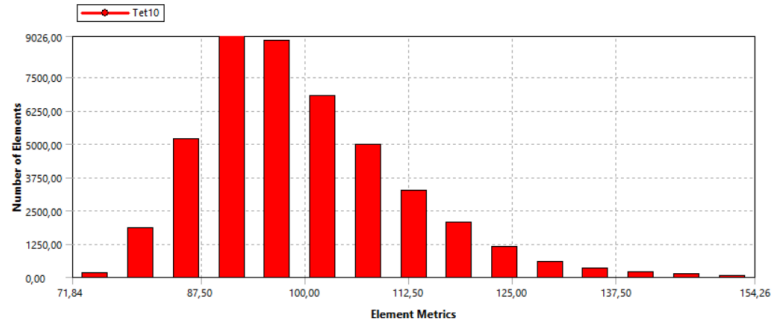


Figura 79 Máximo ángulo de esquina

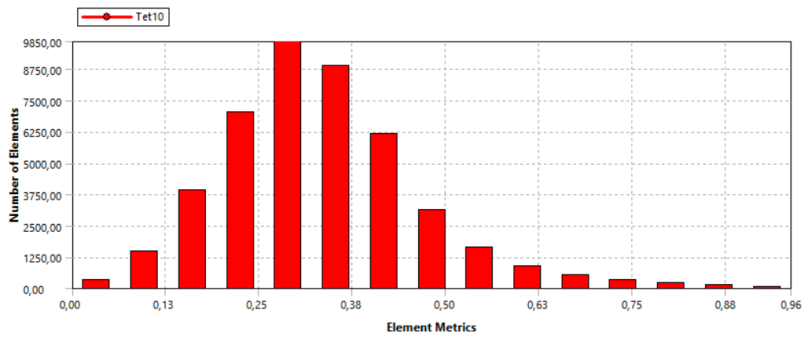


Figura 80 Sesgo de los elementos

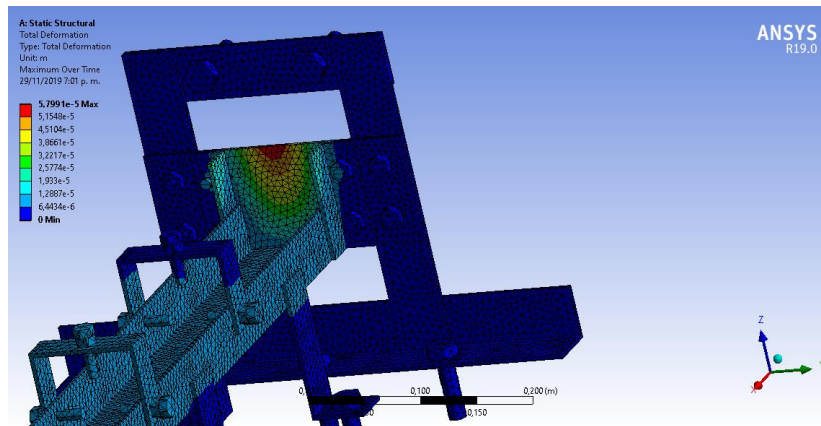


Figura 81 Deformación total en el punto de aplicación de la carga

El objetivo de esta primera simulación es conocer de qué forma se comporta la estructura a la fuerza de empuje generada por el motor cohete tipo L. En la figura 81, se muestra el campo de deformación total sobre la placa de la sección central, de 250x100 mm con 4 mm de espesor, cuyo valor fue de $5,7991 \times 10^{-5}$ m en la zona superior de la placa de la sección central de la estructura, lo que establece un nivel de deformación aceptable.

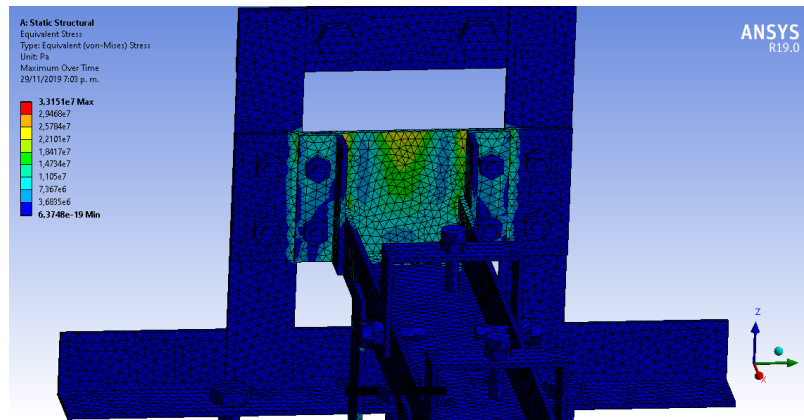


Figura 82 Esfuerzo equivalente (Von Mises) en el punto de aplicación de la carga

Por otra parte, en la figura 82 se muestra el valor correspondiente al esfuerzo equivalente de Von Mises. El resultado obtenido para este parámetro es de $3,3151 \times 10^7$ Pa, se ve entonces que la estructura completa del banco de pruebas, bajo las cargas a las cuales se sometería cumple con los requerimientos para los cuales fue diseñado, el cumplimiento de estos se determina mediante el factor de seguridad mínimo de la estructura, cuyo valor es de 7,5412, y está ubicado en el punto en el cual se tiene el mayor valor de esfuerzo. Como se muestra en la figura 83.

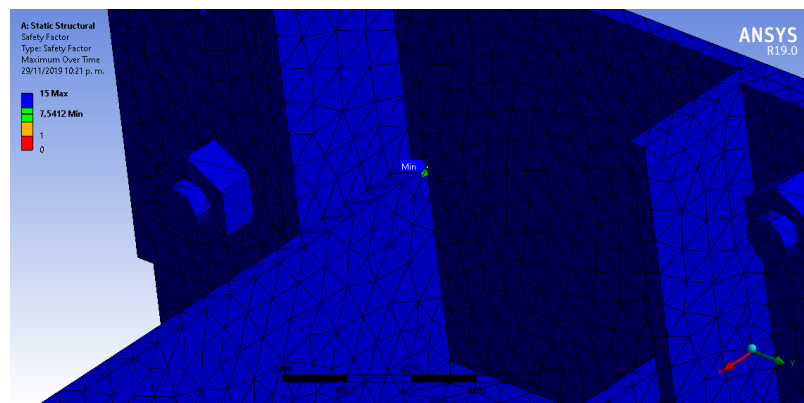


Figura 83 Punto de la estructura en el cual se tiene el factor de seguridad mínimo

Si bien el banco de pruebas cumple con los requerimientos para los cuales fue diseñado, se llevará a cabo un proceso de refinamiento de malla, en el cual mediante la utilización de técnicas de mallado avanzado se aumentará la cantidad de elementos con los cuales se discretiza el dominio, en busca de más precisión en los resultados. Además, se decide aumentar el espesor de la placa de la sección central de 4 mm a 10 mm, esto atendiendo a la necesidad de entregar una estructura mucho más rígida y resistente en caso de que se produzca una reacción inestable de los motores cohete a probar.

