



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**UNIDAD DE POSGRADOS**

**MAESTRÍA EN MÉTODOS NUMÉRICOS PARA DISEÑO EN INGENIERÍA**

Tesis previa a la obtención  
del Grado de Magíster  
en Métodos Numéricos  
para Diseño en Ingeniería

**“SIMULACIÓN POR ORDENADOR  
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS  
FINITOS Y OPTIMIZACIÓN POR EL  
MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA, DE  
CONECTORES PARA ESTANTERÍA  
METÁLICA”**

**Autores:**

**Margarita del Rocío Martínez Bustamente.**

**Diego Benigno Patiño Zárate.**

**Dirigido por:**

**Paúl Álvarez Lloret.**

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

## UNIDAD DE POSGRADOS

---

### MAESTRÍA EN MÉTODOS NUMÉRICOS PARA DISEÑO EN INGENIERÍA

*Autores:*

*Margarita del Rocío Martínez Bustamente.*

*Diego Benigno Patiño Zárate.*

*Dirigido por:*

*Paúl Álvarez Lloret.*

---

### “SIMULACIÓN POR ORDENADOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y OPTIMIZACIÓN POR EL MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA, DE CONECTORES PARA ESTANTERÍA METÁLICA”

El presente trabajo trata del análisis, simulación y optimización del conector de estantería metálica sirve para acoplarse y transmitir la carga del material almacenado a los perfiles verticales. Debe ser lo suficientemente rígido para soportar la carga, funcional para el usuario y de fácil fabricación. El objetivo principal de la investigación es obtener un mejor diseño para la fabricación y resistencia del conector. El conector utilizado actualmente está hecho con un ángulo de 5 mm de espesor, perforado y esta soldado tres remaches de acero. Los remaches son el principal problema en el momento de la fabricación consumen mucho tiempo en la fabricación. El modelo del conector se va a desarrollar en un programa Cad y serán analizados mediante Ansys.

Realizando un análisis de los conectores existentes en el mercado y de los factores que influyen en los mismos se obtendrá un modelo que se ajuste a las necesidades planteadas anteriormente. Para el análisis de la variedad de factores en el diseño y sus interacciones utilizaremos el método de ingeniería robusta junto con el método de elementos finitos.

La reducción de tensiones en el conector se lograra combinado los parámetros utilizados, en una matriz ortogonal para obtener la mejor solución. Esta integración de métodos puede ahorrar la cantidad de material utilizado, coste de producción y el tiempo de fabricación.

**“SIMULACIÓN POR ORDENADOR  
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS  
FINITOS Y OPTIMIZACIÓN POR EL  
MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA, DE  
CONECTORES PARA ESTANTERÍA  
METÁLICA”**



# **“SIMULACIÓN POR ORDENADOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y OPTIMIZACIÓN POR EL MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA, DE CONECTORES PARA ESTANTERÍA METÁLICA”**

## **AUTORES:**

**MARGARITA DEL ROCÍO MARTÍNEZ BUSTAMENTE**

Licenciada en Ciencias de la Educación, especialidad Física y Matemáticas  
Egresada de la Maestría en Métodos Numéricos para Diseño en Ingeniería de la  
Universidad Politécnica Salesiana

**DIEGO BENIGNO PATIÑO ZÁRATE**

Ingeniero Electrónico  
Egresado de la Maestría en Métodos Numéricos para Diseño en Ingeniería de la  
Universidad Politécnica Salesiana

## **DIRIGIDO POR:**

**PAÚL ÁLVAREZ LLORET**

Ingeniero Mecánico  
Máster en Métodos Numéricos



**Cuenca – Ecuador  
2015**

### Datos de catalogación bibliográfica

ZÁRATE PATIÑO DIEGO y MARTÍNEZ BUSTAMANTE MARGARITA

**SIMULACIÓN POR ORDENADOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y OPTIMIZACIÓN POR EL MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA, DE CONECTORES PARA ESTANTERÍA METÁLICA**

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador, 2015

UNIDAD DE POSGRADOS

Formato 170 x240

Páginas: 89

#### Breve reseña de los autores e información de contacto

##### Autores:



**MARGARITA DEL ROCÍO MARTÍNEZ BUSTAMANTE**

Licenciada en Ciencias de la Educación, especialidad Física y Matemáticas  
Egresada de la Maestría en Métodos Numéricos para Diseño en Ingeniería de la Universidad Politécnica Salesiana  
mmartinezb@ups.edu.ec



**DIEGO BENIGNO PATIÑO ZÁRATE**

Ingeniero Electrónico  
Egresado de la Maestría en Métodos Numéricos para Diseño en Ingeniería de la Universidad Politécnica Salesiana  
patinodiego@hotmail.com

##### Dirigido por:



**PAUL ÁLVAREZ LLORET**

Ingeniero Mecánico  
Máster en Métodos Numéricos  
alvarezlloret@hotmail.com

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre distribución de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

© 2015 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA-ECUADOR-SUDAMÉRICA

ZÁRATE PATIÑO DIEGO - MARTÍNEZ BUSTAMANTE MARGARITA

“SIMULACIÓN POR ORDENADOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y OPTIMIZACIÓN POR EL MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA, DE CONECTORES PARA ESTANTERÍA METÁLICA”

IMPRESO EN ECUADOR – PRINTED IN ECUADOR

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE GENERAL .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
DEDICATORIA .....	XIII
PREFACIO .....	XV
PRÓLOGO.....	XVII
AGRADECIMIENTO.....	XIX
CAPÍTULO I .....	1
1. EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. DEFINICIONES BÁSICAS.....	2
1.2.1. Medio continuo.....	2
1.2.2. Dominio .....	3
1.2.3. Condiciones de contorno .....	3
1.2.4. Grados de libertad.....	4
1.2.5. Nodo .....	4
1.2.6. Incógnitas .....	5
1.3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO .....	5
1.3.1. Procedimiento del método .....	7
1.3.2. Recomendaciones para usar el MEF.....	8
1.4. ECUACIONES DEFORMACIONES Y TENSIÓN ESTRUCTURAS.....	9
1.4.1. Análisis matricial de estructuras de barras .....	9
1.5. LIMITACIONES DEL MÉTODO .....	13
CAPITULO II.....	15
2. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE INGENIERIA ROBUSTA.....	15
2.1. ANTECEDENTES .....	15
2.2. CONCEPTOS BÁSICOS .....	16
2.2.1. Definición .....	16
2.2.2. Matriz ortogonal .....	18
2.2.3. Propiedades de una matriz ortogonal.....	19
2.2.4. Número mínimo de experimentos para llevar a cabo .....	20
2.2.5. Medición de la función básica .....	21
2.3. SUPUESTOS DEL MÉTODO TAGUCHI .....	22
2.4. EL DISEÑO DE UN EXPERIMENTO .....	23
2.4.1. Definir la función básica.....	23
2.4.2. Definir qué y cómo medir.....	24
2.4.3. Definir factores y niveles.....	24
2.4.4. Selección de una matriz ortogonal y formulación del experimento .....	25
2.4.5. Llevar a cabo el experimento.....	26
2.4.6. Análisis de los datos .....	26

2.4.7. Confirmar los resultados.....	26
2.5. DISEÑO ROBUSTO.....	27
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>31</b>
<b>3. LA INTEGRACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y EL MÉTODO DE INGENIERIA ROBUSTA.....</b>	<b>31</b>
3.1. SIMULACIÓN DEL EXPERIMENTO REAL.....	31
3.2. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS Y EL MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO.....	33
3.2.1. Diseño del sistema.....	37
3.2.2. Diseño de parámetros.....	37
3.2.3. Diseño de tolerancia.....	38
3.3. OPTIMIZACIÓN UTILIZANDO EL ENFOQUE INTEGRADO.....	38
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>41</b>
<b>4. ANÁLIS Y SIMULACIÓN DEL CONECTOR Y ALGUNAS VARIANTES.....</b>	<b>41</b>
4.1. ESTANTERÍA METÁLICA Y FÁBRICA TUGALT.....	41
4.2. INTRODUCCIÓN A LOS RACKS.....	41
4.2.1. Características generales.....	42
4.2.2. Elementos.....	42
4.2.3. Detalle de cada componente.....	42
4.3. ENSAMBLE.....	46
4.4. FABRICACIÓN.....	46
4.5. FABRICACIÓN DEL CONECTOR.....	48
4.5.1. Especificaciones del material.....	50
4.6. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE CONECTORES.....	52
4.7. GEOMETRÍAS EN SOFTWARE CAD.....	53
4.7.1. Conectores realizados.....	53
4.7.2. Elementos realizados en Cad.....	54
4.7.3. Elementos ensamblados en Cad.....	55
4.8. ANSYS.....	56
4.9. ANSYS Y LOS PROGRAMAS CAD TRABAJANDO JUNTOS.....	56
4.10. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO A OPTIMIZAR.....	56
4.10.1. Simulación de ensambles.....	58
4.11. DETERMINACIÓN DEL MEJOR DISEÑO DE CONECTOR.....	65
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>69</b>
<b>5. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO AL CONECTOR DE ESTANTERÍA METÁLICA.....</b>	<b>69</b>
5.1. PLANIFICACIÓN PRELIMINAR.....	69
5.2. DEFINIR LA FUNCIÓN BÁSICA DEL SISTEMA.....	69
5.3. DEFINICIÓN DE QUE MEDIR Y COMO MEDIR.....	69
5.4. DEFINIR FACTORES Y NIVELES SELECCIONADOS.....	70
5.5. FORMULAR EL EXPERIMENTO.....	72
5.6. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	73
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>

<b>ANEXOS .....</b>	<b>83</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>89</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Dominio</i> .....	3
<i>Figura 2. Condiciones de contorno en una barra</i> .....	3
<i>Figura 3. Grados de Libertad</i> .....	4
<i>Figura 4. Nodo</i> .....	4
<i>Figura 5. Elemento finito lineal</i> .....	5
<i>Figura 6. Elemento finito bidimensional a) cuadrilátero b) triangular</i> .....	6
<i>Figura 7. Elemento finito tridimensional a) tetraedro b) hexaedro regular</i> .....	6
<i>Figura 8. Elementos incorrectos</i> .....	6
<i>Figura 9. Procedimiento del MEF</i> .....	7
<i>Figura 10. Conector mallado</i> .....	8
<i>Figura 11. Barra sometida a fuerzas axiales</i> .....	9
<i>Figura 12. Deformación de la barra por fuerzas axiales</i> .....	10
<i>Figura 13. Función ideal m señal; y respuesta</i> .....	16
<i>Figura 14. Variación en la función ideal</i> .....	17
<i>Figura 15. Diagrama de proceso para un estudio de Ingeniería Robusta</i> .....	25
<i>Figura 16. a) Función Ideal b) Realidad, perdida de energía, Variación, perdida de dinero</i> .....	28
<i>Figura 17. a) Baja relación S/N b) Alta relación S/N</i> .....	29
<i>Figura 18. Simulación del experimento en tiempo real utilizando herramientas numéricas</i> .....	32
<i>Figura 19. Método de los elementos finitos y el método de Ingeniería robusta como herramienta de diseño</i> .....	36
<i>Figura 20. Diagrama de flujo que muestra el uso del método de Ingeniería Robusta y elementos finitos para la solución cercana a la óptima</i> .....	39
<i>Figura 21. Racks</i> .....	41
<i>Figura 22. Conector</i> .....	43
<i>Figura 23. Soporte</i> .....	43
<i>Figura 24. Perfil Rack</i> .....	44
<i>Figura 25. Larguero de carga</i> .....	44
<i>Figura 26. Unión de bastidor</i> .....	45
<i>Figura 27. Travesaño</i> .....	45
<i>Figura 28. Estantería Metálica</i> .....	46
<i>Figura 29. Proceso de fabricación</i> .....	47
<i>Figura 30. Producto final</i> .....	47
<i>Figura 31. Materia prima</i> .....	48
<i>Figura 32. Fabricación manual del conector</i> .....	49
<i>Figura 33. Producto final</i> .....	49
<i>Figura 34. Especificaciones del material</i> .....	51
<i>Figura 35. Planos técnicos</i> .....	52
<i>Figura 36. Entorno del programa Cad</i> .....	53

<i>Figura 37. Conector analizado 1</i> .....	55
<i>Figura 38. Conector variante 2</i> .....	53
<i>Figura 39. Conector variante 3</i> .....	56
<i>Figura 40. Conector variante 4</i> .....	54
<i>Figura 41. Remache</i> .....	56
<i>Figura 42. Travesaño</i> .....	54
<i>Figura 43. Perfil</i> .....	54
<i>Figura 44. Ensamble variante 1 (vista posterior)</i> .....	55
<i>Figura 45. Ensamble variante 2 (vista posterior)</i> .....	57
<i>Figura 46. Ensamble variante 3 (vista posterior)</i> .....	55
<i>Figura 47. Ensamble variante 4 (vista posterior)</i> .....	55
<i>Figura 48. Entorno del programa Ansys</i> .....	56
<i>Figura 49. Análisis estructural estático de deformaciones</i> .....	57
<i>Figura 50. Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante</i> .....	57
<i>Figura 51. Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises</i> .....	58
<i>Figura 52. Análisis estructural estático de deformaciones</i> .....	58
<i>Figura 53. Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante</i> .....	58
<i>Figura 54. Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises</i> .....	59
<i>Figura 55. Factor de seguridad</i> .....	59
<i>Figura 56. Análisis estructural estático de deformaciones</i> .....	59
<i>Figura 57. Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante</i> .....	60
<i>Figura 58. Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises</i> .....	60
<i>Figura 59. Factor de seguridad</i> .....	61
<i>Figura 60. Análisis estructural estático de deformaciones</i> .....	61
<i>Figura 61. Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante</i> .....	61
<i>Figura 62. Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises</i> .....	62
<i>Figura 63. Factor de seguridad</i> .....	62
<i>Figura 64. Análisis estructural estático de deformaciones</i> .....	62
<i>Figura 65. Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante</i> .....	63
<i>Figura 66. Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises</i> .....	63
<i>Figura 67. Factor de seguridad</i> .....	63
<i>Figura 68. Mapa funcional del sistema</i> .....	65
<i>Figura 69. Diagrama de funcionamiento del acople</i> .....	66
<i>Figura 70. Conector diseñado</i> .....	67
<i>Figura 71. Propiedades material 1</i> .....	70
<i>Figura 72. Propiedades material 2</i> .....	70
<i>Figura 73. Ilustración de los factores de control</i> .....	71
<i>Figura 74. Ilustración de la simulación (larguero en posición inferior)</i> .....	74
<i>Figura 75. Ilustración de la simulación (larguero en posición inferior)</i> .....	74
<i>Figura 76. Ilustración de la simulación (larguero en posición inferior)</i> .....	74
<i>Figura 77. Gráfica de efectos principales para la relación señal ruido</i> .....	76
<i>Figura 78. Gráfica de efectos principales con relación a la media</i> .....	76
<i>Figura 79. Análisis estructural estático de deformaciones del conector optimizado</i> ..	78

<i>Figura 80. Análisis estructural estático de la máxima tensión cortante del conector optimizado</i> .....	78
<i>Figura 81. Conector óptimo</i> .....	79
<i>Figura 82. Chapa desplegada</i> .....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Distribución de una matriz ortogonal L 9.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2. Notación convencional.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 3. Notación con coeficientes.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 4. Ejemplo de función básico por atributos .....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 5. Comparación de resultados de ensambles con variantes de conectores .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 6. Factores de ruido .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 7. Factores de control .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 8. Diagrama del experimento.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 9. Prototipos a simular.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 10. Cálculo y recolección de datos .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 11. Combinación óptima de los factores de control.....</i>	<i>77</i>



## DEDICATORIA

A mi amado esposo Adrián, por creer en mí, y hacer posibles mis sueños, mi corazón para él.

A quienes con su ejemplo de trabajo por amor, día a día, me enseñaron que las cosas que realmente nos hacen crecer como personas, son las que fueron conseguidas con esfuerzo y humildad. A mis queridos Padres Hortensia y Ramiro.

Margarita

A mi amada esposa Angélica y mis hijos Diego y Oscar, por el cariño y comprensión en el tiempo que les robé.

Diego



## PREFACIO

El análisis de Elementos finitos se utiliza comúnmente como una herramienta de diseño de ingeniería, dentro de sus múltiples aplicaciones está el campo estructural, térmico, dinámica de fluidos, etc. En lo que compete a nuestra tesis está inmersa dentro del análisis mecánico estructural, y servirá para verificar si el diseño de un producto puede soportar la carga y el medioambiente al que está sometido. En un análisis estático, donde se investigan las tensiones y desplazamientos, así como problemas de optimización complicados, donde el objetivo es encontrar el mejor diseño adecuado para las premisas dadas, para lo cual se lleva a cabo un análisis de elementos finitos.

Este análisis se realiza tanto en productos comerciales, donde la cuestión de responsabilidad tiene que ser determinado y en el desarrollo de prototipos en el proceso de desarrollo de productos. Ambas áreas mencionadas suponen que al menos existe un diseño de producto. Así sería de menor tiempo y más rentable utilizar el análisis de elementos finitos en tal proceso. El enfoque en el método de elementos finitos es tratado como una herramienta de análisis y diseño que podría integrarse con algunos modelos más conocidos de desarrollo de productos, por ejemplo en el diseño conceptual, diseño de funcionalidad y los detalles de diseño.

En el diseño conceptual es el principio donde se desarrollan las especificaciones y la concepción del diseño resulta en una disposición determinada del producto. En el detalle del diseño del producto final se desarrolla con dimensiones especificadas, propiedades de la superficie, instrucciones de producción y los costos estimados.

Es en el diseño de funcionalidad que el diseñador de ingeniería podría hacer uso de la implementación del análisis de elementos finitos basado en diseño de experimentos. Los experimentos se llevan a cabo en prácticamente todos los campos de la investigación, por lo general para descubrir algo acerca de un producto, proceso o sistema en particular.

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las que se realizan cambios intencionados a las variables de entrada de un proceso o sistema de modo que las razones de cambio en las respuestas de salida pueden ser observadas e identificadas. El investigador establece varios factores en estos experimentos al mismo tiempo cambia la configuración del factor de experimento a experimento de una manera específica. Este procedimiento produce la máxima cantidad de información

sobre el efecto de las variables de entrada en la respuesta de salida. Haciendo uso de las propiedades básicas del diseño de experimentos planeados como el método de Ingeniería robusta, los diseñadores de ingeniería pueden ejecutar una serie de análisis de elementos finitos para evaluar la influencia que tienen diferentes variables de diseño sobre un producto.

# PRÓLOGO

El presente trabajo trata del análisis, simulación y optimización del conector de estantería metálica sirve para acoplarse y transmitir la carga del material almacenado a los perfiles verticales. Debe ser lo suficientemente rígido para soportar la carga, funcional para el usuario y de fácil fabricación. El objetivo principal de la investigación es obtener el mejor diseño para la fabricación y resistencia del conector. El conector utilizado actualmente está hecho con un ángulo de 5 mm de espesor, perforado y esta soldado tres remaches de acero. Los remaches son el principal problema en el momento de la fabricación consumen mucho tiempo en la fabricación. El modelo del conector se va a desarrollar en un programa Cad y serán analizados mediante Ansys.

Realizando un análisis de los conectores existentes en el mercado y de los factores que influyen en los mismos se obtendrá un modelo que se ajuste a las necesidades planteadas anteriormente. Para el análisis de la variedad de factores en el diseño y sus interacciones utilizaremos el método de ingeniería robusta junto con el método de elementos finitos.

La reducción de tensiones en el conector se lograra combinado los parámetros utilizados, en una matriz ortogonal para obtener la mejor solución. Esta integración de métodos puede ahorrar la cantidad de material utilizado, coste de producción y el tiempo de fabricación.



## AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestra más sincera gratitud al Msc. Paul Álvarez LLoret, por guiar con profesionalismo y cariño este trabajo, por dedicar su valioso tiempo para la revisión del mismo.

Así mismo queremos agradecer a los personeros de la Universidad Politécnica Salesiana, en particular a la Maestría en “Métodos Numéricos para diseño en ingeniería” por habernos acogido en sus aulas.

Y de manera muy especial va nuestro agradecimiento a la Fábrica Tugalt y su departamento de Ingeniería por el apoyo brindado.



