

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA CONCURRENTE APLICADA A ROBUSTECER LA MÁQUINA DE FATIGA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE INGENIERO MECÁNICO

NESTOR DAVID MEJÍA ALMEIDA

ellocodavid2010@hotmail.com

LADY MARYLIN PUMISACHO OCAÑA

marylin831@hotmail.com

DIRECTOR: ING. IVÁN ZAMBRANO, M.Sc.

oscarz@server.epn.edu.ec

Quito, abril 2008

DECLARACIÓN

Nosotros, Nestor David Mejía Almeida y Lady Marylin Pumisacho Ocaña, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

MARYLIN PUMISACHO OCAÑA

DAVID MEJÍA ALMEIDA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por David Mejía Almeida y Marylin Pumisacho Ocaña, bajo mi supervisión.

ING. IVÁN ZAMBRANO, M.Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento eterno a todos nuestros amigos, en especial a Pablo y Rafael por su confianza, lealtad y compañía, a nuestros familiares y profesores que contribuyeron a la formación profesional renunciando a cualquier interés y todas las personas, quienes hicieron posible la consecución del presente trabajo.

Además agradecemos el apoyo y guía de nuestro director de Proyecto de Titulación el Ing. Iván Zambrano.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi compañera inseparable, a mi hermana Victoria, a mis padres Víctor y Marisol, abuelos y a toda mi familia que me siempre estuvo a mi lado.

A mis ángeles allá en el cielo Patricio, mi abuelita Mercedes y mi papito Alfredo.

Y a ti gordo por acompañarme siempre.

Marylin 

Dedico este proyecto a Dios por ser el prologo de mi vida.

A mis padres, *Jesús* por su entrega y humildad que me ha enseñado que los sueños se alcanzan con sacrificio y dedicación, durante segundo a segundo del transcurso de mi vida que se abunda de felicidad por estar acompañado de la mujer más grandiosa, que al cuantificar sus cualidades el universo sería despreciable a lado de mi madre *Julia*.

A mis hermanos *Wilson, Gabriela, Rodrigo* ya que son mis acompañantes y consejeros que siempre alimentan mi alma, y a *Julia* mi hermana menor que con su valentía, dedicación y ternura forma su futuro profesional lejos del cariño de la familia.

A mis sobrinos que con su inocencia y alegría me llevan a ser su compañero del juego de la felicidad. A mi tía Graciela ya que sus consejos y su motivación conllevan a mi desarrollo integral.

Nestor David

CONTENIDO

RESUMEN	i
PRESENTACIÓN	ii
CAPITULO 1. FUNDAMENTOS DE LA INGENIERÍA CONCURRENTE	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 DEFINICIÓN DE LA INGENIERÍA CONCURRENTE	2
1.2.1 ORIENTACIÓN Y ELEMENTOS	3
1.2.2 IMPLANTACIÓN Y LIMITACIONES	5
1.3 CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO.....	6
1.3.1 ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO.....	7
1.3.2 COSTO DEL CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO	10
1.4 CICLO BÁSICO DE DISEÑO	12
1.5 ETAPAS DEL PROCESO DE DISEÑO.....	12
1.5.1 DEFINICIÓN DEL PRODUCTO.....	12
1.5.2 DISEÑO CONCEPTUAL	14
1.5.3 DISEÑO DE MATERIALIZACIÓN.....	14
1.5.4 DISEÑO DE DETALLE	16
1.6 HERRAMIENTAS PARA LA INGENIERÍA CONCURRENTE	18
1.6.1 DISEÑO MODULAR Y COMPLEJIDAD DEL PRODUCTO	18
1.6.2 DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN	23
1.6.3 DISEÑO PARA EL MONTAJE.....	24
1.6.4 DISEÑO PARA LA CALIDAD	28
1.6.5 DISEÑO PARA EL ENTORNO	38
CAPITULO 2. DISEÑO ROBUSTO	44
2.1 CONCEPTO DEL DISEÑO ROBUSTO	44
2.2 FUNDAMENTOS DE LAS TÉCNICAS DE TAGUCHI	45
2.2.1 PÉRDIDAS A LA SOCIEDAD	45
2.2.2 FUNCIÓN DE PÉRDIDAS	46
2.3 TÉCNICAS DE TAGUCHI.....	50
2.3.1 DISEÑO DEL SISTEMA	50
2.3.2 DISEÑO DE PARÁMETROS	50
2.3.3 DISEÑO DE TOLERANCIAS.....	59
CAPITULO 3. ENSAYO DE FATIGA	66
3.1 RESISTENCIA A LA FATIGA.....	66
3.1.1 FALLAS POR FATIGA.....	66