El mallado final de la estructura del banco de pruebas se muestra en la figura 84, que como se mencionó anteriormente por razones de capacidad computacional, agilidad en el mallado y prestaciones en cuanto al rendimiento y precisión de la simulación se seleccionó por encima del mallado con elementos hexaédricos para este caso en particular.

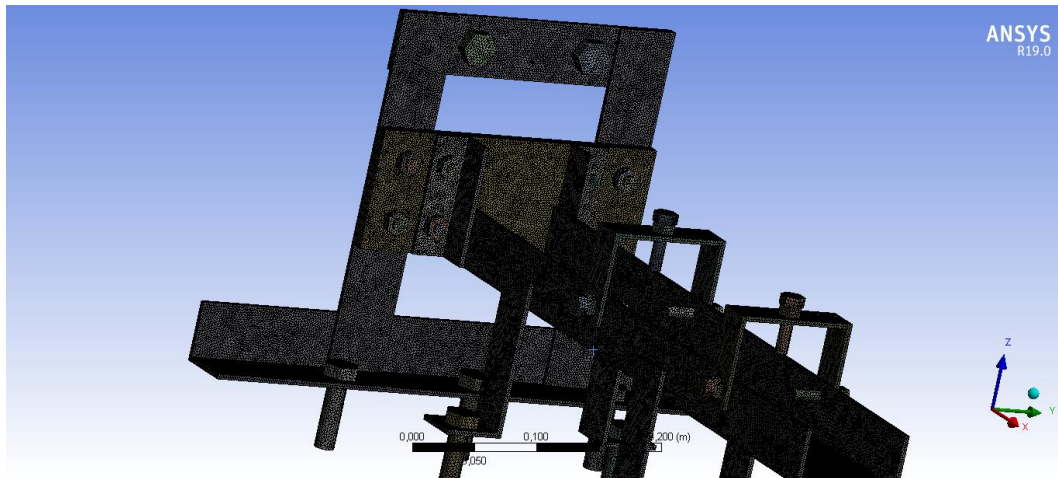


Figura 84 Mallado de la estructura con elementos tetraédricos

Posteriormente se entra a evaluar la métrica correspondiente a la calidad de los elementos.

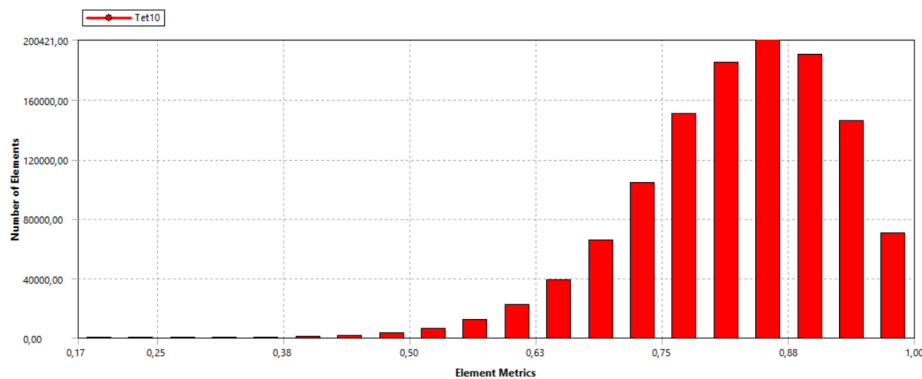


Figura 85 Calidad de los elementos

Se observa en la figura 85, como la discretización del dominio indica un buen comportamiento en cuanto a la calidad de los elementos, estando la mayoría de ellos entre 0,63 y 0,88 lo que corresponde a elementos de buena calidad en la mayor parte del volumen del banco de pruebas y por ende arrojará buenas resultados en la resolución. Entrando a analizar los elementos con calidad del elemento inferiores a 0,25, se ve que corresponden a tan solo 17 elementos de una cantidad total de 1'195.719, lo que corresponde a un 0,0014% de la cantidad total de elementos que conforman la

discretización del dominio.

En la figura 86 se observan los elementos que corresponden a este porcentaje. Se define entonces para efectos del presente análisis que no son representativos para la solución.

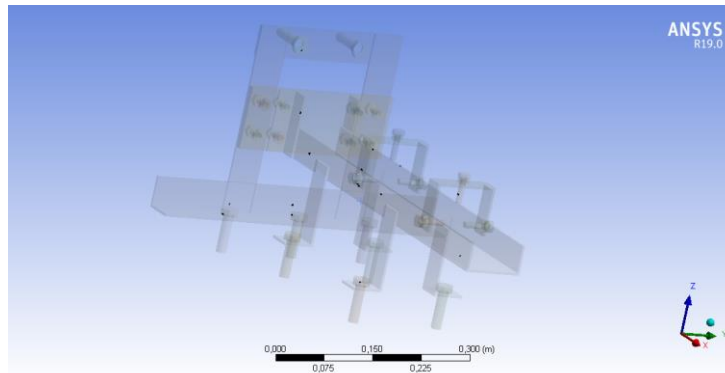


Figura 86 Elementos calidad inferior a 0,2

En la figura 87 se muestra la métrica correspondiente a la relación de aspecto, como se mencionó antes, este parámetro es muy importante en el desarrollo de los análisis por elementos finitos, ya que puede causar problemas de interpolación directas sobre la metodología de resolución de las EDPs.