# CAPÍTULO I

## 1. EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

### 1.1. ANTECEDENTES

Desde su misma creación el hombre ha considerado el uso de soluciones aproximadas, como una herramienta eficaz para resolver problemas presentados en su diario vivir. Por otro lado los avances tecnológicos han simplificado las necesidades de la colectividad, en un inicio con la creación de las primeras sumadoras, después con la creación de las calculadoras científicas, y por fin por la década de los cuarenta con la invención de las computadoras, con su constante evolución hasta la fecha.

Es así que en base a aproximaciones se crearon métodos numéricos para solucionar problemas que no tienen soluciones analíticas o exactas, y con ellos aparecieron cantidad de paquetes tecnológicos y programas que colaboran con el cálculo.

Por la necesidad de su complemento, se ha desarrollado de manera conjunta la temática de los métodos numéricos con el de los ordenadores, antes de la llegada de éstos los cálculos se realizaban de forma manual, lo que conllevaba a un coste significativo por la gran cantidad de tiempo que se empleaba para resolver sendos cálculos, y por el riesgo que el hombre corre de cometer errores al resolver los problemas planteados.

La capacidad de trabajar con sistemas lineales grandes, manejar no linealidades, geometrías complicadas, problemas que involucran cargas no distribuidas, determinación de propiedades de materiales, son algunas de las ventajas que poseen estos métodos. Sin embargo por tratarse de métodos aproximados a más de validar soluciones, es necesario realizar un análisis del error que pudieren presentar dichas soluciones.

Entre algunos métodos numéricos con los que contamos están el método de la bisección, método de Newton Raphson, método de punto fijo, (Dominguez, 2002) entre los más usados para la resolución de Ecuaciones Diferenciales están el Método variacional, Elementos de Frontera, Diferencias Finitas, este último fue de uso extenso, pero a partir de la aparición del MEF por los años cincuenta y teniendo en

cuenta que cada día se cuenta con computadoras más potentes, éste método se ha vuelto indispensable para los ingenieros, matemáticos, físicos y todos aquellos que realicen investigaciones en el campo de la ingeniería o campos afines.

La posibilidad que el método de Elementos Finitos brinda en la resolución de problemas de mecánica estructural para el análisis de estructuras masivas, problemas de transferencia de calor en la representación de distribuciones de temperaturas, problemas de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones, problemas de electromagnetismo, simulación de efectos dinámicos, incluso en la meteorología, en el sector de la salud, ha ayudado a modelar el flujo sanguíneo; en el cálculo de potencial electromagnético, ha hecho que se opte por el método para utilizarlo en un sinnúmero de campos de la investigación. (Fundación Wikipedia, s.f.).

## **1.2. DEFINICIONES BÁSICAS**

Creemos que es importante antes de analizar el MEF, tomar en cuenta algunas definiciones básicas que nos brindarán el soporte necesario para entender y asimilar el método. Entre algunas de estas definiciones tenemos:

- Medio continuo
- Dominio
- Condiciones de Contorno
- Grados de Libertad
- Nodos

### **1.2.1. Medio continuo**

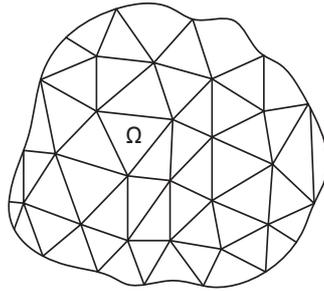
La mecánica de medios continuos es muy utilizada en la mecánica ya que propone un modelo unificado para sólidos deformables, sólidos rígidos y fluidos.

Se entiende por medio continuo a un conjunto infinito de partículas, que pueden formar parte de un sólido, de un fluido o de un gas, que va a ser estudiado macroscópicamente, esto es, sin considerar las posibles discontinuidades existentes en el nivel microscópico, atómico o molecular. En consecuencia, se admite que no hay discontinuidades entre las partículas y que la descripción matemática de este medio y de sus propiedades se puede realizar mediante funciones continuas. (Herrera, 2012).

### 1.2.2. Dominio

Llamaremos dominio al espacio físico donde se va a analizar el problema. Se denota con la última letra mayúscula del alfabeto griego omega  $\Omega$ .

Se debe diferenciar entre el dominio físico y geométrico de un problema.



**Figura 1.** Dominio  
Fuente: Autores

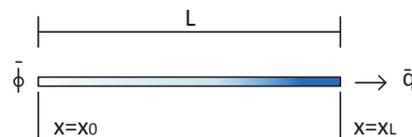
### 1.2.3. Condiciones de contorno

Entidad geométrica que sirve de interface entre el dominio y el resto del universo de la misma dimensión.

Las condiciones de contorno están determinadas por las variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema, pudiendo ser estas las cargas, los desplazamientos, las temperaturas, los voltajes...

Condiciones de contorno en una barra para la transferencia de calor sin efectos de convección a lo largo de la misma. Como condiciones de contorno, tenemos la temperatura en un extremo de la barra y en el otro extremo de la barra tenemos flujo de calor:

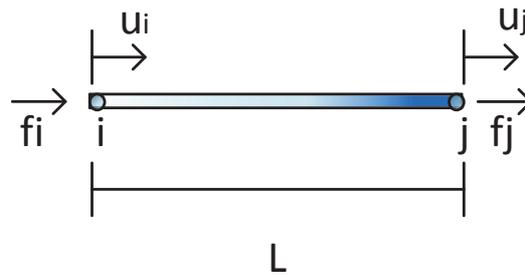
$$\begin{aligned}\varphi &= \bar{\varphi}|_{x=x_0} \\ q &= \bar{q}|_{x=x_L}\end{aligned}$$



**Figura 2.** Condiciones de contorno en una barra.  
Fuente: Autores

### 1.2.4. Grados de libertad

Se llama grado de libertad a las incógnitas a calcular en cada nodo.

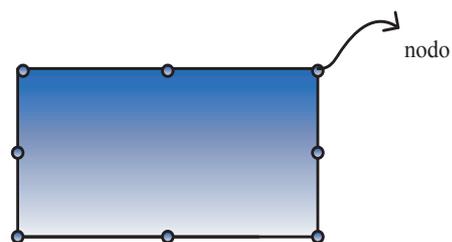


**Figura 3.** Grados de Libertad  
Fuente: Autores

En la barra de sección constante, los grados de libertad son dos  $u_i$  y  $u_j$ , es decir los desplazamientos en los nodos.

### 1.2.5. Nodo

Punto donde se encontrará la solución del problema, para luego generalizar dicha solución. Los nodos pueden estar en los vértices o dentro del elemento. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, al conjunto de nodos tomando en consideración sus relaciones de adyacencia lo conocemos con el nombre de malla.



**Figura 4.** Nodo  
Fuente: Autores

### 1.2.6. Incógnitas

Las incógnitas son las variables del sistema que deseamos determinar, en el caso de elementos estructurales entre algunas incógnitas, podemos tener los desplazamientos, tensiones, deformaciones.

## 1.3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El método de Elementos Finitos está basado en el proceso de descomposición del sistema analizado en pequeños subsistemas cuyo modelado sea más sencillo, para luego ensamblar resultados parciales y obtener el comportamiento global. Es así que se podría considerar al MEF como la fragmentación de un continuo en un conjunto de elementos conectados entre sí por una serie de puntos que reciben el nombre de nodos. La ventaja que se logra con el MEF es trabajar con un número finito de grados de libertad, cuyo comportamiento puede ser modelado por un sistema de ecuaciones lineales o no lineales.

En el método de los elementos finitos el continuo es dividido por puntos, líneas o superficies imaginarias, obteniendo así formas geométricas sencillas. En el caso lineal el dominio es dividido por puntos, en el caso bidimensional por líneas y en caso tridimensional por superficies.

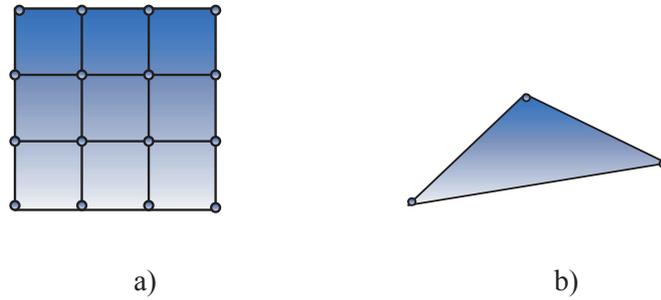
### Tipos de Elementos Finitos:

En 1-D los elementos finitos son segmentos de línea.



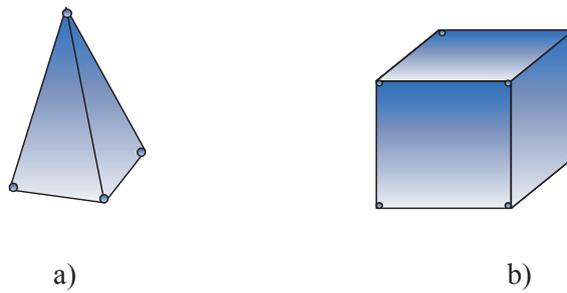
**Figura 5.** *Elemento finito lineal*  
**Fuente:** *Autores*

En 2-D son figuras geométricas de cualquier número de lados, por facilidad se usan triángulos y cuadriláteros.



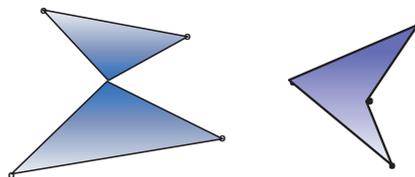
**Figura 6.** Elemento finito bidimensional a) cuadrilátero b) triangular  
**Fuente:** Autores

En 3-D los elementos finitos son poliedros de cualquier número de caras, los más usados son los tetraedros, hexágonos, dependiendo del problema a analizar.



**Figura 7.** Elemento finito tridimensional a) tetraedro b) hexaedro regular  
**Fuente:** Autores

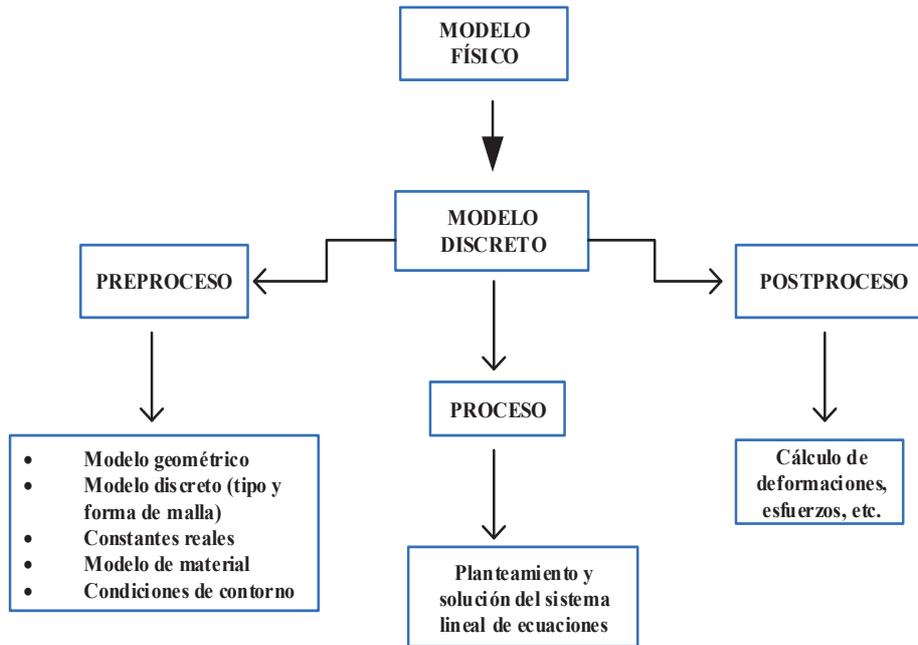
Existen elementos que son incorrectos o son muy pobres por lo tanto no deben ser escogidos ya que proporcionan una solución incorrecta o simplemente no proporcionan solución.



**Figura 8.** Elementos incorrectos  
**Fuente:** Autores

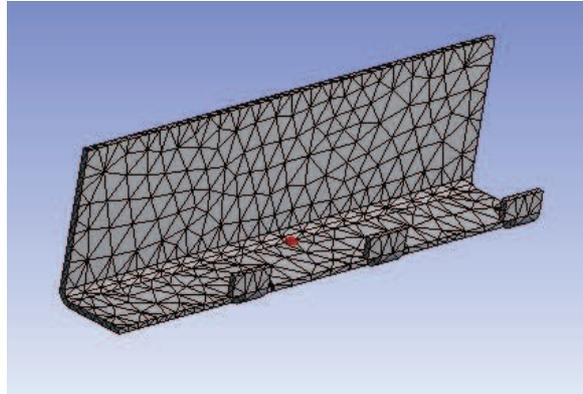
### 1.3.1. Procedimiento del método

El proceso de análisis del método de elementos finitos se puede esquematizar de acuerdo a la siguiente ilustración:



**Figura 9.** Procedimiento del MEF  
Fuente: Autores

**Discretización.-** Es el proceso de transformar el dominio geométrico continuo en una malla de elementos finitos. En éste proceso se determina el tipo, la forma y tamaño del elemento. Los elementos están unidos entre sí mediante un número finito de nodos, ubicados en el contorno de los elementos.



**Figura 10.** *Conector mallado*  
**Fuente:** *Autores*

**Determinación de las ecuaciones para cada elemento.-** En esta etapa se aplica a cada elemento las ecuaciones que gobiernan el problema, de la misma manera se aplican las condiciones de frontera del problema a tratar. Para este proceso se cuenta con varios métodos como: Método de Galerkin, de los Mínimos Cuadrados, de colocación.

**Ensamble de las ecuaciones de los elementos.-** Luego de obtener los sistemas que nos proporcionan las ecuaciones de cada elemento, en esta etapa se ensamblan en un solo sistema. El método de elementos finitos debe cumplir condiciones de continuidad en la frontera entre los elementos. Con este proceso se logra obtener una matriz cuyo tamaño es igual al número de nodos de la malla por el número de grados de libertad.

**Imposición de las condiciones de frontera.-** En esta etapa al reemplazar las condiciones de frontera la ecuación matricial se simplifica, de esta manera se reducen las operaciones al eliminar los datos conocidos del vector columna de incógnitas.

**Solución de las ecuaciones del sistema.-** Se procede a resolver el sistema de ecuaciones reducido.

**Postproceso.-** Se calculan los valores de las variables, se grafican los resultados, se analizan los mismos.

### **1.3.2. Recomendaciones para usar el MEF**

- Dependiendo del problema, la solución será más aproximada a la real cuando usemos el mayor número de elementos para discretizar el dominio

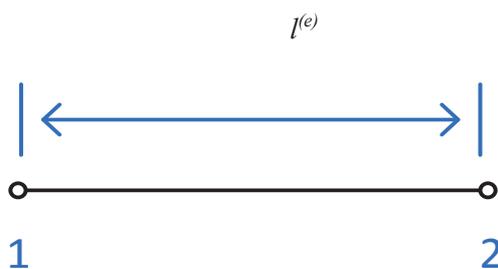
- Considerar la numeración de los nodos en la malla, dependiendo de esto podremos tener una matriz global dispersa, lo que ahorra tiempo y trabajo computacional.
- Las ecuaciones nodales pueden ser hasta cierto punto las ecuaciones centrales del método por lo que un programa de computadora podrá resolver estas ecuaciones luego obviamente de haber sido planteadas dichas ecuaciones. Sin embargo es un error dar a los nodos tanta importancia y pensar que la solución pueda ser más exacta en los nodos (Livesley, 1988). El paso más importante en el método es en realidad la definición de la aproximación, primero con la división de la región solución en subregiones o elementos finitos y después con la elección de una forma polinomial simple dentro de cada elemento.

## 1.4. ECUACIONES DEFORMACIONES Y TENSION ESTRUCTURAS

### 1.4.1. Análisis matricial de estructuras de barras

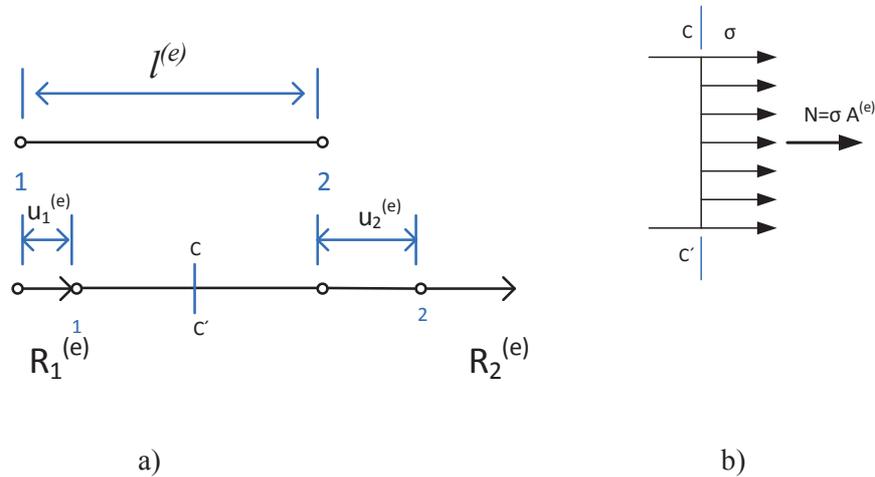
Para la obtención de las ecuaciones matriciales de una estructura de barras, se realiza el estudio del equilibrio de las diferentes barras que la componen.

Tenemos en la figura 11 una barra  $e$  de longitud  $l^{(e)}$  sometida únicamente a fuerzas axiales.



**Figura 11.** Barra sometida a fuerzas axiales  
Fuente: Autores

Deformación de una barra por fuerzas axiales



**Figura 12.** Deformación de la barra por fuerzas axiales  
 Fuente: Autores

Las ecuaciones matriciales se deducen del análisis de la resistencia de materiales que la deformación en cualquier punto de la barra es igual al alargamiento relativo de la misma, así:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l^{(e)}}{l^{(e)}} = \frac{u_2^{(e)} - u_1^{(e)}}{l^{(e)}}$$

(Ecuación 1.1)

La tensión axial  $\sigma$  está relacionada con la deformación  $\varepsilon$  por la ley de Hook:

$$\sigma = E^{(e)} \varepsilon = E^{(e)} \frac{u_2^{(e)} - u_1^{(e)}}{l^{(e)}}$$

(Ecuación 1.2)

$E^{(e)}$  es el módulo de elasticidad del material de la barra.

Por integración de las tensiones sobre la sección transversal de área  $A^{(e)}$  se obtiene el esfuerzo axial  $N$  que se transmite a través de los nodos a las barras adyacentes. Con el material homogéneo tenemos:

$$N = A^{(e)}\sigma = EA^{(e)}\frac{u_2^{(e)} - u_1^{(e)}}{l^{(e)}}$$

(Ecuación 1.3)

Estableciendo el equilibrio de las fuerzas axiales  $R_1^{(e)}$  y  $R_2^{(e)}$  actuantes en los extremos de la barra, se tiene:

$$R_2^{(e)} = -R_1^{(e)} = N = EA^{(e)}\frac{u_2^{(e)} - u_1^{(e)}}{l^{(e)}} = k^{(e)}(u_2^{(e)} - u_1^{(e)})$$

(Ecuación 1.4)

Donde:

$$k^{(e)} = \frac{EA^{(e)}}{l^{(e)}}$$

O

$$k^{(e)} = \left(\frac{EA}{l}\right)^{(e)}$$

(Ecuación 1.5)

El índice  $e$  indica que los valores se refieren a una barra particular.

Representación matricial de la ecuación 4:

$$q^{(e)} = \begin{Bmatrix} R_1^{(e)} \\ R_2^{(e)} \end{Bmatrix} = k^{(e)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^{(e)} \\ u_2^{(e)} \end{Bmatrix} = K^{(e)}\alpha^{(e)}$$

(Ecuación 1.6)

$K^{(e)}$  se denomina matriz de rigidez de la barra y es función únicamente de la geometría de la barra ( $l^{(e)}, A^{(e)}$ ) y de sus propiedades mecánicas  $E^{(e)}$ .

$\alpha^{(e)}$  y  $q^{(e)}$  son los vectores de desplazamiento y de fuerzas de los nudos de la barra.

La ecuación 1.6 es la expresión matricial de equilibrio de la barra aislada. Si además actuará sobre la barra una fuerza uniformemente distribuida por unidad de longitud de

intensidad  $b^{(e)}$ , la ecuación 1.6 se modifica repartiendo el efecto total de dicha fuerza en partes iguales en cada nodo así:

$$q^{(e)} = \begin{Bmatrix} R_1^{(e)} \\ R_2^{(e)} \end{Bmatrix} = k^{(e)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^{(e)} \\ u_2^{(e)} \end{Bmatrix} - \frac{(bl)^{(e)}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = K^{(e)}a^{(e)} - f^{(e)}$$

(Ecuación 1.7)

Donde:

$$f^{(e)} = \frac{(bl)^{(e)}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

(Ecuación 1.8)

Es el vector de fuerzas que actúan en los nodos de la barra debido a la carga distribuida.

La expresión de equilibrio de una estructura compuesta de barras como la considerada se obtiene a partir de la regla que expresa que la suma de las fuerzas en un nodo, debidas a las diferentes barras que concurren en el mismo, es igual a la fuerza exterior que actúa en dicho nodo. Matemáticamente:

$$\sum_{e=1}^{n_e} R_i^{(e)} = R_j^{exterior}$$

(Ecuación 1.9)

Donde la sumatoria se extiende a todas las barras  $n_e$  que concurren en el nodo de numeración global  $j$ . Sustituyendo en dicha expresión los valores de las fuerzas de extremo de cada barra  $R_i^{(e)}$  en función de los desplazamientos de los nodos a través de la ecuación 1.7, se obtiene la ecuación matricial de equilibrio global de la estructura como:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & \dots & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{21} & \dots & \dots & \dots & K_{2n} \\ \cdot & & & & & \\ K_{21} & K_{21} & \dots & \dots & \dots & K_{2n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{Bmatrix}$$

(Ecuación 1.10)

$$K\mathbf{a} = \mathbf{f}$$

(Ecuación 1.11)

**K** es la matriz de rigidez de la estructura

**a** y **f** son respectivamente los vectores de desplazamiento y de fuerzas exteriores de todos los nodos de la estructura .

El proceso de obtención de las ecuaciones 1.10 y 1.11 recibe el nombre de ensamblaje.

La resolución de dichas ecuaciones proporciona los valores de los desplazamientos en todos los nodos de la estructura a partir de los cuales podemos conocer los esfuerzos internos en las barras. (Oñate, 1995)

## 1.5. LIMITACIONES DEL MÉTODO

Dentro de las limitaciones del método podemos encontrar entre algunas, las siguientes:

- Siempre es necesario validar las soluciones, y si el usuario no tiene las bases físicas del problema, se puede usar soluciones que no están acordes con el problema.
- Las soluciones arrojadas por el método son aproximadas, dependiendo del margen de error con el que nos manejemos, dichas soluciones pueden o no satisfacer el problema estudiado.

- Las soluciones suelen ser más aproximadas cuando se usa un mallado más fino, el inconveniente de hacerlo conlleva a mayor tiempo de cálculo.
- Los detalles en la geometría de los problemas de aplicación pueden resultar muy difíciles de ajustar.
- Una simulación requiere un gran número de ensayos, y dependiendo del ejercicio puede llegar a tomar semanas realizar una simulación lo que requiere tiempo y trabajo computacional.

## **CAPITULO II**

### **2. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE INGENIERIA ROBUSTA**

#### **2.1. ANTECEDENTES**

El término diseño robusto se refiere al diseño de un producto que no causa problemas en todas las condiciones de funcionamiento. Un producto que funciona bajo cualquier condición es obviamente bueno. La cuestión clave no es diseño en sí, sino la forma de evaluar las funciones en condiciones conocidas y desconocidas. Nadie se opone a la idea general de que debemos diseñar un producto que funciona correctamente en diversas condiciones durante su vida de diseño. Lo que es importante es descubrir la forma de evaluar las funciones adecuadas.

El método convencional ha sido la de examinar si un producto funciona correctamente bajo varias condiciones de prueba predeterminados. Si el producto no funciona correctamente en algunas de las diferentes condiciones, constantes de diseño (parámetros) se cambian para que funcionen correctamente, este procedimiento no garantiza el correcto funcionamiento del producto dentro de su tiempo de vida en diversas condiciones desconocidas.

La técnica de colocación de las condiciones de los experimentos que involucran múltiples factores fue propuesta por primera vez por el inglés, Sir Ronald Aylmer Fisher. El método es conocido popularmente como el diseño factorial de experimentos. Un diseño factorial completo identificará todas las combinaciones posibles para un conjunto dado de factores por ejemplo para 8 factores de control A con dos niveles y de B a H con 3 niveles el número de combinaciones es  $2 \times 3^7 = 4374$ , la combinación óptima de los niveles de los factores está entre las 4374 rondas. Como la mayoría de los experimentos industriales por lo general implican un gran número de factores, un diseño factorial completo resultará en un gran número de experimentos lo que consume mucho tiempo y el costo es excesivo. Para reducir el número de experimentos a un nivel práctico, se selecciona sólo un pequeño conjunto de todas las posibilidades. El método de selección de un número limitado de

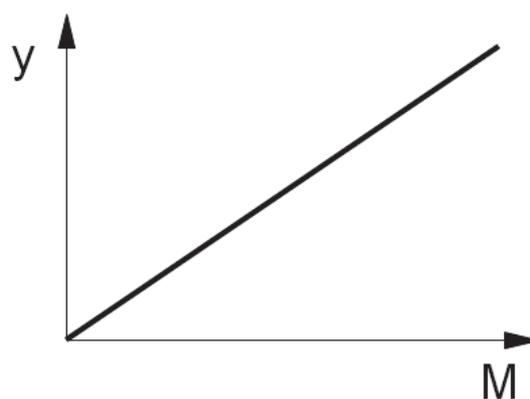
experimentos que produce la mayor información se conoce como un experimento parcial, esto no simula la realidad (resultados del experimento pueden no ser confirmados en la práctica). Aunque con este método no existen pautas generales para su aplicación o el análisis de los resultados obtenidos mediante la realización de los experimentos.

Taguchi construyó un conjunto especial de las directrices generales de diseño de experimentos factoriales (Taguchi, G. Chowdhury, S.; y Wu, Y., 2005) que cubren muchas aplicaciones. El método de Ingeniería Robusta lo que busca es una serie de planteamientos para predecir y prevenir las dificultades o problemas que podrían ocurrir en el mercado después de que un producto se vende y es usado por el cliente bajo múltiples condiciones ambientales. Diseño robusto (incluyendo diseño de productos y procesos) generalmente significa diseñar un producto que puede funcionar correctamente en diversas condiciones de uso.

## 2.2. CONCEPTOS BÁSICOS

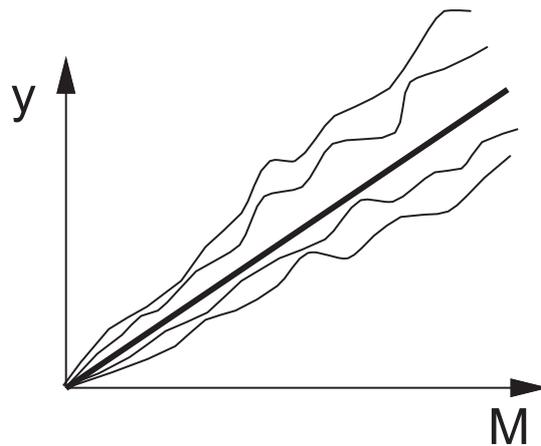
### 2.2.1. Definición

Los sistemas técnicos poseen una función básica, que se debe cumplir para garantizar la satisfacción del cliente. La capacidad de mejorar de manera eficaz el desempeño del sistema está directamente relacionada a nuestra capacidad de medir la función básica del producto/proceso (Taguchi, et al, 2005). Hay que identificar una función básica mensurable y de esta manera es fácil ver el comportamiento ideal de la misma. La Ingeniería Robusta, buscamos alcanzar el estado ideal de comportamiento del producto/proceso, o lo que se llama función ideal.



**Figura 13.** *Función ideal m señal; y respuesta*  
**Fuente:** Autores

El objetivo de un producto o proceso es alcanzar la función ideal pero desafortunadamente la realidad es distinta a ser ideal. En la práctica, observamos desviaciones en relación a lo ideal. En otras palabras, existe la variabilidad del producto/proceso. Todo sistema físico sufre pérdidas cuando transforma energía para poder realizar su función básica.



**Figura 14.** *Variación en la función ideal.*  
**Fuente:** Autores

La variabilidad funcional se produce por diferentes factores, tales pérdidas usualmente no son uniformes, pero varían bajo la influencia de numerosos factores asociados a las condiciones ambientales, condiciones de uso y deterioro, los cuales llamamos factores de “ruido”

Los factores de ruido son los causantes de la variación funcional entonces debemos tener en una estrategia para tratar con ellos no debemos ignorarlos a menos que no sean importantes pero por lo general son los principales causantes de los problemas. Eliminar el ruido puede resultar caro o en ocasiones resulta imposible eliminarlo, la manera más económica para tratar el ruido es tornar el producto o proceso inmune al ruido mediante el ajuste de los factores de control. Así implementar la robustez en el diseño es encontrar la mejor combinación de los factores de control que tornen la función del producto o proceso estable en presencia de los factores de ruido.

En la I.R., el primer paso es reducir la variabilidad, por la elección correcta del nivel de cada factor de control. Después se realiza el ajuste de la media para el valor ideal

Taguchi ha previsto un nuevo método de realizar el diseño de experimentos que se basan en directrices bien definidas. Este método utiliza un conjunto especial de matrices denominadas matrices ortogonales. Estas matrices estándar estipula la manera de llevar a cabo el número mínimo de experimentos que podría dar la información completa de todos los factores que afectan el parámetro de rendimiento.

### **2.2.2. Matriz ortogonal**

Una matriz ortogonal o arreglo ortogonal es cuando para cualquier nivel de un factor, el número de ocurrencias de cada nivel de los demás factores fuera igual (AO integralmente balanceado).

Hay muchas matrices ortogonales estándar disponibles, cada una de las matrices es para un número específico de factores de diseño independientes y niveles. Por ejemplo, si se quiere llevar a cabo un experimento para comprender la influencia de 4 diferentes factores y cada variable tiene 3 niveles, una matriz ortogonal L9 podría ser la elección correcta.

La Tabla 1 muestra una matriz ortogonal L9. Donde existen 9 experimentos para ser realizados y cada experimento se basa en la combinación de valores de cada nivel como se muestra en la tabla. Por ejemplo, el tercer experimento se lleva a cabo manteniendo el factor 1 en el nivel 1, el factor 2 a nivel 3, el factor 3 en el nivel 3, y el factor 4 y en el nivel 3.

Con apenas 9 rondas, permite separar los efectos principales de los 4 factores de control, permitiendo identificar la combinación óptima de los niveles de los factores, simulando la realidad y mayor oportunidad de confirmar resultados en la práctica.

La ortogonalidad cumple un papel fundamental en el Diseño Robusto, ya que cancela el efecto de los demás factores sobre un dado factor cuyo efecto deseamos estimar así, al comparar las medias de los niveles de aquel factor, la diferencia observada contendrá apenas la información sobre el efecto del factor en cuestión. Taguchi recopiló y desarrolló 18 Arreglos Ortogonales (AO).

**Tabla 1.** Distribución de una matriz ortogonal L 9.  
Fuente: Autores

<b>L 9 (3<sup>4</sup>) matriz ortogonal</b>					
	<b>Factores de control</b>				
<b>Experimento</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>	<b>Factor 3</b>	<b>Factor 4</b>	<b>Respuesta(y)</b>
1	1	1	1	1	y1
2	1	2	2	2	y2
3	1	3	3	3	y3
4	2	1	2	3	y4
5	2	2	3	1	y5
6	2	3	1	2	y6
7	3	1	3	2	y7
8	3	2	1	3	y8
9	3	3	2	1	y9

### 2.2.3. Propiedades de una matriz ortogonal

Las matrices ortogonales tienen las siguientes propiedades especiales que reduce el número de experimentos para llevarse a cabo.

1. La columna en cada una de los factores de la tabla de arriba tiene una combinación especial de cada nivel. Todos los niveles aparece el mismo número de veces. Para la matriz L9 el factor 4, nivel 1, nivel 2 y nivel 3 aparece tres veces. Esto se llama la propiedad de equilibrio de matrices ortogonales.
2. Todos los niveles de los factores se utilizan para la realización de los experimentos o sea igual número de repeticiones de cada nivel del factor.
3. Un AO es una tabla matemática (matriz), y puede ser expresada usando coeficientes numéricos. Por ejemplo, el L4 tabla 2.2. (Wu, Y., Wu, A., 1997)

**Tabla 2.** Notación convencional  
Fuente: Autores

Notación convencional			
L4	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	2

**Tabla 3.** Notación con coeficientes  
Fuente: Autores

Notación con coeficientes			
L4	A	B	C
1	+1	+1	+1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	-1	-1	+1

Se observa que la multiplicación de los coeficientes de cualquiera de las dos columnas resulta en los coeficientes de la tercera. Esto implica que si el factor A fuera colocado en la columna 1 y el factor B en la columna 2, el efecto de la interacción AB (si existiera) aparecerá en la columna 3. De igual modo, con el factor A en la columna 1, si colocamos un factor C en la columna 3, la interacción AC, aparecería en la columna 2. La columna de cada factor es mutuamente ortogonal a cualquier otra columna. El producto interno de vectores correspondientes a los pesos es igual a cero.

#### 2.2.4. Número mínimo de experimentos para llevar a cabo

Los grados de libertad de un factor son el mínimo número de comparaciones necesarias para estimar el efecto de un factor.

El diseño de experimentos utilizando la matriz ortogonal es, en la mayoría de los casos, eficiente en comparación con muchos otros diseños estadísticos. El número mínimo de experimentos que se requieren para llevar a cabo el método de Taguchi se puede calcular en base a los grados de libertad del enfoque.

$$N_{Taguchi} = 1 + \sum_{i=1}^C (L_i - 1)$$

(Ecuación 2.1)

Donde:  $N_{Taguchi}$ ; Número mínimo de experimentos. C; Número de factores o columnas;  $L_i$  Nivel de cada factor.

Por ejemplo, en el caso de estudio de 8 factores de control que tiene 1 factor de control con 2 niveles y los restantes 7 factores con 3 niveles (L18 matriz ortogonal), el número mínimo de experimentos requeridos en base a la ecuación anterior es de 16. Debido a la propiedad de equilibrio de las matrices ortogonales, el número total de experimentos es múltiplo de 2 y 3 Por lo tanto el número de experimentos para el caso anterior es 18.

### 2.2.5. Medición de la función básica

El objetivo de ingeniería es determinar condiciones robustas a partir de experimentos en pequeña escala que provean resultados reproducibles en alta escala; y hacer eso con mínimo costo, en el menor tiempo posible. La elección de la respuesta a ser medida es la etapa más crítica de la experimentación para alcanzar aquel objetivo, elecciones malas traen varios problemas con son:

- No-reproductibilidad de los resultados
- No-aditividad de los efectos de los factores
- Dificultad de alcanzar la robustez

Para ilustrar esto consideremos el siguiente ejemplo propuesto por Taguchi. (Taguchi, et al, 2005).

Tratamiento de diabetes.

La función objetivo  $y$ = el grado de bienestar del paciente.

Los factores de control serían los remedios A y B si al medir la función básica determinamos una característica por atributos obtenemos el siguiente resultado ver tabla 4.

Claramente se nota que existe una fuerte interacción entre los factores que no permite determinar una respuesta correcta, si analizamos un poco y nos preguntamos ¿Cuál es la función básica del remedio contra la diabetes? Y la respuesta es la cantidad de insulina.

**Tabla 4.** *Ejemplo de función básico por atributos*  
Fuente: Autores

Combinaciones	Descripción	Resultado (atributos)
---------------	-------------	-----------------------

A1B1	No toma A ni B	Se siente mal
A2B1	Toma sólo A	Se siente mejor
A1B2	Toma sólo B	Se siente mucho mejor
A2B2	Toma A y B	Muere

Ahora la función  $y$  = cantidad de insulina

Remedio A: 80% de la cantidad de insulina necesaria

Remedio B: 150% de la cantidad de insulina necesaria

Los efectos de A y B son ahora aditivos, y por lo tanto, se puede proveer el efecto de tomar A y B (230% de la insulina necesaria)

Los Tipos de Respuesta que se pueden seleccionar para una función básica son:

- Respuesta Dinámica: la mejor
- Ventana de Operación: muy buena
- Nominal-Mejor: muy buena
- Mayor-Mejor: buena
- Menor-Mejor: no tan buena
- Atributos: débil

Todos los esfuerzos deben ser realizados para identificar características dinámicas o Nominal-mejor, solamente utilizando las peores cuando no hubiera otra alternativa.

### **2.3. SUPUESTOS DEL MÉTODO TAGUCHI**

El supuesto aditivo implica que los efectos individuales o principales de los factores de control sobre la función básica son separables. Bajo este supuesto, el efecto de cada factor puede ser lineal, cuadrática o de orden superior, pero el modelo asume que no existe ningún efecto de interacciones entre los factores individuales (Wu, et al, 1997). Esto significa que el efecto del factor de control 1 en la función básica no depende de los diferentes ajustes de nivel de cualquier otro factor de control y viceversa. Si en algún momento, este supuesto es violado, entonces la aditividad de los efectos principales no se sostiene, y las variables interactúan.

Es por eso que IR no busca encontrar la interacción de los factores de control, el enfoque debe ser estudiar el mayor número posible de efectos principales de los factores de control, con el objetivo de tornar el producto/proceso robusto. Las columnas de las AOs deben ser usadas para estudiar factores de control, y no sus interacciones.

En I.R. investigar y explorar la interacción entre factores de control y factores de ruido es exactamente la razón de ser del experimento (identificación de la condición robusta de los factores de control en relación al ruido). Este tipo de interacción no es considerada en el diseño de experimentos clásico (cuyo diagrama experimental tradicional no separa factores de control y factores de ruido) la disposición experimental que usamos en la I.R. y el análisis vía relación S/N (señal/ruido) permiten detectar este tipo de interacción, prescindiendo de la construcción de gráficos de interacción o análisis de variancia.

## **2.4. EL DISEÑO DE UN EXPERIMENTO**

El diseño de un experimento implica los siguientes pasos:

1. Definir la función básica
2. Definir qué y cómo medir
3. Definir factores y niveles
4. Selección de una matriz ortogonal y formular el experimento
5. Llevar a cabo el experimento
6. Análisis de los datos
7. Confirmar los resultados

Los detalles de los pasos anteriores se dan a continuación

### **2.4.1. Definir la función básica**

Expresa en una frase (verbo de acción + sustantivo) la función básica del sistema ¿Qué es lo que el sistema hace para el cliente? ¿Cuál es el trabajo realizado? (pensar en energía). Por ejemplo en un sistema de freno la función básica sería “*desacelerar el vehículo*”. (Taguchi, et al, 2005).

### **2.4.2. Definir qué y cómo medir**

Para una característica dinámica se debe definir una respuesta  $y$  (directamente relacionada con la función básica); además del factor de señal  $M$  (que controle proporcionalmente la respuesta).

Para las demás características (no-dinámicas) Definir la respuesta  $y$ , siguiendo las directrices para la elección de características (haga todo el esfuerzo para escoger magnitudes continuas, que involucren energía, directamente relacionadas con la función del producto/proceso)

### **2.4.3. Definir factores y niveles**

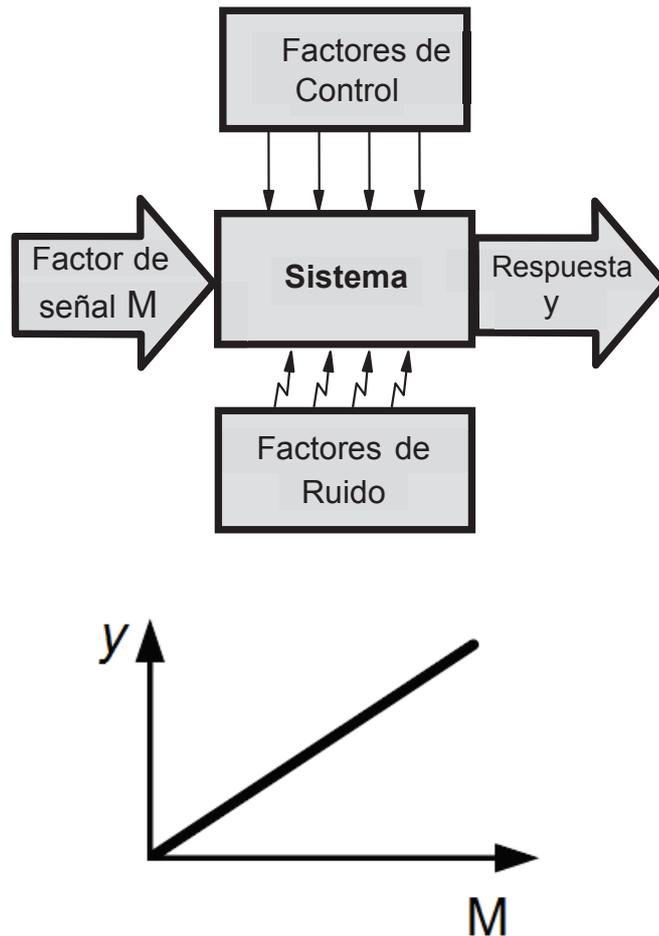
Antes de llevar a cabo el experimento, el conocimiento del producto / proceso bajo investigación es de vital importancia identificar los factores de control que pueden influir en el resultado.