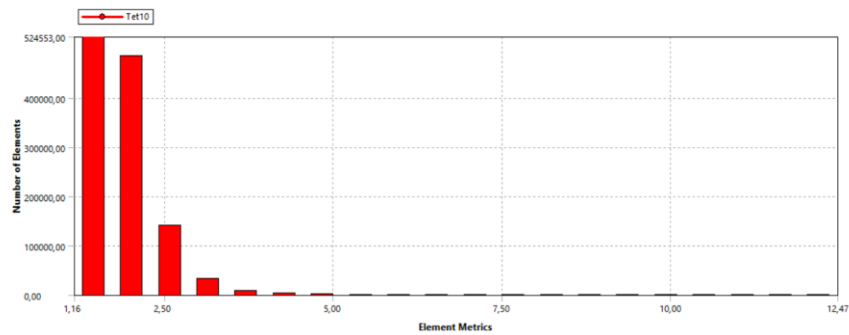


Figura 87 Relación de aspecto

Se ve que el comportamiento de esta métrica ofrece excelentes resultados respecto de la malla actual, dando como resultado que la mayor cantidad de los elementos se encuentra entre 1,16 y 2,50; esto como se había mencionado antes significa que los elementos del mallado actual presentan similitud a lo largo de todo el dominio. Se evaluará la cantidad de elementos que tenga una relación de aspecto superior a 10 y se procederá a definir si son significativos o no. Esto lo podremos observar en la figura 88.

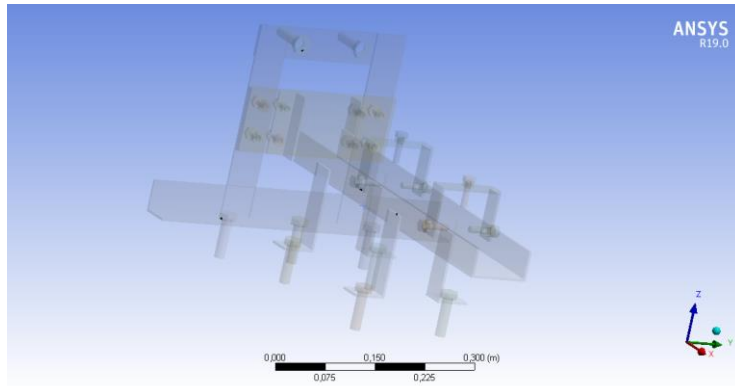


Figura 88 elementos con relación de aspecto mayor a 10

Se observa que los elementos con relación de aspecto mayor a 10, son 4 lo que representa un 0,00033% de la totalidad de los elementos que conforman la discretización del dominio, por lo que se define que no presentan significancia para el análisis.

El máximo ángulo de esquina, métrica mostrada en la figura 89. Correspondiente a la mayor cantidad de los elementos en el dominio se encuentra en un rango de entre $77,7^\circ$ y 124° , lo que corresponde a un comportamiento aceptable de la discretización, ya que el máximo ángulo permitido es de 150° . De nuevo, se debe entrar a analizar si los elementos que corresponde a un valor mayor al recomendado presentan o no significancia en cuanto a la totalidad de los elementos que definen la estructura.

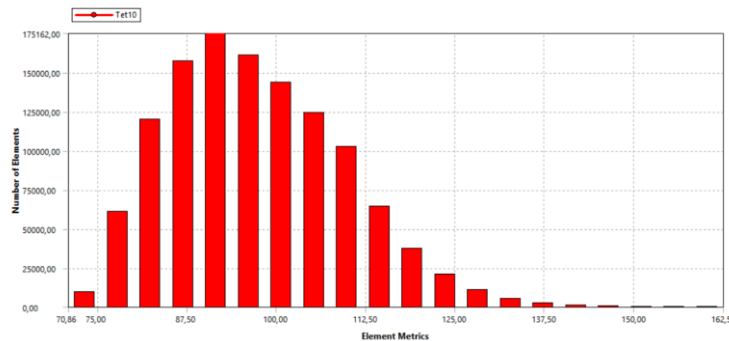


Figura 89 Máximo ángulo de esquina

De la totalidad de elementos 103 se encuentran con un ángulo mayor a 150° , figura 90. Lo que corresponde al 0,0086% de los elementos presentes en el dominio, por lo tanto se define que no presentan gran significancia para el análisis y no afectarán en sobremanera las funciones de interpolación de la formulación matemática.

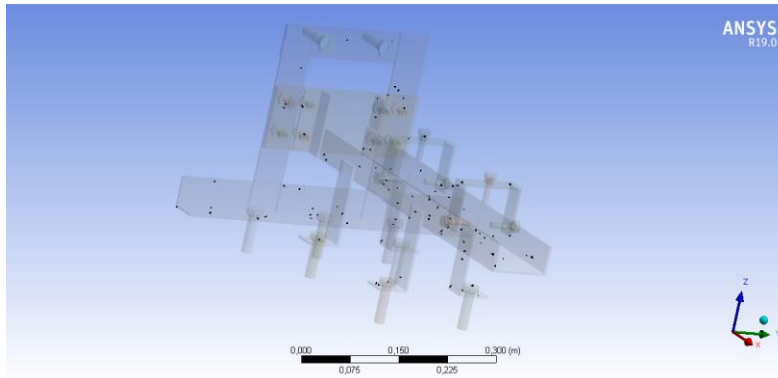


Figura 90 Elementos con máximo ángulo de esquina superior a 150°

Por último, veremos la métrica correspondiente al sesgo de los elementos, figura 91. De los presentes en el mallado.

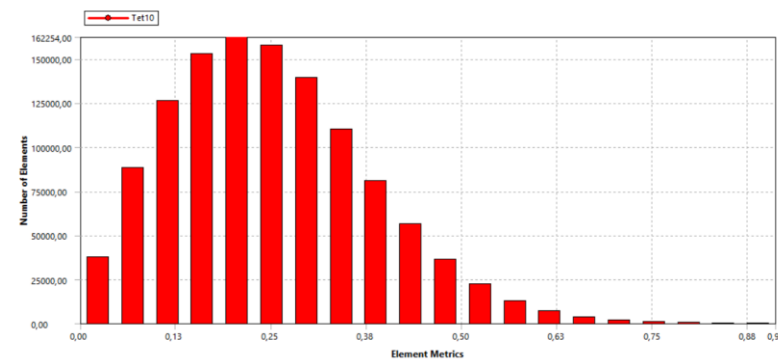


Figura 91 Sesgo de los elementos

Se puede observar entonces que la mayoría de los elementos se encuentran en un rango de entre 0 y 0,50, lo que según la clasificación de los elementos tetraédricos por el valor del sesgo dado en la tabla 11 corresponde a valores de entre ideal y bueno. Teniendo en cuenta este comportamiento presentado por la malla, y viendo que muy pocos elementos tienen un nivel de degeneración preocupante, se decide dejar la malla con las características actuales y proceder con le implementación de la simulación.

Valor del sesgo	Clasificación del elemento
0	Ideal
>0 - 0.25	Excelente
0.25 - 0.5	Bueno
0.5 - 0.75	Moderado
0.75 - 0.9	Pobre

0.9 - <1	Malo
1	Degenerado

Tabla 11 Clasificación de los elementos tetraédricos según el valor del sesgo

Será de importancia entonces conocer la distribución de esfuerzos sobre la superficie de la placa que soportará la fuerza de empuje generada por el motor, para esto, la fuerza utilizada en la superficie de la placa será la fuerza de empuje máxima generada por el motor tipo L, multiplicada por un valor de 1,5 que corresponde al factor de seguridad seleccionado. Antes de llevar a cabo la simulación, corresponde seleccionar los puntos o superficies que serán soportes fijos, estos estarán definidos por la configuración y posicionamiento que se planteó para el mismo. Tal y como se muestra en la figura 92.

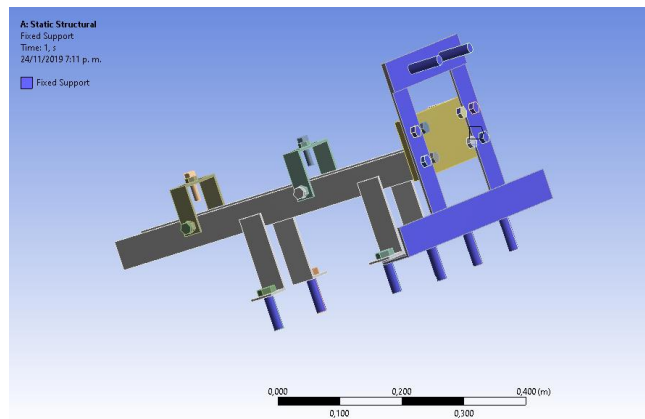


Figura 92 Superficies de soporte fijo en el banco de pruebas

Después de haber definido esto, lo siguiente es ubicar la fuerza en la zona de interés. Como se muestra en la figura 93.

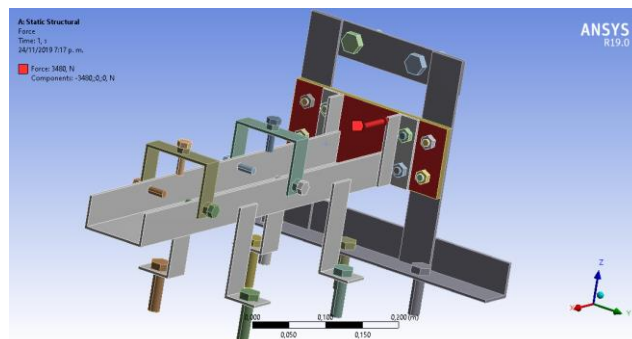


Figura 93 Ubicación fuerza de empuje

Impuestas las condiciones de operación a las cuales se verá sometido el banco de pruebas, se procede con la simulación en la cual la fuerza es aplicada de forma constante, en un paso de tiempo, se hace con objeto de llevar la estructura al punto de operación crítico,

puesto que la fuerza sería máxima siempre, y en los motores cohetes el empuje tiene un aumento gradual, lo que implica que los esfuerzos y deformaciones dados en la estructura serán menores. Los resultados obtenidos de la misma se presentan a continuación. Dos parámetros de interés serán estudiados en la estructura. La deformación total, y el esfuerzo equivalente de Von-Mises. El primer parámetro de importancia resulta ser la deformación total de la estructura en la zona de interés, figura 94. En este caso la placa que soporta el empuje generado por el motor cohete. Observando los resultados de la simulación se encuentra que la deformación máxima presente en la placa corresponde a un valor de $7,699e-6$ m, encontrándose en la parte superior de esta, por otra parte existen varios niveles de deformación a lo largo de la estructura que soporta el cohete, esto debido a los pernos de sujeción que también soportan niveles de fricción.

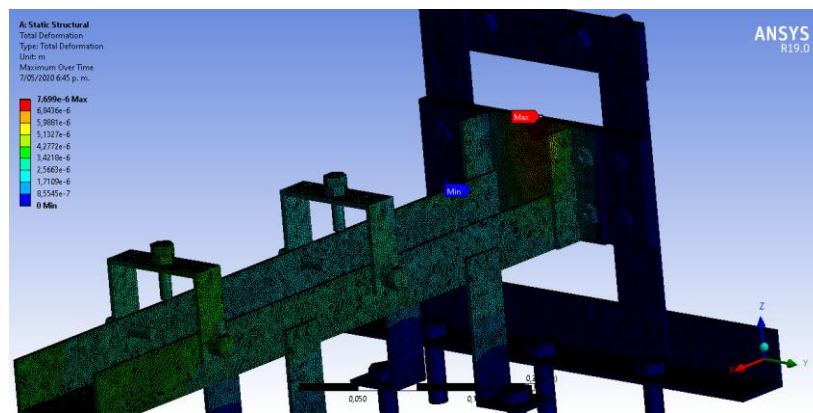


Figura 94 Resultados de deformación total

Por último, el esfuerzo equivalente de Von Mises, figura 95 que pertenece a la teoría de falla en materiales dúctiles o frágiles, ya que las tensiones y deformaciones en un cuerpo se presenta en diferentes direcciones, debido a eso la forma más conveniente de expresar las tensiones multidireccionales es resumirla en una tensión equivalente (Von-Mises).