Una vez que se deciden los factores de control, se decide el número de niveles para cada variable. Prefiera variables continuas, en vez de variables discretas, explore el rango más amplio posible de niveles para los factores; no se restrinja a tolerancias de manufactura, La idea es explorar los límites de la tecnología. La selección del número de niveles depende de cómo el parámetro de rendimiento se ve afectado debido a diversos ajustes de nivel. Si el parámetro de rendimiento es una función lineal de la variable independiente, entonces el número de ajuste de nivel será 2. Sin embargo, si la variable independiente que no está relacionada linealmente, entonces se podría ir para 3, 4 o más altos niveles en función de si la relación es cuadrática, cúbica o de orden superior.

En ausencia de la naturaleza exacta de la relación entre la variable independiente y el parámetro de rendimiento, se podría elegir 2 ajustes de nivel. Después de analizar los datos experimentales, se puede decidir si la hipótesis de ajuste del nivel es correcto o no en base a la contribución del porcentaje y los cálculos de error.

Cuando se ha determinado todos los factores relevantes se debe separar factores de control y factores de ruido. Definir la estrategia de ruido: cómo forzar el ruido en el experimento.

En este punto es de mucha ayuda la realización de un diagrama de proceso (Taguchi, et al, 2005) que ayude a visualizar mejor todos los componentes involucrados en el sistema. (Ver figura 15).



**Figura 15.** Diagrama de proceso para un estudio de Ingeniería Robusta.  
**Fuente:** Autores

#### 2.4.4. Selección de una matriz ortogonal y formulación del experimento

Una vez que se decide el número mínimo de experimentos, la selección de la matriz ortogonal se basa en el número de variables y número de niveles de factores para cada variable independiente.

Antes de seleccionar la matriz ortogonal, el número mínimo de experimentos que se realizarán se fijará en función del número total de grados de libertad presentes en el estudio. El número mínimo de experimentos que se deben ejecutar para estudiar los factores será más que el total de grados de libertad disponibles. El grado de libertad de un factor de control es el número mínimo de comparaciones para estimar el efecto de un factor. El número de grados de libertad asociados con cada factor en estudio es igual a uno menos que el número de niveles disponibles para ese factor. Por lo tanto el total de grados de libertad sin efecto de interacción es 1 + como ya se ha dado por la ecuación 2.1. Por ejemplo, en el caso de las 11 variables independientes, cada uno con 2 niveles, el total de grados de libertad es 12. Por lo tanto la matriz ortogonal seleccionada deberá tener por lo menos 12 experimentos. Una matriz ortogonal L12 satisface este requisito.

#### **2.4.5. Llevar a cabo el experimento**

Una vez que se selecciona la matriz ortogonal, los experimentos se llevan a cabo de acuerdo con las combinaciones de nivel. Genere planillas para las rondas del experimento y realice las rondas del experimento.

#### **2.4.6. Análisis de los datos**

Al tener todos los experimentos realizados calcular la media y la relación señal/ruido (respuesta no-dinámica), o  $\beta$  y relación señal/ruido (característica dinámica), para cada ronda. Seguidamente construir e interpretar las tablas de respuesta y definir la combinación óptima realizando previsiones para la combinación óptima (S/N y media/b)

Para características dinámicas o nominal-mejor, realizar la optimización en dos etapas: 1) aumentar la relación S/N; 2) ajustar la media/sensibilidad ( $\beta$ ).

#### **2.4.7. Confirmar los resultados**

Definir el experimento confirmatorio sirve para esclarecer dudas del experimento anterior e investigar nuevas regiones para optimización.

Realizar el experimento confirmatorio y analizar los resultados. Si el mejoramiento no fue confirmado, regresar a la etapa 3 o considerar el Diseño de Tolerancias. Comparar las ganancias obtenidas (situación anterior x optimizada).

## **2.5. DISEÑO ROBUSTO**

Una causa principal del bajo rendimiento en los procesos de fabricación es la variación de fabricación. Estas variaciones de fabricación incluyen la variación en la temperatura o la humedad, la variación en las materias primas, y la deriva de los parámetros del proceso. Estas fuentes de variación o ruido son las variables que son imposibles o muy costoso de controlar.

El objetivo del diseño robusto es encontrar los valores de los parámetros controlables para el cual el ruido o variación tiene un efecto mínimo en el producto o características funcionales de proceso. Es de señalar que el objetivo no es encontrar los valores de los parámetros para los factores de ruido incontrolables, sino los valores para los factores de diseño controlables. Para alcanzar este objetivo, los parámetros de control, también conocidos como variables de matriz interior, se varían sistemáticamente según lo estipulado por la matriz ortogonal interior. Para cada experimento de la matriz interior, una serie de nuevos experimentos se llevan a cabo mediante la variación de los ajustes de nivel de las variables de ruido incontrolables. Las combinaciones de nivel de variables de ruido se realizan utilizando la matriz ortogonal exterior.

A continuación se detalla como en IR se mide la robustez, en la I.R., se usa la relación señal/ruido (S/N, “signal-to-noise ratio”) para medir la robustez (Taguchi, et al, 2005). La relación S/N es un número directamente proporcional al “grado de idealidad” del sistema (Wu, et al, 1997).

La relación S/N fue inicialmente utilizada para la medida, era un indicador usado hace décadas en la Ingeniería de Comunicaciones. El Dr. Taguchi generalizó el concepto para todo y cualquier “sistema técnico”. Por lo tanto, la relación S/N tiene su origen en la Ingeniería, y no en la Estadística. No se trata de un “estimador” estadístico, usado para hacer inferencias sobre la “población”, y si un indicador numérico del grado de robustez o calidad del sistema.

La relación S/N de un sistema de medida se define:

$$S/N = \frac{\text{Potencia de la señal}}{\text{Potencia del ruido}}$$

(Ecuación 2.2)

Pero generalizando para cualquier sistema técnico:

$$S/N = \frac{\text{Energía util}}{\text{Energía perdida}}$$

(Ecuación 2.3)

En la práctica, se usan fórmulas matemáticas para calcular la relación S/N a partir de datos obtenidos en los experimentos. La relación S/N se mide en una escala logarítmica en decibeles (db). La definición original de esta medida es:

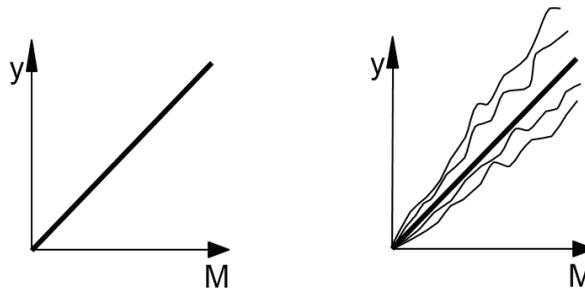
$$dB = 10 \log \frac{\text{Potencia de la señal}}{\text{Potencia del ruido}}$$

(Ecuación 2.4)

El objetivo de alcanzar la robustez es minimizar la variabilidad funcional, en la figura 16. Se observan dos situaciones: La función ideal y la realidad. La realidad tiene mucha variabilidad que provoca síntomas de mal funcionamiento y pérdidas económicas.

a) Función Ideal

b) Realidad

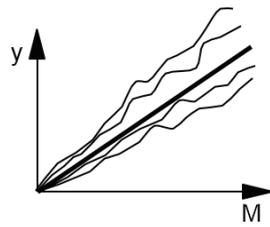


**Figura 16.** a) *Función Ideal* b) *Realidad, pérdida de energía, Variación, pérdida de dinero*  
Fuente: Autores

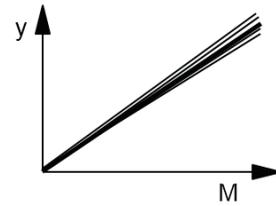
Al evaluar la robustez con la relación S/N un producto o proceso con una alta variabilidad tendrá una baja S/N y al contrario una alta relación S/N representa baja

variabilidad. Si aseguramos un desempeño próximo del ideal, (alta relación S/N) en el diseño del producto/proceso, no tendremos problemas de calidad o reclamos de parte del cliente.

**a) Baja S/N**



**b) Alta S/N**



**Figura 17.** a) Baja relación S/N b) Alta relación S/N  
**Fuente:** Autores



## **CAPÍTULO III**

### **3. LA INTEGRACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y EL MÉTODO DE INGENIERIA ROBUSTA**

#### **3.1. SIMULACIÓN DEL EXPERIMENTO REAL**

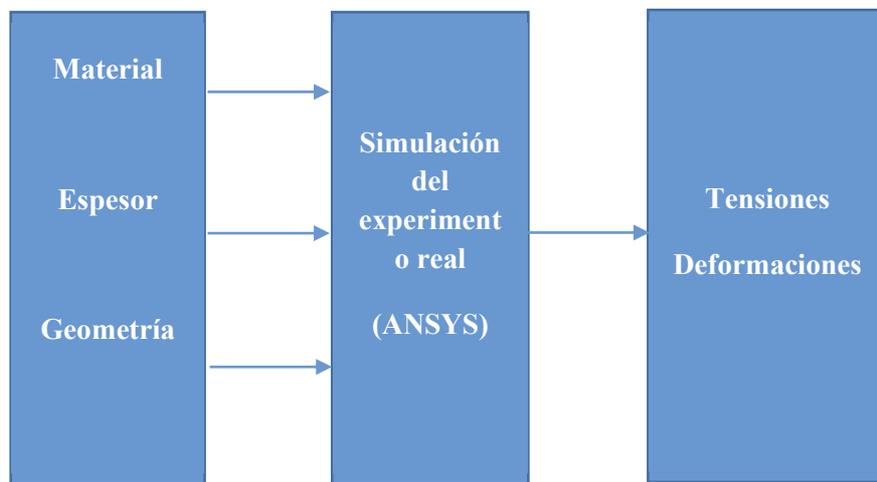
La simulación por ordenador se utilizara para optimizar el diseño del conector de estantería metálica. El método de optimización de parámetros de Ingeniería Robusta, en conjunto con la simulación por ordenador de elementos finitos, se utilizara para eliminar la necesidad de fabricar herramientas caras y piezas moldeadas, lo que conduce a diseños más rápidos y robustos de productos o procesos.

Taguchi basa su método en herramientas estadísticas convencionales junto con algunas pautas para trazar el diseño de experimentos y analizar los resultados de estos experimentos. El enfoque de Taguchi para el diseño de calidad se aplica a todo el proceso de desarrollo y fabricación de un producto, desde el concepto inicial, a través del diseño, la ingeniería, la fabricación y la producción. Para que el diseño de un producto tenga reproducibilidad aguas abajo, las características de evaluación deben ser examinadas, así como señales y ruidos. Para que un diseño se convierta en óptimo aguas abajo, debemos tomar en cuenta todas las condiciones de uso en el mercado y así determinar los niveles de las señales y ruidos para calcular la relación SN. El uso de la relación SN es un factor clave. Por lo tanto, la razón por la que sólo los principales efectos de los factores de control se asignan a una matriz ortogonal es para determinar si tienen la aditividad para la relación SN.

La forma tradicional de realizar el método de Ingeniería Robusta de diseño de experimentos es establecer las combinaciones de niveles de diversos factores que influyen en el producto o proceso y llevar a cabo el experimento en tiempo real y estudiar los resultados. Sin embargo, hay muchos casos donde no es posible llevar a cabo un experimento real. Uno de los requisitos básicos del método de Ingeniería Robusta es que todos los experimentos se lleven a cabo sin alterar las combinaciones de los niveles de las variables de diseño de entrada para cada experimento. Esto puede no ser siempre posible en un experimento real debido a las muchas dificultades

prácticas en la realización del experimento como un estudio a muy alta temperatura, presión, condiciones peligrosas, coste, tiempo, etc.

En lugar del experimento real podría ser simulado mediante el uso de diversas herramientas analíticas o técnicas numéricas. Por ejemplo, en esta tesis se trata del estudio del caso del diseño de productos basados en el enfoque de Taguchi que implica optimización paramétrica de la geometría de un conector de estantería metálica con el objetivo de la reducción de la masa con la restricción de tensión y deformación. El software de análisis de elementos Finitos como ANSYS Workbench se utilizara para obtener acceso a los parámetros CAD del conector dentro de un proceso de evaluación paramétrica de elementos finitos y optimización como se muestra en la Figura 18.



**Figura 18.** *Simulación del experimento en tiempo real utilizando herramientas numéricas*  
**Fuente:** Autores

Las siguientes son las ventajas de simular el experimento real.

1. Fácil de variar la gama de valores de los parámetros de entrada. En el caso de un experimento real, los valores extremos están limitados por las limitaciones prácticas.
2. Cualquier combinación de niveles de las variables independientes es posible.
3. La repetibilidad de los resultados experimentales simuladas informáticos es muy alta.

4. El tiempo y costo requerido para simular el experimento es, en muchos casos el menor.
5. Fácil acceso a los resultados que normalmente no son posibles.

El análisis de elementos finitos puede ser utilizado eficazmente como una herramienta experimental y el método de ingeniería Robusta como una herramienta para diseñar el experimento más eficaz.

### **3.2. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS Y EL MÉTODO DE INGENIERÍA ROBUSTA COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO**

El método de los elementos finitos es una de las poderosas técnicas numéricas para resolver el fenómeno físico complejo que se rige por las ecuaciones diferenciales. Muchos de los problemas prácticos de ingeniería como estructural, térmica, magnética, acústica, etc. pueden ser resueltos por el método de los elementos finitos. Además, el método de elementos finitos es una herramienta cada vez más común para el diseño de ingeniería. Cada diseño está definido por un número de variables de diseño que afectan el rendimiento del diseño.

Con el fin de mejorar el rendimiento del diseño, es esencial llegar a las combinaciones de niveles adecuados de los parámetros de entrada que afectan al rendimiento del diseño. Al mismo tiempo, puede que no sea necesario tener en cuenta las variables de diseño que no contribuyen de manera significativa en el producto o proceso. Muchos de los programas de elementos finitos estándar o paquetes no tienen opciones para comprobar la contribución o la importancia de una variable de diseño en el parámetro de rendimiento. Una manera de resolver este problema es utilizar el diseño de experimentos para variar los valores de los parámetros de diseño de entrada y predecir el significado de cada variable mediante el estudio de la variación de la (parámetro de rendimiento) función objetivo.

La técnica de Diseño de Experimentos (DOE), específicamente matrices ortogonales, están empleados en el enfoque de Ingeniería Robusta para variar sistemáticamente y probar los diferentes niveles de cada uno de los factores de control. Para implementar un diseño robusto, Taguchi aboga por el uso de una "matriz interior" y una "matriz externa" (Wu, et al, 1997). El "conjunto interior" se compone de las matrices ortogonales que contienen la configuración del factor de control. El "conjunto exterior" se compone de las matrices ortogonales que contienen los factores de ruido y

sus valores, que son objeto de investigación. La combinación de la "matriz interior" y "matriz exterior " constituye lo que se denomina " diseño de parámetros completo." Se utiliza una gama de productos para probar sistemáticamente varias combinaciones de los valores de los factores de control sobre todas las combinaciones de los de factores ruido, después de lo cual se obtiene la respuesta de salida media  $\bar{y}$  y la desviación estándar  $S$  las mismas que pueden ser aproximados para cada ejecución mediante las siguientes ecuaciones:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

(Ecuación 3.1)

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}$$

(Ecuación 3.2)

Los ajustes de los parámetros preferidos se determinan entonces mediante el análisis del (SN) Relación de "señal-ruido", donde los niveles de factor que maximizan la relación SN adecuada son las más óptimas. Las respuestas al ser evaluadas por la relación SN (la mejor medida) analiza la media y la variancia *simultáneamente* permitiendo detectar interacciones entre factores de control y factores de ruido (clave para alcanzar la robustez) además *tienen relación directa con la reducción de costo* (función pérdida) y *reducción de variabilidad*. También interesa el análisis de la respuesta media que permite estimar los efectos principales de los factores de control y de los factores de ruido sobre la respuesta media además de comparar los factores de ruido.

Hay tres tipos estándar de relaciones SN dependiendo de la respuesta de rendimiento deseado:

- Menor mejor: para hacer la respuesta del sistema lo más pequeño posible, el valor ideal debe ser cero, como ejemplos tenemos ruido audible, distorsión.

$$SN_S = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

(Ecuación 3.3)

- Nominal mejor: para reducir la variabilidad en torno a un objetivo por ejemplo espesor de capas, voltaje de salida, diámetro.

$$SN_T = 10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{S^2} \right)$$

(Ecuación 3.4)

- Mayor mejor: para hacer la respuesta del sistema lo más grande posible, el valor ideal es infinito por ejemplo resistencia mecánica, presión de extracción.

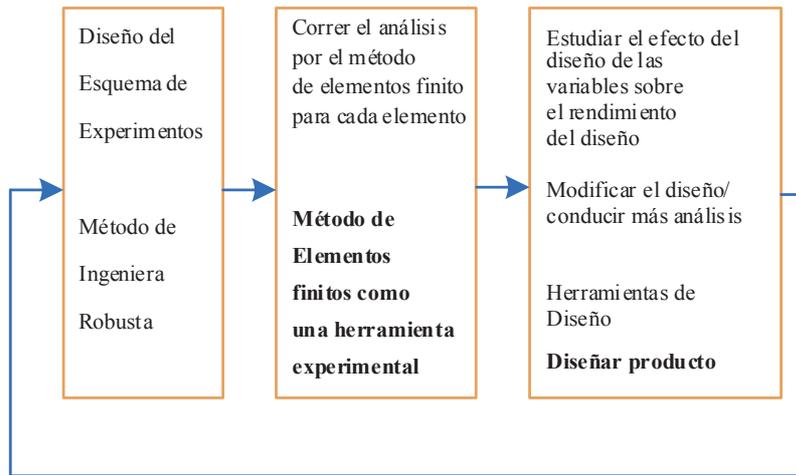
$$SN_L = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

(Ecuación 3.5)

Esta tesis trata de la optimización paramétrica de la geometría, el objetivo es la reducción de la masa del producto con la restricción de la tensión. El software de análisis de elementos Finitos ANSYS Workbench se utilizara para obtener acceso a los parámetros CAD y la tensión dentro de una optimización de parámetros de elementos finitos.

Los resultados de un análisis de elementos finitos dependen de varias variables de entrada, tales como propiedades de los materiales y parámetros de CAD. En una

optimización del diseño basado en DOE, cada cambio del valor de cualquier variable de entrada requiere un nuevo análisis de elementos finito



**Figura 19.** *Método de los elementos finitos y el método de Ingeniería robusta como herramienta de diseño*

**Fuente:** Autores

Al integrar el método de Ingeniería Robusta y el método de Elementos Finitos, una metodología de diseño eficiente puede ser desarrollada. Este enfoque integrado tiene los méritos de ambos el método de Elementos Finitos y el diseño de experimentos de Taguchi. Utilizando este enfoque, es posible obtener el porcentaje de contribución, la importancia y el valor de nivel apropiado de cada variable de diseño o factor de control. El concepto de integración de diseño de Taguchi de experimentos y el método de elementos finitos se ilustra en la Figura 19.

El método de Ingeniería Robusta es una de estas herramientas para la realización de experimentos utilizando un enfoque estadístico para entender la importancia de los factores independientes y niveles. La principal ventaja del método de Taguchi es que el número de experimentos llevados a cabo en la mayoría de los casos es menor que la de cualquier otro experimento usando un enfoque estadístico.

Para lograr la calidad del producto deseable por su diseño, Taguchi sugiere un proceso de tres etapas: diseño de sistemas, diseño de parámetros y diseño tolerancia (Taguchi, et al, 2005).