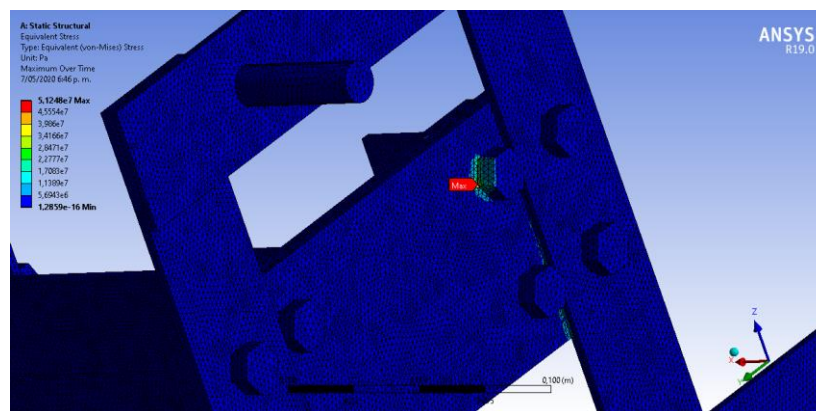


Figura 95 Esfuerzo equivalente de Von-Mises

Teniendo esto en consideración, se observa que como particularidad, el esfuerzo máximo se genera en una de las esquinas de un perno de ajuste de la placa a la estructura con un valor de $5,1248 \times 10^7$ Pa. Esto no solo se debe a la fuerza aplicada, sino también a que las esquinas son concentradores de esfuerzos potenciales. Como en el criterio de deformación total, también se tienen niveles de variación del esfuerzo equivalente sobre la estructura.

La simulación y los resultados obtenidos deja ver que la estructura del banco de pruebas estará en capacidad de soportar los requerimientos para los que fue diseñado, Esta conclusión se permite puesto tanto el campo de deformaciones permisible ($7,6990 \times 10^{-6}$ m) como el máximo esfuerzo equivalente de Von-Mises (51,248 MPa) garantizan valores dentro de los cuales el material del cual está diseñada la estructura conserva sus características de rigidez y resistencia sin llegar a valores críticos de esfuerzos de fluencia que ocasionen deformaciones plásticas e irreversibles en el material dado que el esfuerzo de fluencia para el acero de la estructura corresponde a un valor de 330 MPa lo que indica que el esfuerzo impuesto sobre la placa debido al empuje generado por el motor cohete es tan solo del 15,53% del esfuerzo máximo permitido, en cuanto a la deformación total el objetivo era conseguir una estructura que no presentara deformaciones de carácter permanente y que afectara la operación del dispositivo, como los resultados lo muestran el campo de deformaciones a través de las distintas simulaciones se mantuvo en valores del orden de 10^{-6} m lo que corresponde a un orden de escala de micras, lo cual es suficiente para determinar que los parámetros bajo los cuales es analizado el correcto desempeño del banco de pruebas cumplen con los requerimientos y con un factor de seguridad mínimo de 4,2999 el cual es mayor al factor de seguridad de diseño que se planteó con un valor mínimo de 1,5, estableciendo así condiciones de seguridad en la estructura y asegurando su buen funcionamiento en las pruebas. La figura 96 muestra el punto en el cual se tiene el factor de seguridad mínimo, que como es de esperarse, resulta ser el mismo punto en el que está el esfuerzo equivalente de Von – Mises.



Figura 96 Factor de seguridad mínimo

5.2. Efectos de la temperatura sobre la estructura del banco de pruebas

Los factores analizados con anterioridad corresponden a características inherentes del material del cual está hecho el dispositivo, sin embargo, es importante analizar otros en los cuales el correcto funcionamiento del banco de pruebas se puede ver afectado por su influencia, ya que este es un dispositivo en el cual se someterán a evaluación características de tipo mecánico y físico, las altas temperaturas generadas en la tobera de los motores cohete deben ser analizadas para determinar el nivel de influencia y el papel que juegan el rendimiento del mismo. Ahora bien, no es objetivo del presente realizar un análisis termo-mecánico de la estructura, pero conociendo los regímenes de operación de los motores cohete, el tipo de combustible empleado y el tipo de montaje que se tiene se pueden concluir algunas cosas, asumiendo un entorno de operación normal.

El acero es un material cuya resistencia puede verse seriamente afectada cuando es sometido a altas temperaturas, las condiciones ideales para que sus propiedades físico-mecánicas sean óptimas son las condiciones ambiente, de temperaturas entre 20-25 °C; a medida que la temperatura aumenta sus propiedades se ven disminuidas, esto es notorio cuando el metal se encuentra con temperaturas por encima de los 870°C; ahora bien, si analizamos las temperaturas que normalmente se alcanzan en los cohetes con diferentes tipos de propelentes observamos que el Nitrato de Potasio (KNO_3) temperatura de flama adiabática de 1327°C y un impulso específico de 125s [59], esto indica de forma clara que por características operacionales del motor el banco de pruebas no se verá afectado por los efectos de las altas temperaturas, puesto que para llevar el acero a condiciones en las cuales se vean afectadas las propiedades antes mencionadas no solo basta con una alta

temperatura sino también con un considerable tiempo de exposición a la misma, la fracción de tiempo en la cual la llama alcanza la máxima temperatura posible es demasiado pequeña como para que la estructura se vea afectada. Dicho esto y teniendo en cuenta que la sección de la tobera para los motores cohete estará distanciada de la estructura de soporte central se concluye que la temperatura no es un factor que afecte de forma directa la prueba ni sus correspondientes resultados.

5.3. Análisis de independencia de malla

En el modelado de elementos finitos, una malla más refinada, por lo general, da como resultado una solución más precisa. Sin embargo, a medida que la malla se vuelve más refinada, el tiempo de cálculo aumenta. Por lo tanto, obtener una malla que optimice hasta donde sea posible los recursos computacionales sin perder exactitud es de suma importancia. El estudio de independencia de malla se realizó con el fin de encontrar el tamaño de malla computacional límite tal que las predicciones del modelo fueran independientes de cualquier variación de ésta. El cual consistió en comparar las predicciones del modelo computacional para diferentes mallas hasta encontrar el tamaño de malla límite. Los resultados obtenidos para la variación del esfuerzo equivalente de Von – Misses con respecto al número de elementos se muestran en la tabla 12.

Número de elementos	Máximo Esfuerzo Equivalente (Von - Misses) Pa
41092	1,32E+07
98282	1,41E+07
123202	1,82E+07
293820	2,99E+07
387027	3,10E+07
527922	3,59E+07
690770	4,43E+07
911236	5,24E+07
1169582	5,31E+07
1418821	5,32E+07
1587200	5,32E+07

Tabla 12 Número de elementos vs Esfuerzo equivalente de Von – Misses

En la figura 97 se muestra el gráfico de convergencia en el que se observa como el aumento en la cantidad de elementos incrementa la precisión en el resultado final para este parámetro.

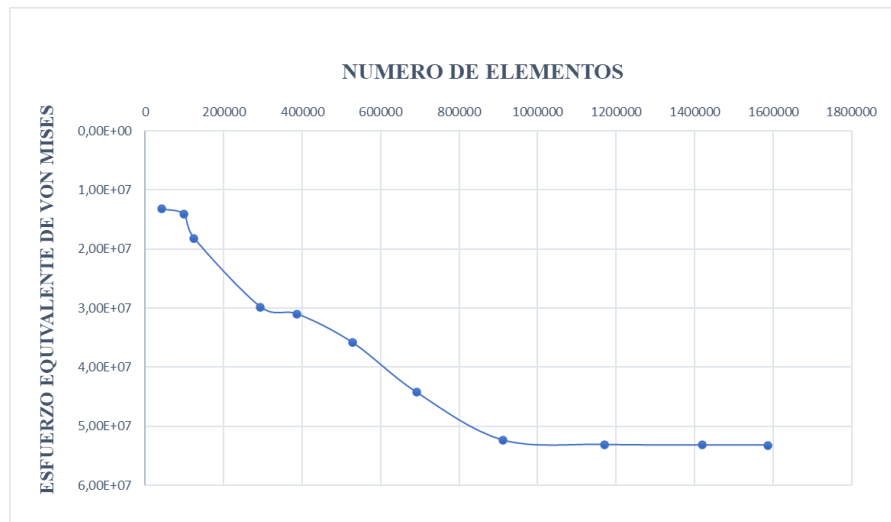


Figura 97 Análisis de convergencia esfuerzo de Von-Misses

Como se observa el refinamiento llega a un punto de convergencia para este caso particular cuando se acerca a valores cercanos al millón de elementos, es importante observar que en un inicio las fluctuaciones y variaciones en cada uno de los resultados debido a la ausencia de metodologías de refinamiento pueden arrojar resultados que carezcan de sentido físico y dichos resultados no describen en sí el fenómeno en general ya que resuelven el volumen discretizado en función de la cantidad de nodos. El refinamiento de la malla y por tanto las variaciones en esta se realizaron principalmente en la sección de placa plana que soportará el empuje generado por el motor y la cual será la que mayor esfuerzo y deformación soportará.

Dicho esto, la convergencia para este parámetro en particular se encontró en un rango de elementos comprendido entre 1 y 1,5 millones de elementos, después de esto se consideró innecesario continuar con el refinamiento puesto que una mayor cantidad de elementos implica también un tiempo de simulación y memoria más elevado lo que no es deseable si se busca optimizar dichos parámetros.

Al igual que el máximo esfuerzo equivalente, la deformación también resulta ser un parámetro de importancia y por tanto su convergencia también se analizó mediante la

independencia de malla. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 13 y en la figura 98.

Número de elementos	Deformación total
41092	7,236E-06
98282	7,268E-06
123202	7,425E-06
293820	7,555E-06
387027	7,653E-06
527922	7,749E-06
690770	7,799E-06
911236	7,812E-06
1169582	7,812E-06
1418821	7,813E-06
1587200	7,81E-06

Tabla 13 Número de elementos vs Deformación total

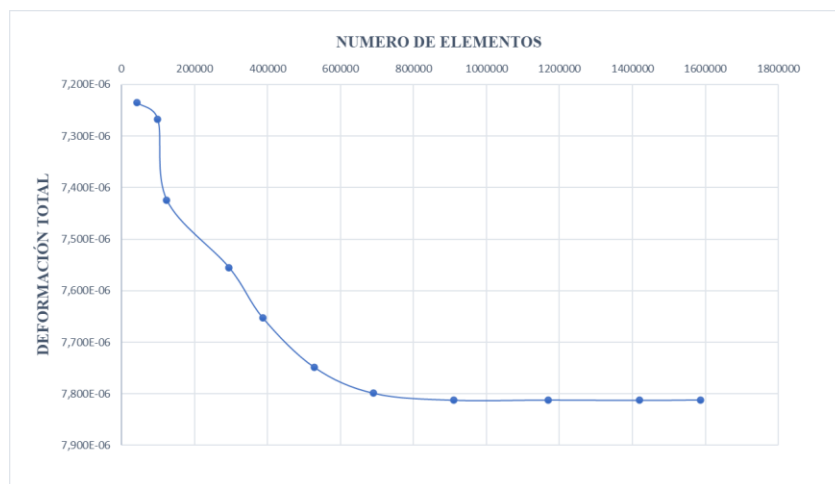


Figura 98 Análisis de convergencia deformación total

Se observa como el nivel de dependencia que se muestra en la figura 98 de la deformación total con respecto a la densidad del mallado es menor que la del máximo esfuerzo equivalente ya que la estabilidad de los resultados y por ende la convergencia de estos empieza a notarse desde una cantidad menor a los 800 mil elementos, es importante notarlo ya que si hubiésemos decidido la calidad de la malla solo teniendo en cuenta este parámetro hubiese sido una afirmación equivocada puesto que en la misma cantidad de elementos el esfuerzo de Von – Misses aún no tenía un criterio de convergencia notorio y

por tanto no habría sido prudente concluir nada respecto de éste.

Se concluye entonces del presente análisis de independencia de malla que los resultados de un modelo mediante elementos finitos deben ser independientes del tamaño de ésta, así un estudio de convergencia asegura que el modelo captura el comportamiento de los sistemas de forma detallada y precisa, al tiempo que reduce el tiempo de resolución y economiza los costes computacionales.

CONCLUSIONES

El proceso de diseño y la selección de materiales fue de vital importancia en el desarrollo del trabajo, ayudó a definir los parámetros de interés a evaluar en el proceso de simulación y a disminuir la probabilidad de falla y fases de rediseño, puesto que la optimización del tiempo es parte por lo cual los análisis computacionales son realizados.