### **3.2.1. Diseño del sistema**

El diseño del sistema es la conceptualización y síntesis de un producto que se utilizará. La etapa de diseño del sistema es donde las nuevas ideas, conceptos y conocimientos en las áreas de la ciencia y la tecnología son utilizados por el equipo de diseño para determinar la combinación correcta de los materiales, partes, procesos y factores de diseño que satisfagan las especificaciones funcionales y económicos.

### **3.2.2. Diseño de parámetros**

En el diseño de parámetro el diseño del sistema de variables se analiza experimentalmente para determinar cómo el producto reacciona a un "ruido" incontrolable en el sistema. Diseño de parámetros es la idea central del enfoque de Ingeniería Robusta. El diseño de parámetros está relacionado con la búsqueda de los niveles de los factores de diseño apropiadas para hacer que el sistema sea menos sensible a las variaciones en los factores de ruido incontrolables, es decir, para hacer el sistema robusto.

El método de Ingeniería Robusta se ha utilizado para mejorar la calidad y la robustez del diseño. Diseño robusto es una "metodología de ingeniería para mejorar la productividad en investigación y desarrollo para que los productos de alta calidad se pueden producir de forma rápida y a bajo costo". La idea detrás de diseño robusto es mejorar la calidad de un producto, reduciendo al mínimo los efectos de la variación sin eliminar las causas, ya que son demasiado difícil o demasiado caro de controlar. Método Taguchi es un método de control de calidad que se instituyó en tanto la etapa de diseño de productos y procesos para mejorar la fabricación y la fiabilidad del producto mediante la fabricación de productos no sensibles a las condiciones ambientales y las variaciones de los componentes. Taguchi expreso que la calidad debe ser diseñada en un producto desde el principio (Taguchi, et al, 2005). El resultado final es un diseño robusto, un diseño que tiene sensibilidad mínima a las variaciones en factores incontrolables.

En el diseño de parámetro, hay dos tipos de factores que afectan característica funcional de un producto: factores de control y factores de ruido. Factores de control son los factores que pueden ser fácilmente controladas como Dimensiones, elección de material o tiempo de ciclo. Factores de ruido son factores que son difíciles o imposibles o demasiado caro para controlar. Hay tres tipos de factores de ruido: el ruido exterior (vibraciones, golpes, temperatura...), el ruido interior (deterioro de las piezas y materiales, el óxido...), y entre el ruido de producto (módulo de Young,

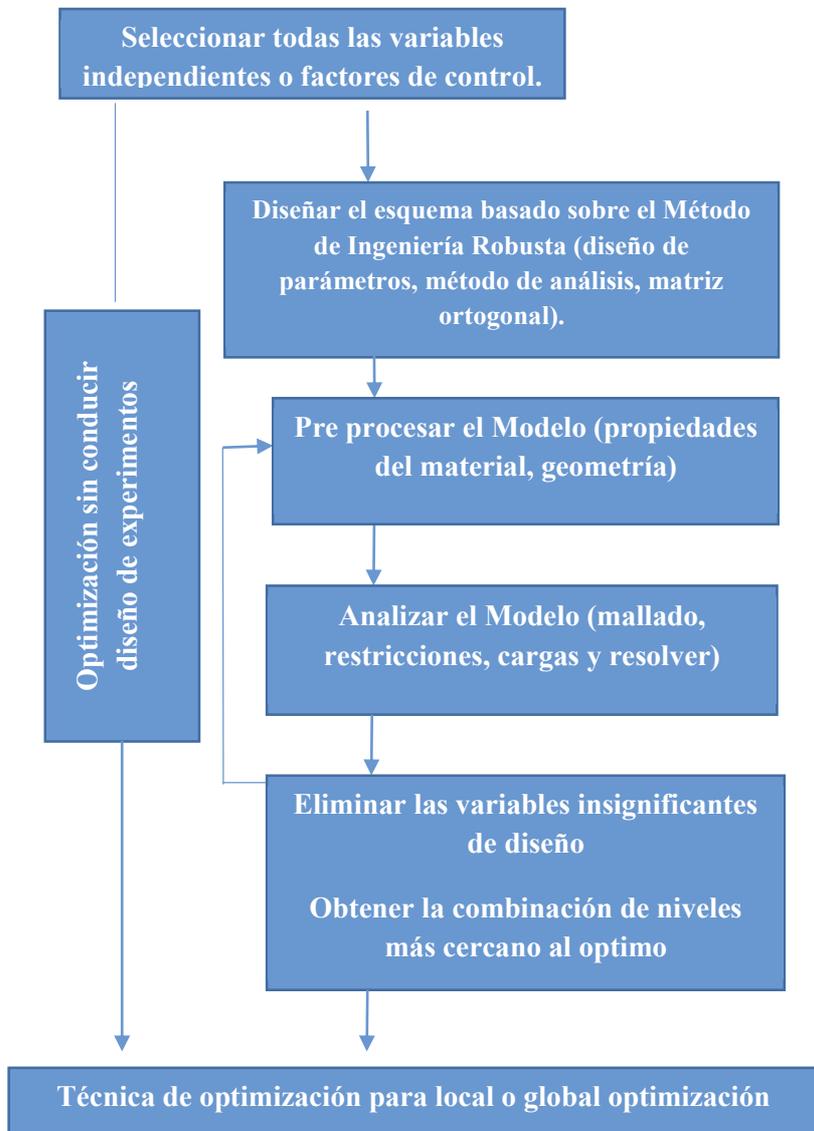
módulo de corte, tensión admisible.). Factores de ruido son la principal causa que produce el deterioro en el rendimiento de un producto o desviarse de su valor objetivo. Por lo tanto, el diseño parámetro busca identificar los ajustes de los factores de control que hacen que el producto sea insensible a las variaciones en los factores de ruido, es decir, hacer el producto más robusto, sin eliminar en realidad las causas de variación.

### **3.2.3. Diseño de tolerancia.**

El último paso en el enfoque robusto diseño de Taguchi es el diseño de la tolerancia. Tolerancia de Diseño se produce cuando se establecen las tolerancias para los productos para minimizar la suma de los costes de fabricación y tiempo de vida del producto. En la etapa de diseño de tolerancia, tolerancias de los factores que tienen mayor influencia en la variación se ajustan sólo si después de la etapa de diseño de parámetros, los valores objetivos de calidad todavía no se han alcanzado. La mayoría de los ingenieros tienden a asociar la calidad con mejores tolerancias, pero las tolerancias de apriete aumenta el coste del producto, ya que requiere mejores materiales, componentes, o maquinaria para lograr las tolerancias más estrictas. Enfoque de diseño de parámetros de Ingeniería Robusta permite mejorar la calidad sin necesidad de mejores materiales o partes y hace que sea posible mejorar la calidad y disminuir o al menos mantener el mismo costo.

## **3.3. OPTIMIZACIÓN UTILIZANDO EL ENFOQUE INTEGRADO**

El método Ingeniería Robusta se puede utilizar para la obtención de la solución cerca de la óptima para los análisis de problemas de ingeniería. En lugar de utilizar el procedimiento de optimización matemática estándar con todas las variables de diseño, se puede llevar a cabo los experimentos basados en el método de Taguchi y eliminar las variables de diseño insignificantes que no contribuyen mucho a la función objetivo. Después de la eliminación de las variables insignificantes, se podría utilizar el procedimiento de optimización matemática estándar. El valor inicial o de partida del problema de optimización estándar obtenidos basado en el método Taguchi de diseño de experimentos está cerca de los valores al nivel óptimo. Esto se traduce en ahorro significativo de tiempo computacional. Esto se explica en la Figura 20.



**Figura 20.** Diagrama de flujo que muestra el uso del método de Ingeniería Robusta y elementos finitos para la solución cercana a la óptima.

**Fuente:** Autores

La implementación del método Taguchi de diseño de experimentos y el método de elementos finitos para el diseño robusto se basa en la suposición de que el efecto debido a cada variable independiente sobre la función objetivo es separable. Esta

naturaleza aditivo sólo es válida si no hay interacción entre las variables independientes.

La función básica suele predefinirse cuando se realiza un diseño experimental. En el análisis de Elementos Finitos, los analistas deben definir la función de respuesta. La elección de la función de respuesta depende del problema. En el análisis estructural, por ejemplo, el peso, tensiones y desplazamientos pueden elegirse como funciones de respuesta. Las posibilidades son muchas y el propósito del análisis será la pauta cuando se selecciona la función de respuesta.

Otro problema cuando se trabaja con el análisis de Elementos Finitos es decidir cómo se debe evaluar el resultado, en los nodos (todo o parte del modelo), en los elementos o simplemente como un valor máximo o mínimo de todo el modelo.

Cualquiera que sea el análisis y la función de respuesta que sea escogido el procedimiento básico para el análisis de los datos es la misma. En primer lugar todos los datos necesarios tienen que ser dadas por el diseñador. Las variables de diseño se utilizan en el entorno habitual de los elementos finitos como parámetros. Las fases de modelado y resolución de ecuaciones tienen que ser incluidos en un bucle, donde las variables de diseño se alteran según la disposición del diseño del experimento. La respuesta elegida también se recoge dentro del bucle para su posterior evaluación estadística después que se llevan a cabo todos los casos de análisis.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL CONECTOR Y ALGUNAS VARIANTES

#### 4.1. ESTANTERÍA METÁLICA Y FÁBRICA TUGALT

La empresa Tugalt trabaja en la elaboración de productos de acero, los mismos que ofrecen al mercado ecuatoriano en las siguientes líneas. Tubería, Planchas de Zinc, Techos (Aluzinc), Placa Colaborante y Perfilera negra y galvanizada, y su nuevo producto la estantería metálica, de dicho producto analizaremos un componente llamado *Conector* en nuestra tesis.

#### 4.2. INTRODUCCIÓN A LOS RACKS

El Rack es un sistema de perfil perforado y se utiliza cuando se requiere almacena mercancías de mediano o gran peso.

Este sistema se compone de perfiles metálicos con perforaciones equidistantes atornillables a los elementos, además está compuesto por alineación de bastidores dispuestos verticalmente y conectados entre sí por pares de largueros espaciados en altura lo suficiente para alojar las unidades de carga, que en conjunto le brindaran robustez a la estantería.

Las perforaciones equidistantes permiten que los niveles se puedan adaptar en altura, según las necesidades del cliente



**Figura 21.** Racks  
**Fuente:** Autores

#### 4.2.1. Características generales

El sistema de estantería para palletización de Tugalt es utilizado en los almacenes en los que es necesario almacenar productos palletizados con gran variedad de referencias.

Entre algunas de las ventajas tenemos:

- Facilitar la retirada de las mercancías ya que se puede localizar y acceder directamente a cada paleta sin necesidad de mover o desplazar las otras.
- Perfecto control de los stocks ya que facilita un intenso flujo de rotación de los mismos, ahorrando así tiempo y esfuerzo en la manipulación de las mercancías.
- Máxima adaptabilidad a cualquier tipo de carga tanto por peso como por volumen.
- Adaptabilidad a los espacios por su amplia posibilidad de configuración, facilitando su rápido desmontaje o traslado, o también su reconfiguración o ampliación según nuevas necesidades de almacenaje.
- Versatilidad de uso por tratarse de estructuras armadas con tornillos y elementos de anclaje junto a la gran facilidad de montaje y empleo mínimo de mano de obra.
- El diseño de estructura modular presenta un alto grado de rigidez y estabilidad ante fenómenos de empuje tanto transversal como longitudinal.
- La altura de apilamiento no es dependiente de la resistencia de los materiales almacenados.
- Estas ventajas de uso aseguran una optimización máxima del espacio y gestión de stocks.

#### 4.2.2. Elementos

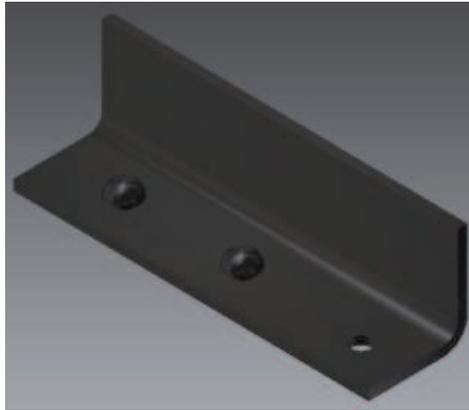
Los componentes utilizados para la construcción de esta estructura de acero han sido diseñados de tal manera que su anclaje sea rápido, preciso y sobre todo seguro.

#### 4.2.3. Detalle de cada componente

Los elementos básicos que componen el sistema de estantería metálica son:

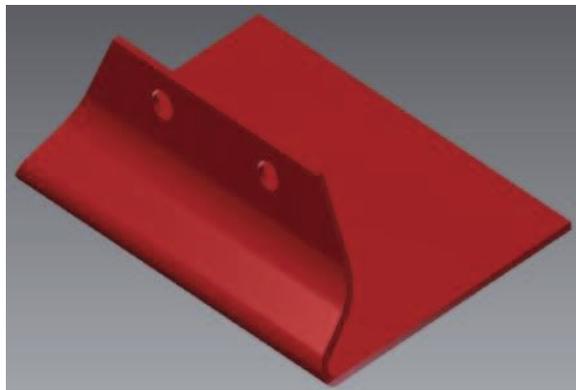
- **Conector:** cuya función es transmitir la carga del material almacenado a los perfiles verticales, es parte del larguero de carga. Su construcción es realizada al cortar un ángulo de acero de 5 mm de espesor por 18 cm de

largo, en un lado del conector se realizan tres perforaciones de 9,5 mm de diámetro donde serán incrustadas respectivamente tres remaches de acero.



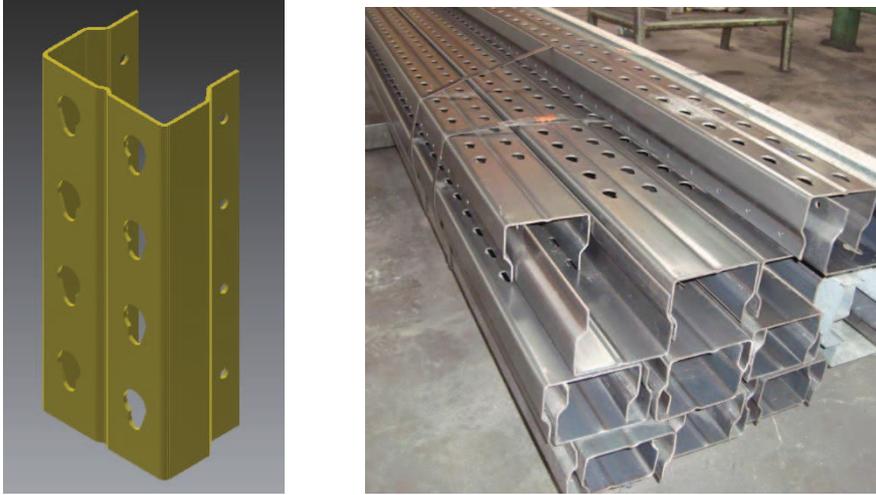
**Figura 22.** *Conector*  
**Fuente:** *Autores*

- **Soporte:** Mantiene la estructura anclada al piso ante cualquier carga horizontal eventual, utilizando tornillos de anclaje.



**Figura 23.** *Soporte*  
**Fuente:** *Autores*

- **Perfil rack:** Transmite la carga del peso de los diferentes niveles del rack hasta el piso.



**Figura 24.** *Perfil Rack*  
**Fuente:** *Autores*

- **Larguero de carga:** Son los elementos horizontales y resistentes de la estantería, sobre los que se depositan las cargas soportando la mercadería ubicada en los pallets, sin llegar a deformarse por flexión. Se unen a los puntales mediante conectores que encajan en sus ranuras.



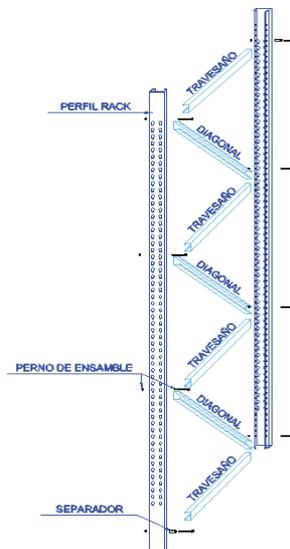
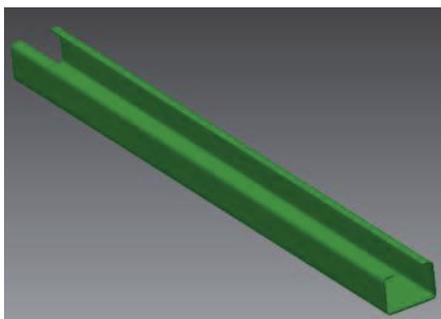
**Figura 25.** *Larguero de carga*  
**Fuente:** *Autores*

- **Unión de bastidor:** une los bastidores transversalmente con el fin de otorgar mayor estabilidad a la estructura.



**Figura 26.** Unión de bastidor  
Fuente: Autores

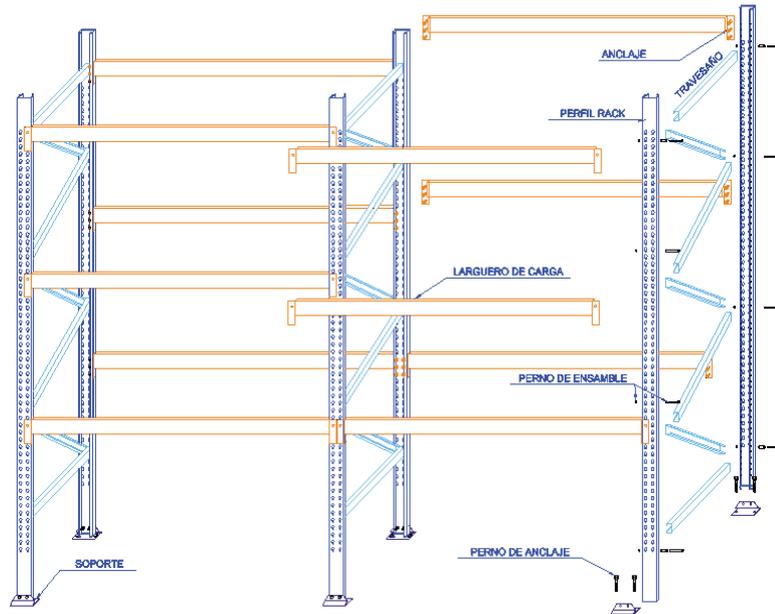
- **Travesaño:** Sirve como vínculo de los perfiles rack para formar el bastidor.



**Figura 27.** Travesaño  
Fuente: Departamento de Ingeniería Tugalt

### 4.3. ENSAMBLE

El ensamble de esta estructura se lo realiza con productos de acero, previamente evaluados para resistir las cargas que más adelante se detallaran a partir de un diseño estructural, que permitirá asegurar la resistencia del conjunto



**Figura 28. Estantería Metálica**  
Fuente: Departamento de Ingeniería Tugalt

### 4.4. FABRICACIÓN

Este producto se constituye en una ayuda muy eficiente en el almacenamiento de carga pesada, razón por la cual la seguridad es el primer parámetro a ser considerado en el análisis global de estabilidad y resistencia de la estructura, aplicando métodos de cálculo que se emplean en la actualidad.



**Figura 29.** *Proceso de fabricación*  
**Fuente:** *Autores*



**Figura 30.** *Producto final*  
**Fuente:** *Autores*

El acero a ser utilizado en este producto es sometido a pruebas de resistencia destructivas, garantizando de esta manera un comportamiento muy eficiente en relación espesor-resistencia



**Figura 31.** *Materia prima*  
**Fuente:** *Autores*

## 4.5. FABRICACIÓN DEL CONECTOR

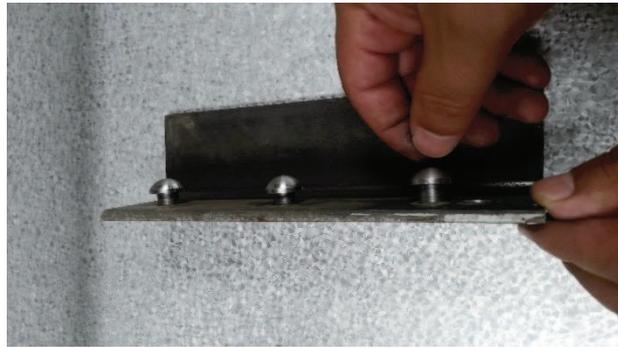
Como todo producto, siempre es susceptible de mejorar, en su todo o en sus partes dependiendo de los requisitos de fabricación o del cliente, se encuentra la necesidad en el sistema de estantería de mejorar uno de sus componentes el Conector.