El rango de operación del banco de pruebas se estableció mediante las investigaciones expuestas en el documento y las dimensiones de la estructura que se encuentran relacionadas con los motores de clase G, H, I, J, K, L y todo aquel que esté dentro de los límites operacionales. Si se requiriera en algún momento someter a evaluación motores que excedan el rendimiento de los anteriormente mencionados deberán extrapolarse los resultados obtenidos y analizar si el mecanismo soporta dicha prueba.

Debido a su diseño semi-modular este banco de pruebas cumple la principal restricción de diseño de este como lo es asegurar una estructura rígida, más sin embargo es necesario realizar un estudio futuro en el cual se incluya un análisis específico para los pernos de anclaje de la estructura en el terreno, puesto que al momento esto es algo que no se definió con claridad, y podría requerir otras consideraciones al no ubicarse sobre el concreto.

Las metodologías de generación de malla y posterior mallado de la estructura demostraron ser de mucha utilidad a lo largo del proceso de discretización y mallado puesto que definieron los parámetros bajo los cuales llevarlo a cabo. El proceso de refinamiento de malla y posterior análisis de independencia de malla es de suma importancia a la hora de entrar a evaluar la exactitud de los resultados y el correcto funcionamiento del dispositivo, este proceso debe ir acompañado de un entendimiento claro de la estructura a analizar y de criterios de diseño que permitan reevaluar las consideraciones a medida que los errores aparezcan.

Con los resultados obtenidos de la simulación se puede observar que la metodología para la concepción y diseño mecánico del banco de pruebas cumplen con los parámetros bajo los cuales se desarrolló y concibió el diseño final de la estructura.

RECOMENDACIONES

La primera recomendación es llevar a cabo la construcción del banco de pruebas para comprobar de manera experimental el correcto funcionamiento de este. Siguiendo claro está todas las normas de seguridad.

Formar grupos de investigación y desarrollo en ingeniería de cohetes y satélites en la facultad de ingeniería aeronáutica, puesto que es notorio el avance que han tenido otras universidades en estos temas y se hace necesario profundizar más en el campo para las futuras generaciones.

Apoyarse en otras facultades de ingeniería de la universidad para diseñar sistemas de adquisición de datos propios, de esta forma se podría reducir el costo de la compra de estos, que dependiendo del tipo de variables a medir puede ser elevado.

Referencias

- [1] A. Urrego, Mision SENECA I, Bogotá, 2009.
- [2] J. J. D. L. H. Gonzáles, Diseño y construcción de un banco estático para motores cohete, Bogotá, 2011.
- [3] J. Huérfano, N. Álvarez y O. Ojeda, Diseño de un banco de pruebas de pruebas estático para prueba y caracterización de motores cohete, Buenos Aires, 2015.
- [4] D. Moraes, F. Telöken, T. Casol y M. Poletto, Development of a vertical static test bench for amateur rocket engines, Rio Grande do Sul, 2018.
- [5] L. Fabrino y P. Almeida, Linear static and dynamic analysis of rocket engine testing bench structure using finite element method, Minas Gerais, 2015.
- [6] J. Parczewski, «El sitio de Cohetería Experimental Amateur de Juan Parczewski,» 25 5 2016. [En línea]. Available: <http://www.jpcoheteria.com.ar/BancoEnsMot2.htm>. [Último acceso: 18 4 2019].
- [7] J. Roig, Diseño y construcción de una base de pruebas de motores cohete amateurs, Barcelona, 2011.
- [8] R. Nakka, «Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site,» 15 10 2019. [En línea]. Available: <http://www.nakka-rocketry.net>.
- [9] «<http://www.tjtuorui.com/>,» [En línea]. Available: https://sc01.alicdn.com/kf/HTB14V_PnMfH8KJjy1zqcq6ATzpXaJ/q235b-a36-types-of-angle-iron-steel.jpg.
- [10] J. Vega y J. Leyton, «Optimización de un motor de combustible sólido tipo KNSB para cohetería experimental. Ciencia y Poder Aéreo,» 2016. [En línea].
- [11] hpchile, «Composición y tipos de propelentes sólidos,» Santiago de Chile, 2011.
- [12] E. Howard, L. Boyer y L. Timothy, Metals Handbook, OH: American Society for metals, 1985.
- [13] G. Saenz, «SlideShare,» 25 Agosto 2015. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/gsaenz/matriz-de-ponderacion>. [Último acceso: 27 10 2019].
- [14] Aerocon, «Aerocon Systems,» [En línea]. Available: http://www.aeroconsystems.com/ts_pics/ts_pics.htm. [Último acceso: 15 9 2019].
- [15] J. Cipolla, «Aerorocket,» [En línea]. Available: <http://www.aerorocket.com/rmts.html>. [Último acceso: 13 9 2019].
- [16] R. Newlands, «Aspire Space,» Aspirespace Rocket Engineering Society, [En línea]. Available: <http://www.aspirespace.org.uk>. [Último acceso: 12 11 2019].
- [17] A. Bruccoleri, *Test Stand Dartmouth College*.
- [18] H. R. Russia, «Hybrid Rocket Russia,» [En línea]. Available: www.hybridrocketrussia.com. [Último acceso: 17 Agosto 2019].
- [19] SPL, «Swiss Propulsion Laboratory,» [En línea]. Available: <http://www.spl.ch/old/>. [Último acceso: 23 10 2019].
- [20] A. W. Society, «Weldingwire,» [En línea]. Available: <https://weldingwire.com/Images/Interior/documentlibrary/spanish%20carbon%20027.pdf>.
- [21] A. S. f. T. a. M. ASTM, «ASTM International,» 1 May 2015. [En línea]. Available: https://www.astm.org/america_latina/sp/index.html.
- [22] J. Celigüeta, Método de los elementos finitos para análisis estructural, vol. 4, San Sebastián: UNICOPIA C.B, 2011.

- [23] F. Murillo, Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructuras de buses, Madrid, 2018.
- [24] G. CARMAN, «Mallado por elementos finitos,» 2014.
- [25] P. George, Automatic Mesh Generation. Application to Finite Element Methods,, John Wiley & Sons-Mason, 1991.
- [26] K. Ho-Le, “Finite Element Mesh Generation Methods : A Review and classification, vol. 20, Computer-Aided Design, 1988.
- [27] N. Kikuchi, Adaptive Grid-Design Methods for Finite Element Analysis”, vol. 55, 1986, pp. 129-160.
- [28] S. Owen, A Survey of Unstructured Mesh Generation Technology”, Dearborn, 1998, pp. 239-267.
- [29] P. D. Zienkiewicz O.C, An Automatic Mesh Generation Scheme for Plane, vol. 3, International Journal for Numerical Methods in Engineering,, 1971, pp. 519-528.
- [30] W. H. C. Gordon, Construction of Curvilinear Co-ordinate Systems and Applications to Mesh Generation, vol. 7, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1973, pp. 461-477.
- [31] R. S. M. A. J. G. D. Haber, A General Two-Dimensional, Graphical Finite Element Preprocessor Utilizing Discrete Transfinite Mappings, vol. 17, International Journal for Numerical Methods in Engineering,, 1981, pp. 1015-1044.
- [32] W. Cook, Body Oriented (Natural) Co-ordinates for Generating Three-Dimensional Meshes, vol. 8, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1974, pp. 27-43.
- [33] W. O. W. Cook, Mapping Methods for Generating Three-Dimensional Meshes, vol. Agosto, Computers in Mechanical Engineering, 1982, pp. 67-72.
- [34] R. B. G. G. W. Barnhill, Smooth Interpolation in Triangles, vol. 8, Journal of Approximation Theory, 1973, pp. 114-128.
- [35] A. Perronet, Triangle, Tetrahedron, Pentahedron Transfinite Interpolations. Application to the Generation of C0 or G1-Continuous Algebraic Meshes, Greenwich: Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations,, 1998, pp. 467-476.
- [36] A. Díaz, MÉTODOS DE MALLADO Y ALGORITMOS ADAPTATIVOS EN DOS Y TRES DIMENSIONES PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS ELECTROMAGNÉTICOS CERRADOS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, Valencia , 2000.
- [37] J. W. Z. M. C. Thompson, Numerical Grid Generation Foundations and Applications, North-Holland, 1985.
- [38] M. S. M. Yerry, Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Modified-Octree Technique, vol. 20, International Journal for Numerical Methods in, 1984, pp. 1965-1990.
- [39] W. S. S. M. G. K. Y. M. Baehmann P.L., Robust, Geometrically Based, Automatic Two-Dimensional Mesh Generation, vol. 24, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1987, pp. 1043-1078.
- [40] S. M. Schroeder W.J., A Combined Octree/Delaunay Method for Fully Automatic 3-D Mesh Generation, vol. 29, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1990, pp. 37-55.
- [41] S. M.S., Automatic and Adaptive Mesh Generation, vol. 21, IEEE Transactions on Magnetics, 1985, pp. 2484-2498.
- [42] Y. A. C. V. K. K. Yamashita H., A Novel Tetrahedral Mesh Generation Method for Rotating Machines Including End-Coil Region, vol. 32, IEEE, 1996, pp. 1353-1356.

- [43] C. S. O. S. Staten M.L., BMSweep: Locating Interior Nodes During Sweeping, Dearborn: Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable, 1998, pp. 7-18.
- [44] K. P.M., Next-Generation Sweep Tool: A Method for Generating All-Hex Meshes on Two-And-One-Half Dimensional Geometries, Dearborn: Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable, 1998, pp. 505-513.
- [45] C. S. C. S. M. M. Alfonzetti S., Automatic Mesh Generation by Let-It-Grow Neural Network, vol. 32, IEEE Transactions on Magnetics, 1996, pp. 1349-1352.
- [46] N. N. Chedid R., Automatic Finite-Element Mesh Generation Using Artificial Neural Networks-Part I: Prediction of Mesh Density, vol. 32, IEEE Transactions on, 1996, pp. 5137-5178.
- [47] S. S. Owen S.J., Neighborhood-Based Element Sizing Control for Finite Element Surface Meshing, Proceedings of the 6th International Meshing Roundtable, 1997, pp. 143-154.
- [48] C. S. S. S. Cunha A., Automatic Boundary Sizing for 2D and 3D, vol. 220, Trends in Unstructured Mesh Generation, 1997, pp. 65-72.
- [49] H. Borouchaki, F. Hecht y P. Frey, Mesh Gradation Control, Proceedings of the 6th International Meshing Roundtable, 1997.
- [50] S. R. Loze M.K., Two Simple Algorithms for Constructing a Two-Dimensional Constrained Delaunay Triangulation, vol. 11, Applied Numerical Mathematics, 1993, pp. 318-403.
- [51] L. M., The Generation on 3D Delaunay Grids Without Boundary Modification, Greenwich: Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations, 1998, pp. 447-456.
- [52] L. R., Automatic Unstructured Grid Generators, vol. 25, Finite Elements in Analysis, 1997, pp. 113-134.
- [53] G. P.L., Delaunay's Mesh of a Convex Polyhedrom in Dimension d. Application to Arbitrary Polyhedra, vol. 33, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1992, p. 1992.
- [54] T. T. G. M. Karamete B.K., Unstructured Grid Generation and a Simple Triangulation Algorithm for Arbitrary 2-D Geometries Using Object Oriented Programming, vol. 40, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, pp. 251-268.
- [55] S. E., Towards an Adaptive Advancing Front Method, 6th International Meshing Round Table, 1997.
- [56] S. M. C. S. S. S. Owen S.J., Advancing Front Quadrilateral Meshing Using Triangle Transformations, Dearborn: Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable, 1998, pp. 409-428.
- [57] B. J. Spekrijse S.P., An Algorithm to Check the Topological Validity of Multi-Block Domain Decompositions, Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations.
- [58] S. B. Koomullil R.P., Generalized Grid Techniques in Computational Field Simulation, Greenwich: Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations, 1998, pp. 521-531.
- [59] M. Olde, «MSc Thesis on KNO₃-Sugar propellants,» 2015. [En línea]. Available: <https://dare.tudelft.nl/2019/03/msc-thesis-on-kno3-sugar-propellants/>.
- [60] U. d. Valencia, «La química de la pólvora,» Valencia , 2016.