La fabricación del conector consta de los siguientes pasos:

- **Corte del ángulo.-** En este proceso utilizamos una máquina perfiladora y se requiere del trabajo de dos personas.
- **Perforación del ángulo.-** Para este objetivo se usa una máquina fresadora CNC y se cuenta con el trabajo de una persona.
- **Mecanizado de los pasadores.-** Se usa un torno CNC y se requiere el trabajo de una persona.
- **Ensamblaje.-** Se necesita dos máquinas soldadoras y una amoladora, además se requiere dos personas.



**Figura 32.** *Fabricación manual del conector*  
**Fuente:** *Autores*



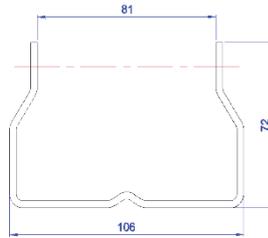
**Figura 33.** *Producto final*  
**Fuente:** *Autores*

Como se puede evidenciar en la construcción del conector se requiere el uso de varias máquinas, tiempo, fuerza laboral, además del desperdicio de material, lo que afecta al coste de fabricación, incrementándose el riesgo por defectos de fabricación. Por todos estos inconvenientes se pretende optimizar el componente y así mejorar el proceso de fabricación y garantizar la seguridad del sistema.

Para lo cual nos apoyaremos en dos métodos: El de Elementos Finitos y el de Ingeniería Robusta que nos ayudarán a simular y optimizar el componente. Entre el sin número de ventajas que podemos encontrar con el uso de estos métodos, está el hecho de que se puede realizar el número de simulaciones y experimentos que deseemos sin la necesidad de la construcción de prototipos reales y el costo no va a ser tan elevado.

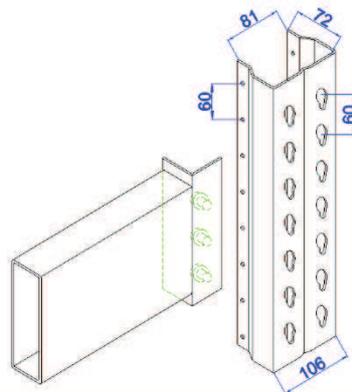
#### 4.5.1. Especificaciones del material

ACERO
Fy=205 Mpa
Ts= 330Mpa.
Tolerancia
Dimensiones: +/-1 mm
Longitud: +5 -0mm

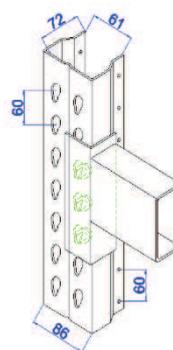
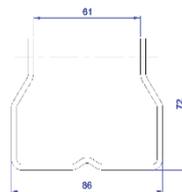


Los perfiles utilizados en la estantería metálica, así como las dimensiones de los mismos se muestran en la figura 34

ESPESOR	LONGITUD	PESO
mm	mm	kg.
1,9	3060	11,32
	4080	15,09
	5100	18,86
	6060	22,42
2,3	3060	13,70
	4080	18,27
	5100	22,84
	6060	27,13
2,65	3060	15,79
	4080	21,05
	5100	26,31
	6060	31,26



ESPESOR	LONGITUD	PESO
mm	mm	kg.
1,9	3060	10,41
	4080	13,87
	5100	17,34
	6060	20,61
2,3	3060	12,49
	4080	16,65
	5100	20,81
	6060	24,73



**Figura 34.** Especificaciones del material  
**Fuente:** Departamento de Ingeniería Tugalt

## 4.6. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE CONECTORES

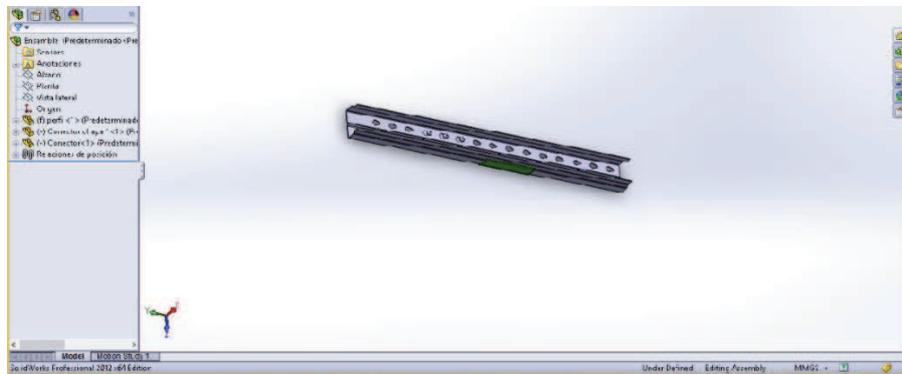
Para el diseño y simulación de conectores utilizamos potentes softwares que podemos encontrar en el mercado como son programas de diseño Cad y Ansys.

Los programas Cad permiten modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. En nuestro caso esta herramienta otorga la posibilidad y facilidad de construcción directa de matrices usando planos técnicos (Wikipedia, 2014).



**Figura 35.** *Planos técnicos*  
**Fuente:** *Autores*

Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

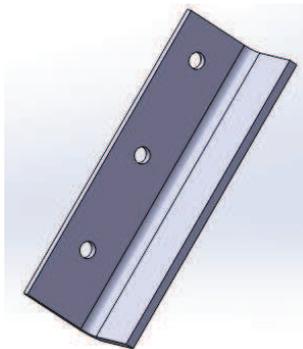


**Figura 36.** Entorno del programa Cad  
**Fuente:** Autores

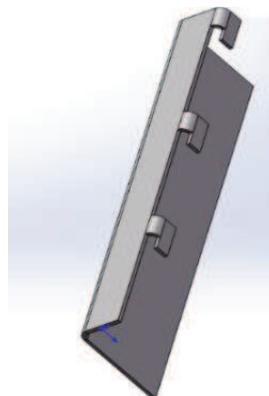
Ofrece ventajas como la sencillez de su uso, con un entorno agradable y gran cantidad de herramientas.

## 4.7. GEOMETRÍAS EN SOFTWARE CAD

### 4.7.1. Conectores realizados



**Figura 37.** Conector analizado 1  
**Fuente:** Autores

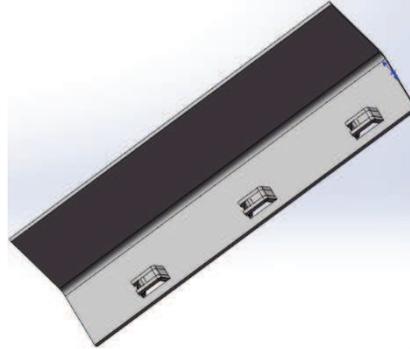


**Figura 38.** Conector variante 2  
**Fuente:** Autores

A continuación se muestran tres variantes de conectores existentes en el mercado y el conector en estudio.

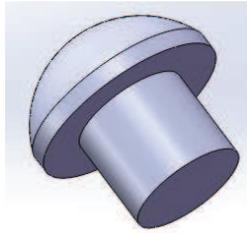


**Figura 39.** *Conector variante 3*  
Fuente: Autores

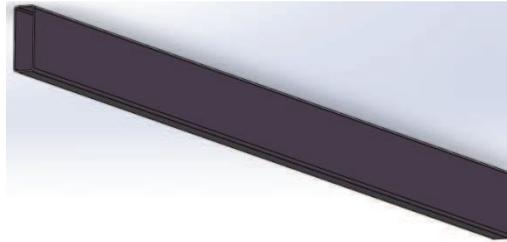


**Figura 40.** *Conector variante 4*  
Fuente: Autores

#### 4.7.2. Elementos realizados en Cad



**Figura 41.** *Remache*  
Fuente: Autores

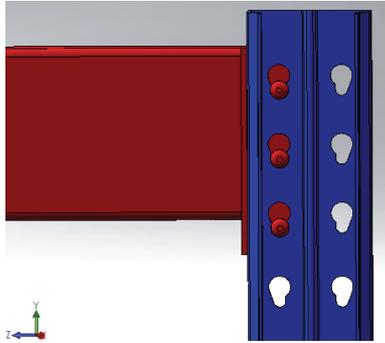


**Figura 42.** *Travesaño*  
Fuente: Autores

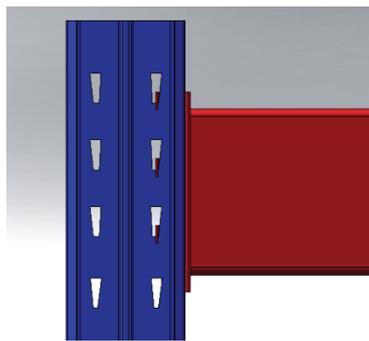


**Figura 43.** *Perfil*  
Fuente: Autores

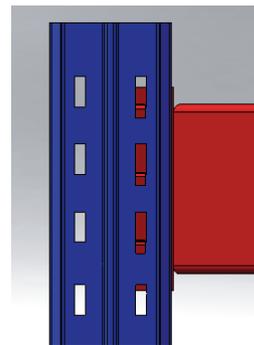
### 4.7.3. Elementos ensamblados en Cad



**Figura 44.** *Ensamble variante 1 (vista posterior)*  
**Fuente:** Autores



**Figura 45.** *Ensamble variante 2 (vista posterior)*  
**Fuente:** Autores



**Figura 46.** *Ensamble variante 3 (vista posterior)*  
**Fuente:** Autores

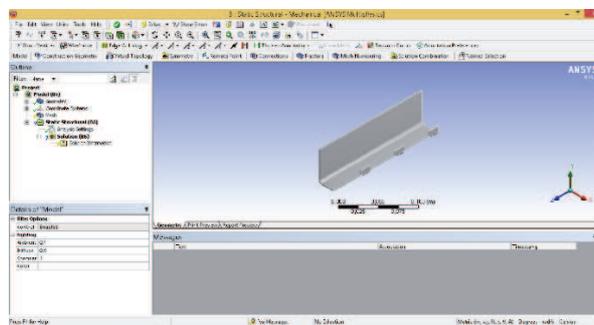


**Figura 47.** *Ensamble variante 4 (vista posterior)*  
**Fuente:** Autores

## 4.8. ANSYS

Desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real.

Es un programa de aplicación general para resolver problemas estructurales, térmicos, magnéticos, de fluidos, por medio del cálculo con elementos finitos. (Ansys, 2014)



**Figura 48.** Entorno del programa Ansys  
**Fuente:** Autores

## 4.9. ANSYS Y LOS PROGRAMAS CAD TRABAJANDO JUNTOS

La versatilidad de los programas hace que optimicemos nuestro tiempo y trabajo, podemos exportar directamente una geometría de un programa de diseño al Ansys, insertando en la barra de herramientas de dicho programa al ícono de Ansys de tal forma que al clicar directamente se abre un módulo de workbench del Ansys.

## 4.10. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO A OPTIMIZAR

A continuación se procede a simular el conector utilizado en la estantería metálica de la empresa Tugalt.

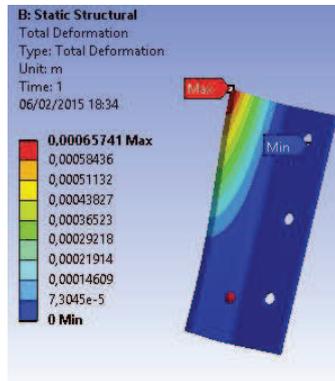
El propósito de hacer este estudio es determinar las propiedades mecánicas. El conector está fabricado con acero laminado en caliente bajo la norma JIS G3132

SPHT 2, SAE1008, ASTM A que será el mismo material usado para todas las variantes de conectores.

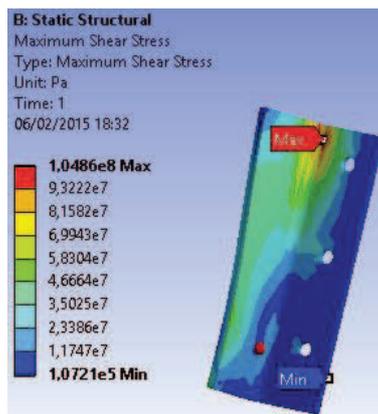
El espesor de la Chapa es de 5 mm y el diámetro de los remaches que soportan la carga del conector es de 9,5mm.

Cada sección de la estantería metálica está diseñado para soportar una carga de 2000 kg. Para realizar la simulación del conector como un solo elemento.

Con todas estas especificaciones realizamos la simulación, misma que podemos observar en las figuras a continuación:



**Figura 49.** Análisis estructural estático de deformaciones  
Fuente: Autores



**Figura 50.** Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante  
Fuente: Autores

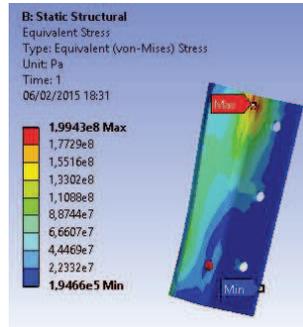


Figura 51. Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises  
 Fuente: Autores

#### 4.10.1. Simulación de ensambles

##### Ensamble con el conector 1

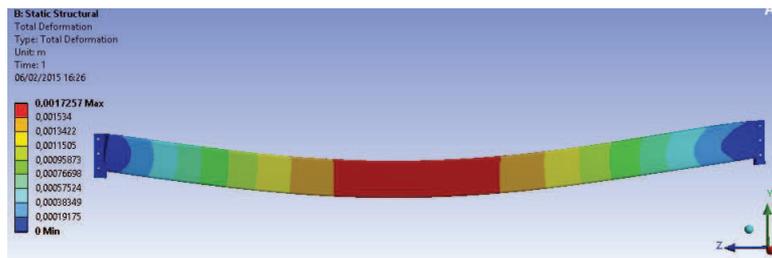


Figura 52. Análisis estructural estático de deformaciones  
 Fuente: Autores

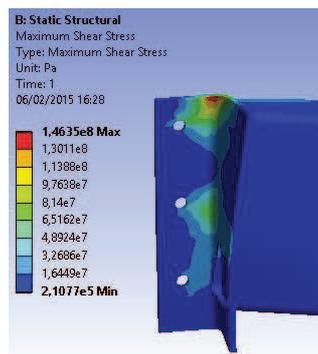
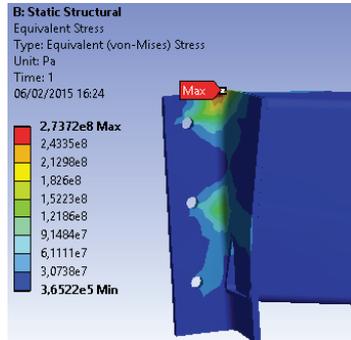
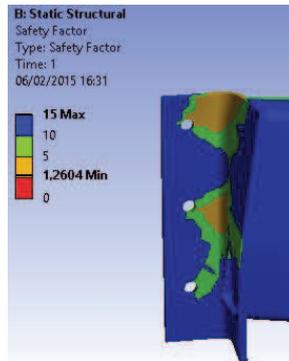


Figura 53. Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante  
 Fuente: Autores

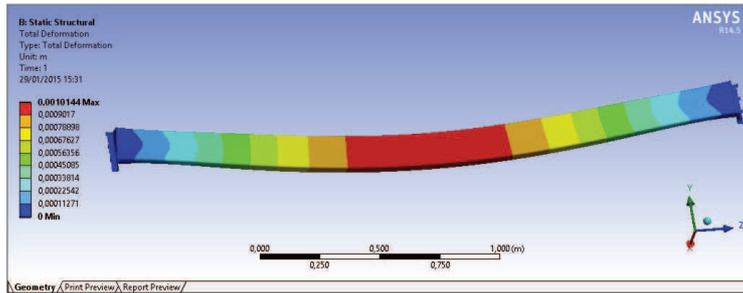


**Figura 54.** Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises  
**Fuente:** Autores

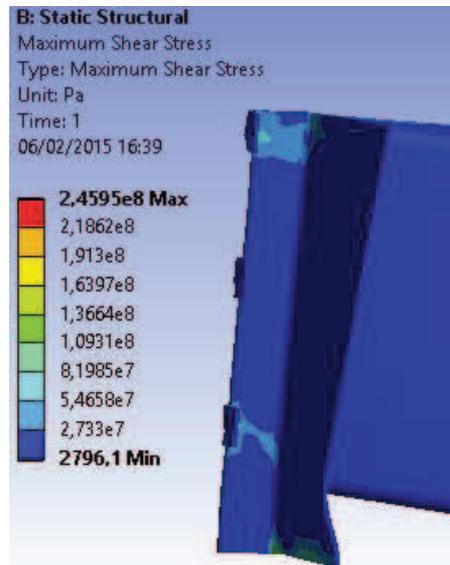


**Figura 55.** Factor de seguridad.  
**Fuente:** Autores

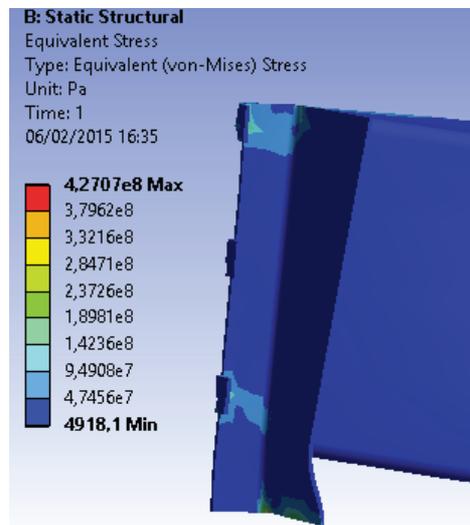
**Ensamble con el conector modelo 2**



**Figura 56.** Análisis estructural estático de deformaciones  
**Fuente:** Autores



**Figura 57.** *Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante*  
**Fuente:** Autores



**Figura 58.** *Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises*  
**Fuente:** Autores

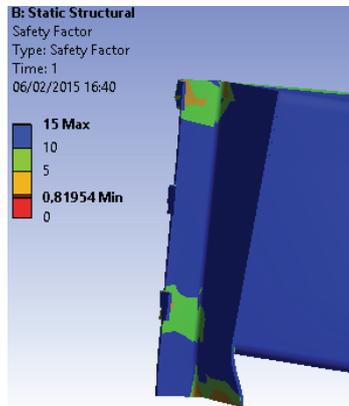


Figura 59. Factor de seguridad.  
 Fuente: Autores

### Ensamble con el conector modelo 3

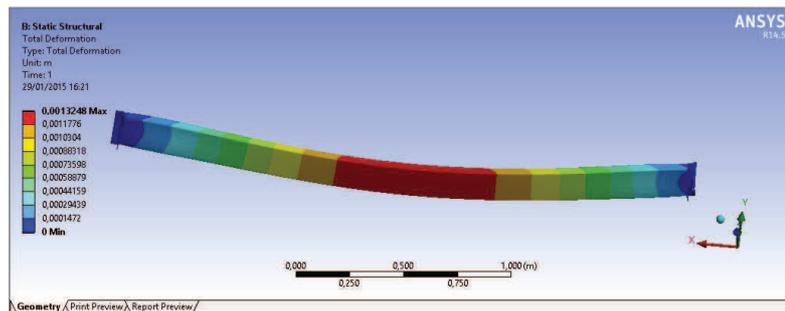


Figura 60. Análisis estructural estático de deformaciones  
 Fuente: Autores

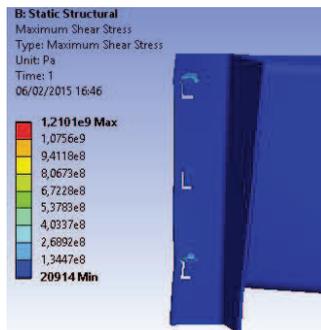
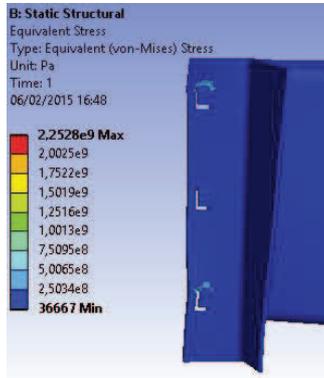
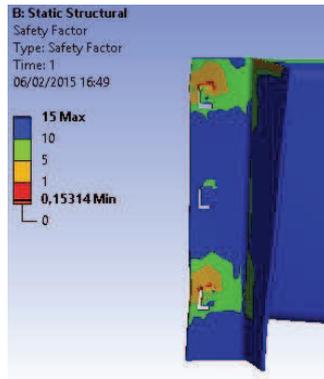


Figura 61. Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante  
 Fuente: Autores

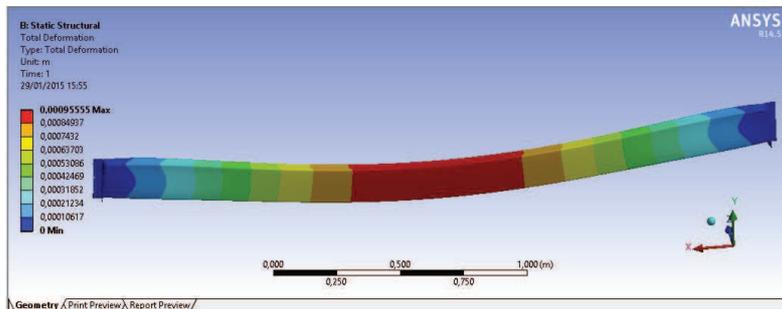


**Figura 62.** Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises  
**Fuente:** Autores

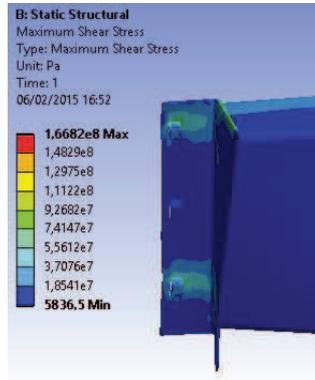


**Figura 63.** Factor de seguridad  
**Fuente:** Autores

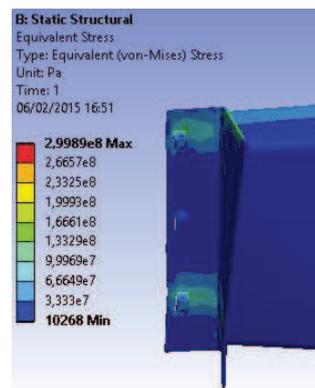
**Ensamble con el conector modelo 4.**



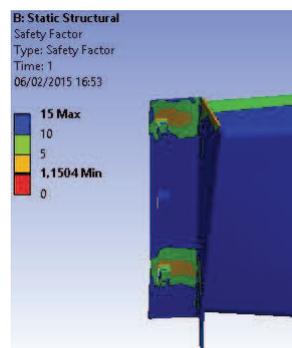
**Figura 64.** Análisis estructural estático de deformaciones  
**Fuente:** Autores



**Figura 65.** Análisis estructural estático de la tensión máxima cortante  
**Fuente:** Autores



**Figura 66.** Análisis estructural estático de la tensión de Von Mises  
**Fuente:** Autores



**Figura 67.** Factor de seguridad.  
**Fuente:** Autores

Comparación de resultados obtenidos luego de realizar las simulaciones requeridas

**Tabla 5.** Comparación de resultados de ensambles con variantes de conectores  
Fuente: Autores

Ensamblajes Con los diferentes conectores	1 	2 	3 	4 
<b>Deformación</b>	0,00172 m	0,00096 m	0,00132 m	0,00095 m
<b>Máxima tensión cortante</b>	146 MPa	245 MPa	1210 MPa	166 MPa
<b>Tensión Von Mises</b>	273 MPa	426 MPa	2252 MPa	299 MPa
<b>Factor de seguridad</b>	1,260	0,819	0,153	1,150

## 4.11. DETERMINACIÓN DEL MEJOR DISEÑO DE CONECTOR

Después de simular las diferentes variantes de conectores debemos determinar un conector que se ajuste a nuestros requerimiento de resistencia y fácil fabricación para lo cual desarrollaremos el siguiente análisis.

- a) **Nombre del Sistema:** Conector de travesaño.
- b) **Funciones básicas del sistema:** Acoplarse y transmitir la carga del material almacenado a los perfiles verticales.
- c) **Elementos del sistema y sus funciones.**
  - Sector lateral: Conectarse al larguero
  - Sector frontal: contener acoples (Lengüetas, uñas, remaches, etc.).
  - Acoples: ajustarse a las ventanas del perfil
  - Ventanas (perfil): vincular el conector con el perfil
  - Larguero: soportar la carga.
  - Perfil: transmitir la carga al piso.
- d) **Mapa funcional del sistema**

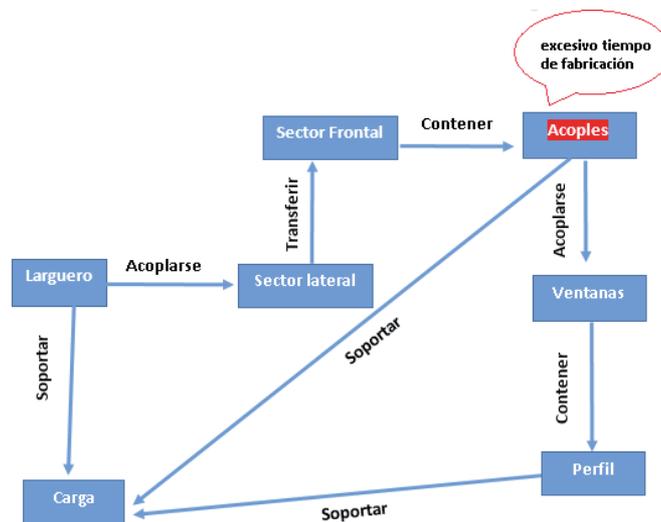


Figura 68. Mapa funcional del sistema  
Fuente: Autores

#### d) Descripción del funcionamiento del sistema

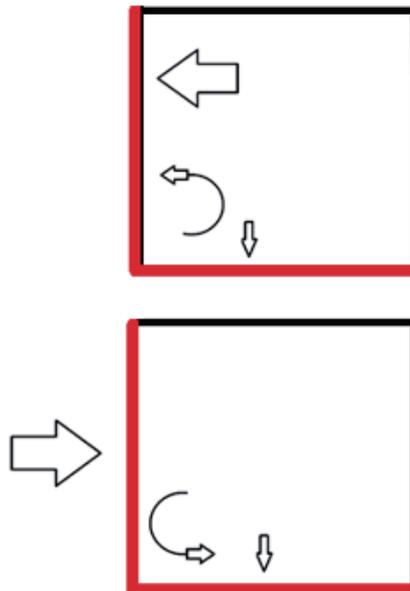
El conector recibe esfuerzos del larguero, pero necesita transferir al acoplarse al perfil. Entonces disponemos un conector actual. Sin embargo, el dispositivo es de difícil fabricación.

#### e) Identificar conflicto técnico.

Necesitamos reducir el tiempo de fabricación, y una manera convencional sería eliminar los acoples. Pero la función que se vería perjudicado por la acción anterior sería que no permitiría realizar el acople del conector con el perfil.

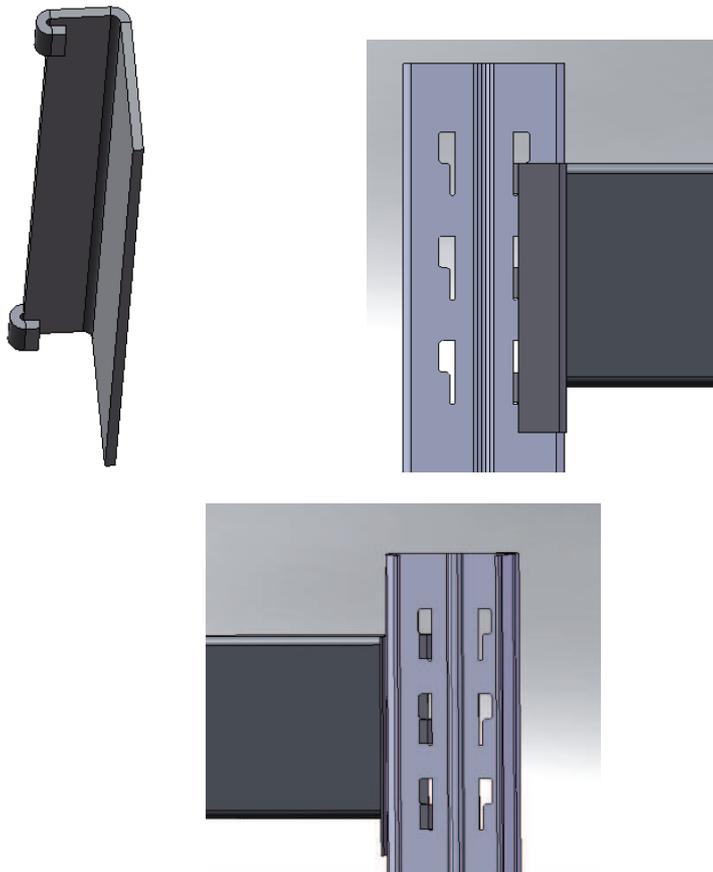
Y la solución a este conflicto de la eliminación de los remaches sería la inclusión en la misma chapa de elementos de ajuste para lo cual se tiene el conformado de chapa metálica. Esto reduciría enormemente el tiempo de fabricación.

Lo que nos resta determinar es el diseño del acople para lo cual necesitamos determinar la forma del acople el mismo que tiene que trabajar de acuerdo a la figura 69.



**Figura 69.** Diagrama de funcionamiento del acople  
**Fuente:** Autores

El conector que mejor se ajusta para trabajar bajo el diagrama de la figura 70 sería el que en un extremo del conector funcione a tracción y el otro a compresión y que sea de fácil acople para lo cual llegamos al siguiente diseño:



**Figura 70.** Conector diseñado  
Fuente: Autores



# **CAPÍTULO V**

## **5. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO AL CONECTOR DE ESTANTERÍA METÁLICA.**

### **5.1. PLANIFICACIÓN PRELIMINAR**

El objeto de estudio en este capítulo es la simulación de un conector de estantería metálica utilizando el enfoque integrado del método Taguchi y el método de elementos finitos. En el capítulo anterior se determinó el diseño que tiene menor tiempo de fabricación y tiene una funcionalidad adecuada a los requisitos del cliente pero es necesario determinar el rendimiento óptimo del diseño y variar las características para determinar al diseño óptimo. Con este objetivo en mente, los siguientes experimentos se llevan a cabo para estudiar la influencia de diversos factores que minimiza la tensión en el conector.

Para iniciar con la optimización del conector lo primero que debemos realizar es la definición del objetivo del estudio. Por lo tanto el objeto de estudio es determinar el mejor diseño de conector para estantería metálica que sea funcional y de fácil fabricación.

El alcance de este estudio es solo para el conector que es parte del sistema de estantería metálica.

### **5.2. DEFINIR LA FUNCIÓN BÁSICA DEL SISTEMA**

Transmitir la carga del material almacenado a los perfiles verticales sin falla.

### **5.3. DEFINICIÓN DE QUÉ MEDIR Y CÓMO MEDIR**

Aquí podemos destacar la ventaja de utilizar el método de elementos finitos y la facilidad con que se puede obtener los valores (considerando el error del método) de la respuesta de salida y, en nuestro estudio la respuesta de salida es el valor del esfuerzo cortante que es una magnitud continua que involucra energía y está directamente relacionada con el producto (conector).

## 5.4. DEFINIR FACTORES Y NIVELES SELECCIONADOS

Con los datos obtenidos en el capítulo 5 vamos a determinar todos los factores relevantes y separar los factores de control y factores de ruido. Al seleccionar los factores de control debemos tener presente qué efecto tiene el factor sobre la respuesta y definida anteriormente.

Para definir niveles de los factores de control exploraremos el rango más amplio posible de niveles para los factores

Al definir la estrategia de ruido (fundamental) se detalla cómo controlar/forzar el ruido en el experimento.

**Tabla 6. Factores de ruido**  
Fuente: Autores

FACTORES DE RUIDO	
NIVEL 1 (Disminuye y)	Material 1
NIVEL 2 (Aumenta y)	Material 2

### Características Material 1

	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Mod...		
5	Young's Modulus	2E+11	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,288		
7	Bulk Modulus	1,5723E+11	Pa	
8	Shear Modulus	7,764E+10	Pa	
9	Tensile Yield Strength	3,45E+08	Pa	

**Figura 71. Propiedades material 1**  
Fuente: Autores

### Características Material 2

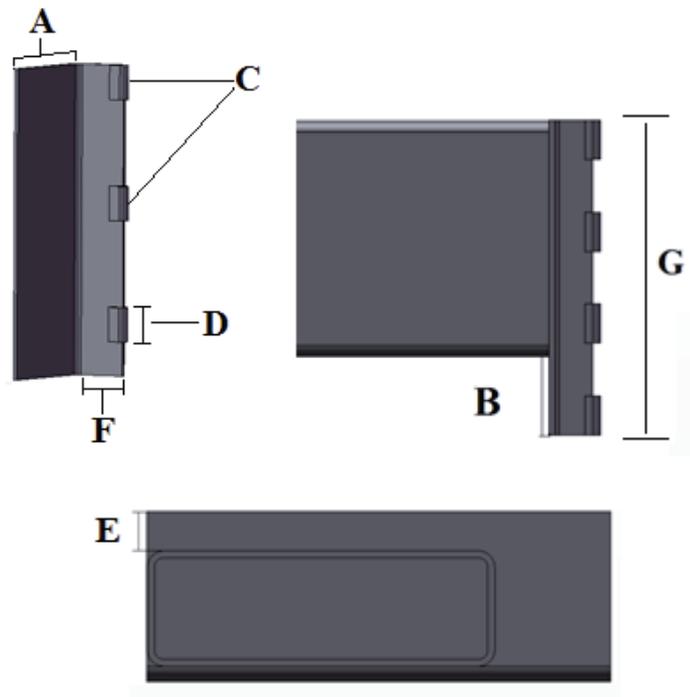
	A	B	C	
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Mod...		
5	Young's Modulus	2E+11	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,3		
7	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
8	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
9	Tensile Yield Strength	4,15E+08	Pa	

**Figura 72. Propiedades material 2**  
Fuente: Autores

**Tabla 7. Factores de control**  
Fuente: Autores

	<b>Factores de Control</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>	<b>Nivel 3</b>
A	Ancho sector lateral	55mm	70 mm	
B	Posición del Larguero	inferior	centro	superior
C	Cantidad de acoples	2	3	4
D	Ancho de acoples	15mm	25mm	30mm
E	Posición Horizontal larguero	Junto Frontal	Centro	Extremo frontal
F	Ancho sector frontal	15mm	24 mm	40 mm
G	Alto sector frontal	180 mm	200 mm	220 mm
H	Espesor de chapa	1.9 mm	2.65 mm	3.0 mm

Detalle de los factores de control en el sistema para la experimentación.



**Figura 73. Ilustración de los factores de control**  
Fuente: Autores

## 5.5. FORMULAR EL EXPERIMENTO

Basados en los factores de control el arreglo ortogonal (AO) seleccionado es el uso de L18 la misma que nos permite investigar 8 factores a la vez, siendo 7 con 3 niveles, en apenas 18 pruebas (experimento ni muy grande, ni muy pequeño). Las interacciones entre cualesquiera dos columnas están distribuidas de manera aproximadamente igual entre las demás columnas (realza efectos principales).

### Diagrama del Experimento

Característica menor es mejor:  $Y = \text{Máxima tensión cortante (MPa)}$

**Tabla 8.** *Diagrama del experimento*  
Fuente: Autores

L18	A	B	C	D	E	F	G	H	N1	N2	S/N	$\bar{y}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1				
2	1	1	2	2	2	2	2	2				
3	1	1	3	3	3	3	3	3				
4	1	2	1	1	2	2	3	3				
5	1	2	2	2	3	3	1	1				
6	1	2	3	3	1	1	2	2				
7	1	3	1	2	1	3	2	3				
8	1	3	2	3	2	1	3	1				
9	1	3	3	1	3	2	1	2				
10	2	1	1	3	3	2	2	1				
11	2	1	2	1	1	3	3	2				
12	2	1	3	2	2	1	1	3				
13	2	2	1	2	3	1	3	2				
14	2	2	2	3	1	2	1	3				
15	2	2	3	1	2	3	2	1				
16	2	3	1	3	2	3	1	2				
17	2	3	2	1	3	1	2	3				
18	2	3	3	2	1	2	3	1				

## 5.6. RECOLECCIÓN DE DATOS

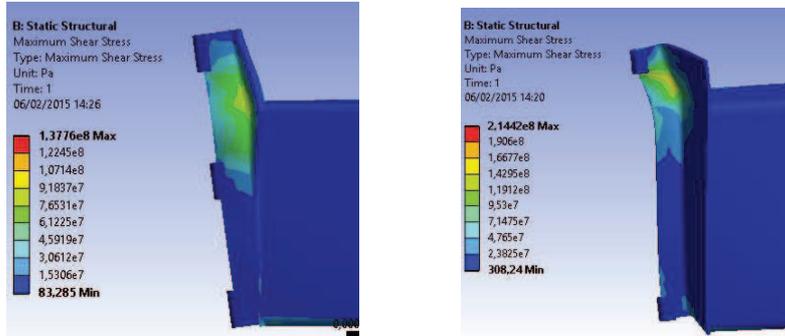
En esta parte del desarrollo del estudio es donde se encuentra la mayor aplicación del método de elementos finitos con el de Ingeniería Robusta ya que como se puede ver en el diagrama del experimento es necesario 18 prototipos y con dos niveles de ruido sería 36 prototipos si fueran físicos sería prácticamente imposible disponer de todos pero como tenemos una herramienta computacional no hay problemas en realizar todos los experimentos requeridos en el estudio.

Todos los prototipos son diseñados en Software Cad y simulados en el programa computacional Ansys en la que se modifica con diferentes combinaciones de nivel de variables de diseño. Para cada experimento, se crea un nuevo archivo paramétrico ANSYS. Puesto que la geometría del problema se cambia en cada experimento, el programa ANSYS calcula la matriz de rigidez para cada experimento y resuelve el problema. Al final de cada experimento, los valores de los parámetros de proceso se añaden a una tabla. Esto se utiliza para el proceso análisis posterior.

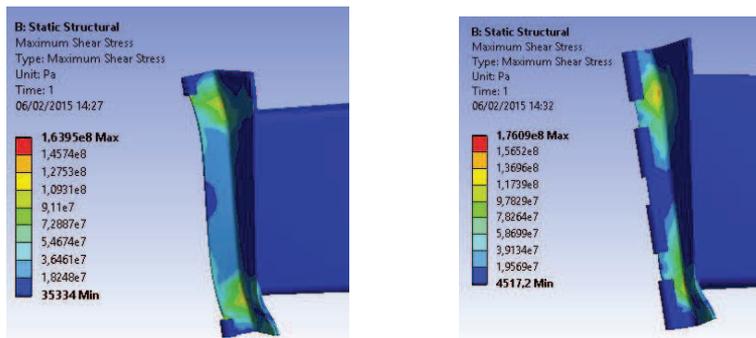
**Tabla 9.** *Prototipos a simular*  
Fuente: Autores

	Ancho sector Lateral	Posición Vertical Larguero	Cantidad de acoples	Ancho de acoples	Posición Horizontal larguero	Ancho sector Frontal	Alto Sector Frontal	Espesor de chapa
1	55mm	inferior	2	15mm	Jun Frontal	18mm	180mm	1.9mm
2	55mm	inferior	3	25mm	centro	24mm	200mm	2.65mm
3	55mm	inferior	4	30mm	Extr Frontal	40mm	220mm	3mm
4	55mm	centro	2	15mm	centro	24mm	220mm	3mm
5	55mm	centro	3	25mm	Extr Frontal	40mm	180mm	1.9mm
6	55mm	centro	4	30mm	Jun Frontal	18mm	200mm	2.65mm
7	55mm	superior	2	25mm	Jun Frontal	40mm	200mm	3mm
8	55mm	superior	3	30mm	centro	18mm	220mm	1.9mm
9	55mm	superior	4	15mm	Ext Frontal	24mm	180mm	2.65mm
10	70mm	inferior	2	30mm	Ext Frontal	24mm	200mm	1.9mm
11	70mm	inferior	3	15mm	Jun Frontal	40mm	220mm	2.65mm
12	70mm	inferior	4	25mm	centro	18mm	180mm	3mm
13	70mm	centro	2	25mm	Ext Frontal	18mm	220mm	2.65mm
14	70mm	centro	3	30mm	Jun Frontal	24mm	180mm	3mm
15	70mm	centro	4	15mm	centro	40mm	200mm	1.9mm
16	70mm	superior	2	30mm	centro	40mm	180mm	2.65mm
17	70mm	superior	3	15mm	Ext Frontal	18mm	200mm	3mm
18	70mm	superior	4	25mm	Jun Frontal	24mm	220mm	1.9mm

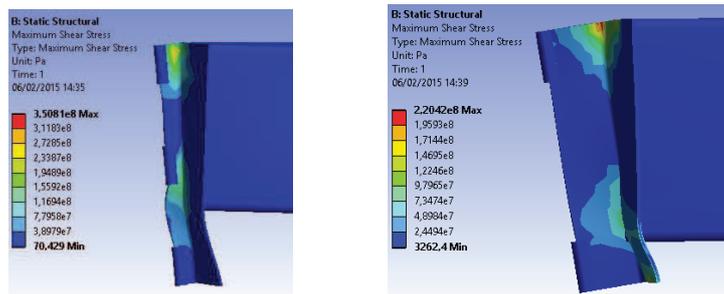
En las figuras 74, 75 y 76 se indican seis muestras de los treinta y seis experimentos simulados en Ansys



**Figura 74.** Ilustración de la simulación (larguero en posición inferior)  
Fuente: Autores



**Figura 75.** Ilustración de la simulación (larguero en posición medio)  
Fuente: Autores



**Figura 76.** Ilustración de la simulación (larguero en posición superior)  
Fuente: Autores

**Tabla 10. Cálculo y recolección de datos**

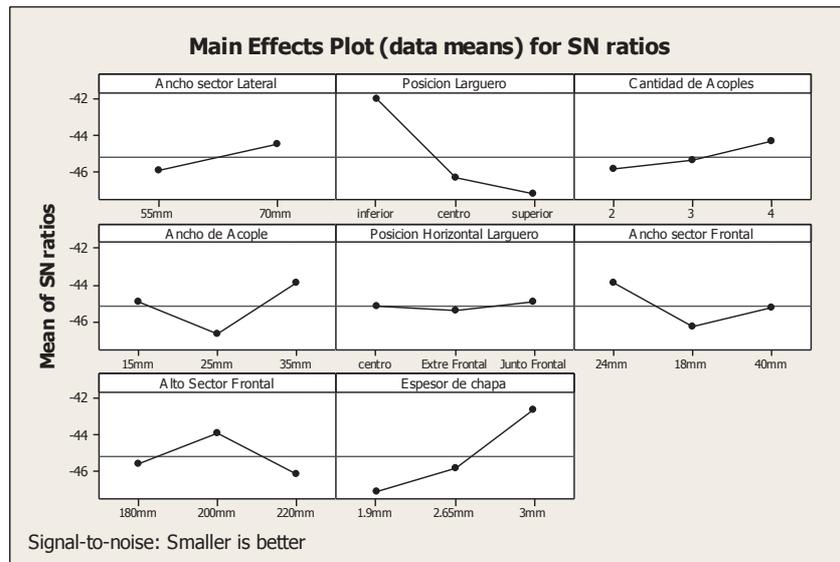
Fuente: Autores

L18	A	B	C	D	E	F	G	H	N1	N2	S/N	$\bar{y}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	214.42	211.79	-46.5	213.1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	137.76	137.59	-42.7	137.6
3	1	1	3	3	3	3	3	3	94.30	93.55	-39.4	93.9
4	1	2	1	1	2	2	3	3	163.95	163.66	-44.2	163.8
5	1	2	2	2	3	3	1	1	362.34	359.11	-51.1	360.7
6	1	2	3	3	1	1	2	2	176.09	175.82	-44.9	175.9
7	1	3	1	2	1	3	2	3	202.19	201.10	-46.09	201.6
8	1	3	2	3	2	1	3	1	350.80	349.12	-50.8	349.9
9	1	3	3	1	3	2	1	2	222.56	222.49	-46.9	222.5
10	2	1	1	3	3	2	2	1	99.54	99.84	-39.9	99.69
11	2	1	2	1	1	3	3	2	135.04	133.60	-42.5	134.3
12	2	1	3	2	2	1	1	3	107.54	107.49	-40.6	107.5
13	2	2	1	2	3	1	3	2	358.91	356.61	-51.07	357.7
14	2	2	2	3	1	2	1	3	113.46	112.94	-41.07	113.2
15	2	2	3	1	2	3	2	1	190.09	189.24	-45.5	189.6
16	2	3	1	3	2	3	1	2	220.42	220.77	-46.8	220.5
17	2	3	2	1	3	1	2	3	157.24	156.31	-43.9	156.7
18	2	3	3	2	1	2	3	1	265.61	264.60	-48.4	265.1

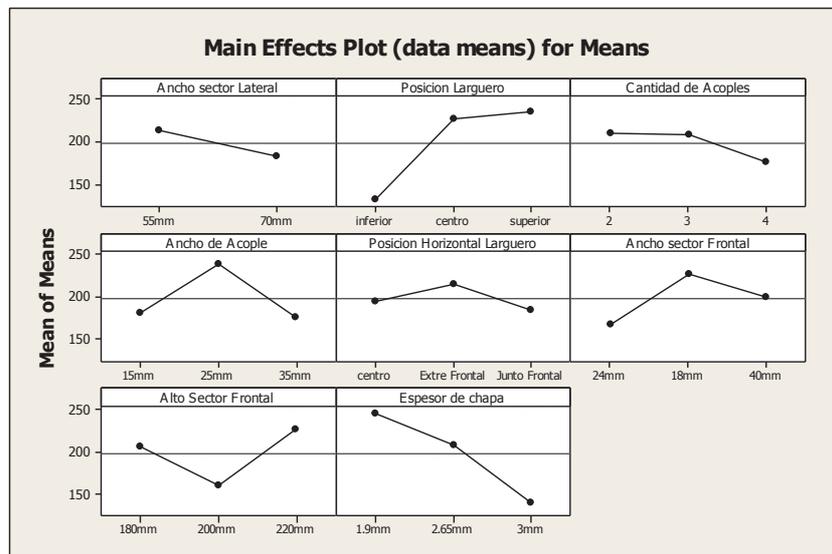
Mientras que el experimento anterior se podría haber hecho uso de un experimento real, hay muchas dificultades prácticas de fabricación en diferentes modelos de

conectores. Con el experimento simulado por ordenador, el diseño de experimentos se ha vuelto mucho más fácil.

Una vez que los experimentos han terminado, con el uso del programa estadístico Minitab 14.0 se calcula la relación S/R y el valor medio de cada nivel de todas las variables.



**Figura 77.** Gráfica de efectos principales para la relación señal ruido  
Fuente: Autores



**Figura 78.** Gráfica de efectos principales con relación a la media  
Fuente: Autores

Se puede observar a partir de los resultados del análisis que los factores más importantes que influyen en la tensión hacia la pieza es el espesor de chapa y la posición del larguero. Un factor que no influye en la relación S/R es la Posición Horizontal larguero (E), en caso de necesitar una nueva ronda de experimentos, una mayor optimización o algún otro estudio se puede prescindir de este factor.

Con base a los resultados obtenidos en el experimento se puede realizar el diseño del conector más óptimo sugerido por el método de Ingeniería Robusta y confirmar los resultados por el método de elementos finitos. El conector óptimo según el experimento realizado sería el que tiene las siguientes características:

**A2 B1 C3 D3 E3 F2 G2 H3**

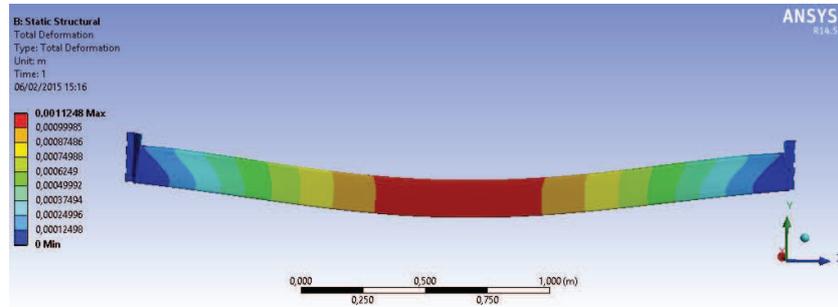
Que significa:

**Tabla 11.** *Combinación óptima de los factores de control*  
Fuente: Autores

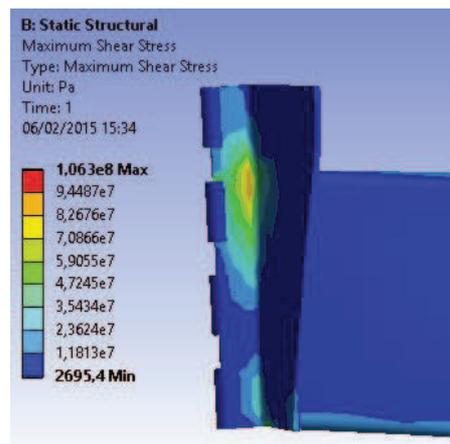
<b>FACTOR DE CONTROL</b>	<b>NIVEL</b>
Ancho del sector lateral	70 mm
Posición Horizontal del larguero	inferior
Cantidad de acoples	4
Ancho del acople	30 mm
Posición Vertical del larguero	junto al frontal
Ancho del sector frontal	24 mm
Alto del sector frontal	200mm
Espesor de chapa	3mm

A continuación en las siguientes gráficas podemos ver el efecto del conector utilizando la combinación óptima, siempre es necesario confirmar el resultado sugerida por la experimentación, nuestro estudio no presenta dificultad debido a que

estamos utilizando una herramienta computacional y no tenemos restricción en la cantidad de prototipos, al contrario de los modelos físicos.



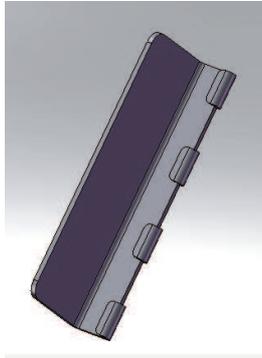
**Figura 79.** *Análisis estructural estático de deformaciones del conector optimizado*  
**Fuente:** Autores



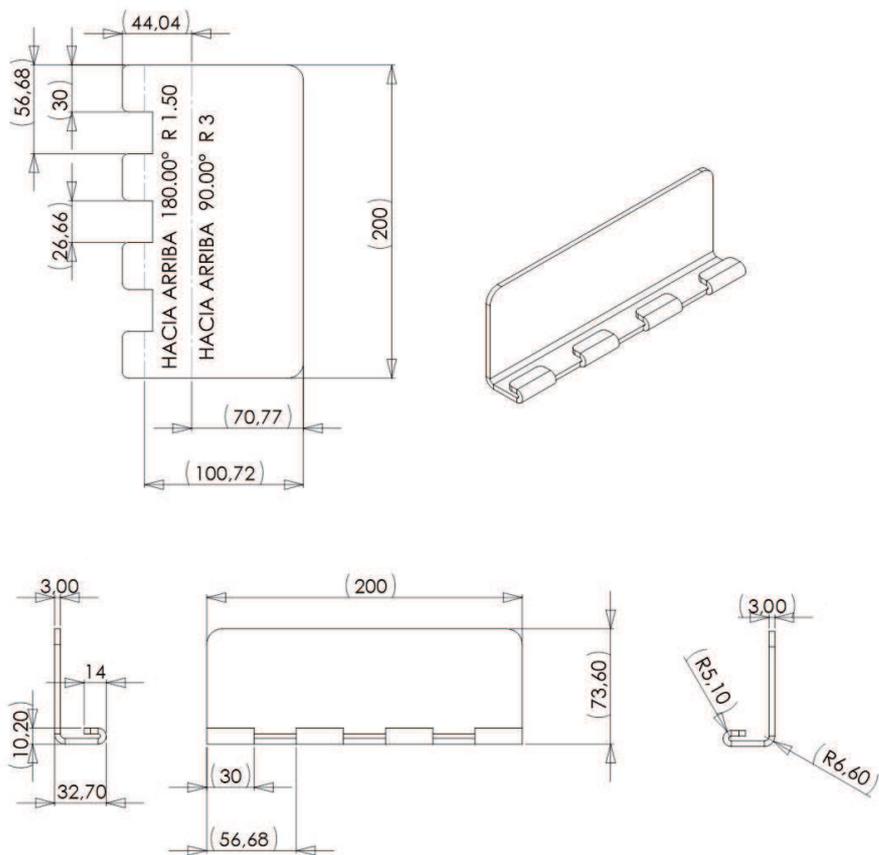
**Figura 80.** *Análisis estructural estático de la máxima tensión cortante del conector optimizado*  
**Fuente:** Autores

La tensión cortante generada (106.3 MPa) es mucho menor que el valor permisible (342MPa) así que el diseño es seguro. La tensión cortante esta mostrada en la figura 80.

A continuación se presentan gráficos del diseño final



**Figura 81.** Conector óptimo  
Fuente: Autores



**Figura 82.** Chapa desplegada  
Fuente: Autores



## CONCLUSIONES

- Los resultados experimentales obtenidos usando el enfoque integrado confirma la expectativa común que el espesor de chapa, la posición del larguero, y el ancho del sector frontal son parámetros más predominantes en comparación con otros factores. Si se desea realizar otros experimentos para mejorar aún más el parámetro de rendimiento u otra optimización, se puede realizar más experimentos, manteniendo cerca de los valores de los niveles óptimos como el valor de partida para el nuevo experimento. Además, la posición horizontal del larguero, y el ancho del sector lateral se pueden quitar en un nuevo estudio ya que estos factores tienen poca influencia en el estudio realizado.
- Los métodos de Elementos Finitos e Ingeniería Robusta tienen efectividad en reducir el tiempo y esfuerzo requeridos para evaluar las variables de diseño e implementarlas.
- La combinación óptima de parámetros para los que se minimiza la tensión (106 MPa) se obtiene por usar el análisis de la relación señal ruido y el valor de la media sobre la respuesta. De acuerdo a los resultados con un espesor de 3mm se obtiene una tensión de 106 MPa mucho menor a valor del material utilizado para perfiles de alta resistencia que es de 342 MPa según la norma ASTM 1011 HSLAS Gr. 50.
- El error en el método de Ingeniería Robusta es del mismo orden que se espera de un problema común de análisis de elementos finitos.
- El método de Elementos Finitos sirve como una poderosa herramienta para estudiar la influencia de diferente parámetro de diseño, geometría variable, también cargas y parámetro de material con muy poco trabajo extra, con esto el diseñador puede conseguir un amplio y mejor entendimiento del problema de análisis y basado en los resultados se puede determinar cuáles diseños deben ser considerados para una optimización.



## **ANEXOS**



## ANEXO 1

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MATERIAL

	<b>DATOS TECNICOS PARA ACERO JIS</b>	Código: TD-751-0310
	<b>G 3132 SPHT 2</b>	Fecha 2014-09-18
		Revisión 13

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Jefe de ingeniería	Jefe de Calidad y Gerente de logística	Jefe de producción

#### 1.- Especificaciones Técnicas

- 1.1 La presentación del producto es en forma de bobinas de acero laminadas en caliente bajo la norma JIS G3132 SPHT 2, SAE1008, ASTM A 1011, CS TIPO A
- 1.2 Este material es utilizado para la fabricación de tubería estructural, cañería para conducción de fluidos y perfiles.
- 1.3 Su análisis químico debe dar:

C (%) max	Mn (%) max	P(%)max	S(%) max	Si (%) max.
0.12	0.50	0.022	0.04	0.035

- 1.4 Las propiedades mecánicas en calidad de suministro deben ser:

Punto de fluencia Fy min (MPa)	Resistencia a la tracción Sut min.(MPa)	Alargamiento (%)
205	330	≥25

1.5 El espesor y ancho de la lámina de acero y sus tolerancias son:

Espesor (mm) lámina	Tolerancia en espesor (mm)	Ancho de bobina	Tolerancia ancho(mm)
1.20	$\pm 0.02$	1000 ò 1220	+10/-2
1.50	$\pm 0.03$	1000 ò 1220	+10/-2
1.80	$\pm 0.03$	1000 ò 1220	+10/-2
1.90	$\pm 0.03$	1000 ò 1220	+10/-2
2.30	$\pm 0.05$	1210	+10/-2
2.50	$\pm 0.05$	1030	+10/-2
2.65	$\pm 0.05$	1000 ò 1220	+10/-2
2.90	$\pm 0.05$	1195	+10/-2
3.20	$\pm 0.05$	1220	+10/-2
3.60	$\pm 0.05$	1060	+10/-2
5.00	$\pm 0.05$	1195	+10/-2
5.20	$\pm 0.05$	1195	+10/-2

1.6 El diámetro interior de cada bobina debe ser de 760 mm. Con una medida máxima de 800mm y mínima de 500 mm, con un peso unitario máximo de 12000 y mínimo de 10000 Kg

1.7 El proveedor deberá incluir el certificado de calidad las propiedades mecánicas, composición química, dureza del acero en el packing list

## 2.- Revisión:

Número	Fecha	Razón
12	2014-03-01	Actualización en el espesor 1.4 y 1.7 mm

## 3.- Distribución:

Jefe de Producción, Jefe de Ingeniería, Jefe de calidad, Gerente de logística, Gerente de gestión de calidad.

	<b>DATOS TECNICOS</b>	Código: TD-751-0310
	<b>PARA ACERO JIS</b>	Fecha 2014-09-18
	<b>G 3132 SPHT 2</b>	Revisión 13

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Jefe de ingeniería	Jefe de Calidad y Gerente de logística	Jefe de producción

## 1.- Especificaciones Técnicas

1.1 La presentación del producto es en forma de bobinas de acero laminadas en caliente bajo la norma JIS G3132 SPHT 2, SAE1008, ASTM A 1011 SS36-2

1.2 Este material es utilizado para la fabricación de tubería estructural, cañería para conducción de fluidos y perfiles.

1.3 Su análisis químico debe dar:

C (%) max	Mn (%) max	P(%)max	S(%) max	Si (%)
0.12	0.50	0.022	0.04	0.035

1.4 Las propiedades mecánicas en calidad de suministro deben ser:

Punto de fluencia Fy min (MPa)	Resistencia a la tracción min (Mpa)	Alargamiento Sut (%)
205	330	≥25

1.5 El espesor y ancho de la lámina de acero y sus tolerancias son:

<b>Espesor lámina (mm)</b>	<b>Tolerancia en espesor (mm)</b>	<b>Ancho de bobina</b>	<b>Tolerancia ancho(mm)</b>
1.20	± 0.06	1000 ò 1220	+10/-2
1.50	± 0.08	1000 ò 1220	+10/-2
1.80	± 0.09	1000 ò 1220	+10/-2
1.90	+0.1	1000 ò 1220	+10/-2
2.30	± 0.12	1210	+10/-2
2.50	± 0.13	1030	+10/-2
2.65	± 0.13	1000 ò 1220	+10/-2
2.90	+0.15	1195	+10/-2
3.20	± 0.1	1220	+10/-2
3.60	± 0.11	1060	+10/-2
5.00	± 0.15	1195	+10/-2
5.20	± 0.16	1195	+10/-2

1.6 El diámetro interior de cada bobina debe ser de 760 mm. Con una medida máxima de 800mm y mínima de 500 mm, con un peso unitario máximo de 12000 y mínimo de 10000 Kg

1.7 El proveedor deberá incluir el certificado de calidad las propiedades mecánicas, composición química, dureza del acero en el packing list

## 2.- Revisión:

<i>Número</i>	<i>Fecha</i>	<i>Razón</i>
12	2014-03-01	Actualización en el espesor 1.4 y 1.7 mm
13	2014-09-18	Actualización de tolerancias en el espesor y normas

## 3.- Distribución:

Jefe de Producción, Jefe de Ingeniería, Jefe de calidad, Gerente de logística, Jefe de calidad Corporativo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ansys*. (15 de Septiembre de 2014). Recuperado el 13 de Septiembre de 2014, de <http://www.ansys.com/>
- Dominguez, A. y. (2002). *Métodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería*. México: Continental.
- Fundación Wikipedia*. (s.f.). Recuperado el 21 de Octubre de 2014
- Herrera, I. (2012). *Resistencia de Materiales I*. España: Bellisco.
- Livesley, R. (1988). *elementos finitos introducción para ingenieros*. México: Limusa.
- Oñate, E. (1995). *Cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos*. Barcelona, España: Cinme.
- Shigley, J.; Mischke, C. (2002). *Diseño en ingeniería mecánica*. México: Mc Graw-Hill.
- Taguchi, G.; Chowdhury S., y Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Wu, Y.; Wu, A. (1997). *Diseño Robusto Utilizando los Métodos Taguchi*. Madrid, España: Díaz de Santos.
- Zienkiewicz, O.; Taylor, L. (2004). *El Método de los Elementos Finitos*. España: Cinme.