3.1.2	CARGAS POR FATIGA.....	66
3.1.3	RELACIÓN VIDA - ESFUERZO	67
3.1.4	CALCULO DE LA FATIGA	69
3.2	NORMAS PARA EL ENSAYO DE FATIGA.....	70
3.3	ENSAYO DE FATIGA A FLEXIÓN DE VIGA ROTATORIA	70
3.3.1	MAQUINA PARA EL ENSAYO DE FATIGA	71
3.3.2	PROBETA PARA EL ENSAYO DE FATIGA.....	72
3.3.3	CONDICIONES DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	73
CAPITULO 4. APLICACIÓN DEL DISEÑO ROBUSTO EN LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA DE VIGA ROTATORIA.....		80
4.1	DISEÑO DEL SISTEMA PARA LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA DE VIGA ROTATORIA	80
4.1.1	QFD APLICADO A LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA	80
4.2	DISEÑO DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA DE VIGA ROTATORIA	87
4.2.1	ESTUDIO DEL EFECTO EN LA VARIABLE DE SALIDA.....	88
4.3	DISEÑO DE TOLERANCIAS DE LA MÁQUINA DE FATIGA DE ENSAYOS VIGA ROTATORIA	96
4.3.1	CÁLCULO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA MÁQUINA.....	96
4.3.2	TOLERANCIAS DE LA MÁQUINA	111
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		114
5.1	CONCLUSIONES.....	114
5.2	RECOMENDACIONES	116
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		117
ANEXOS		119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura del Diseño Tradicional y la Ingeniería Concurrente.	1
Figura 1.2 Antecedentes y Objetivos de la Ingeniería Concurrente.	2
Figura 1.3 Implantación de la Ingeniería Concurrente.....	5
Figura 1.4 Ciclo de vida del producto.	7
Figura 1.5 Ciclo de vida del producto con respecto a las ventas.....	9
Figura 1.6 Costo del ciclo de vida del producto.....	11
Figura 1.7 Influencia de los costos de cada fase sobre el costo del producto.....	11
Figura 1.8 Ciclo Básico de Diseño.	12
Figura 1.9 Requerimientos Funcionales.....	14
Figura 1.10 Fases en el Diseño de Detalle.	16
Figura 1.11 Clasificación de la Complejidad.....	21
Figura 1.12 Método de la disminución del número de piezas.....	26
Figura 1.13 Costo de ensamblaje.....	27
Figura 1.14 El Diseño Robusto en el Desarrollo de Productos.....	29
Figura 1.15 Matrices y fases del desarrollo de la función de la calidad.....	32
Figura 1.16 Casa de la calidad.....	33
Figura 1.17 Consideraciones ergonómicas al diseñar.....	39
Figura 1.18 Simulación ergonómica	41
Figura 2.1 Función de pérdida de calidad.	47
Figura 2.2 Variabilidad transmitida por un factor ruido R para diferentes niveles del factor de diseño D.	52
Figura 2.3 Relación lineal y no lineal entre los parámetros del producto y la característica de calidad.....	52
Figura 2.4 Factores de ruido	53
Figura 2.5 Diseño de la Matriz de Experimentos.....	55
Figura 2.6 Módulos de aplicación de las tolerancias	60
Figura 2.7 Tolerancia	61
Figura 2.8 Rugosidad de superficie.....	62
Figura 3.1 Cargas de máquina rotativa.	67
Figura 3.2 Diagrama S-N para un ensayo.....	67
Figura 3.3 Esquema de la Máquina de Ensayo de Fatiga.....	72
Figura 3.4 Efectos de los cambios en la forma de la probeta sobre la fatiga.	73
Figura 3.5 Estado actual de la máquina de ensayos de fatiga.	74
Figura 3.6 Rodamientos y elementos de sujeción.....	75
Figura 3.7 Acople flexible de la máquina de ensayos de fatiga.....	75
Figura 3.8 Esquema de los valores a medir en el ensayo de fatiga.	77
Figura 3.9 Comparación diagrama S-N para un ensayo.	78
Figura 4.1 Prototipo de la máquina de ensayos de fatiga.	85
Figura 4.2 Gráfico general del cubo.	90
Figura 4.3 Gráfico de cubo del experimento factorial para 21kg.	90
Figura 4.4 Gráfico de cubo del experimento factorial para 18kg.	91
Figura 4.5 Gráfico de cubo del experimento factorial para 14kg.	91
Figura 4.6 Diagrama de Pareto de los efectos estimados para 21 kg.....	92
Figura 4.7 Diagrama de Pareto de los efectos estimados para 18 kg.....	93
Figura 4.8 Diagrama de Pareto de los efectos estimados para 14 kg.....	93
Figura 4.9 Análisis del factor señal/ruido para 21 kg.....	94

Figura 4.10 Análisis del factor señal/ruido para 18 kg.....	95
Figura 4.11 Análisis del factor señal/ruido para 14 kg.....	95
Figura 4.12 Diagrama de cuerpo libre del eje de la máquina de ensayos de fatiga.	97
Figura 4.13 Diagrama de reacciones sobre el eje de la máquina de ensayos de fatiga.	98
Figura 4.14 Diagrama de fuerzas cortantes.	99
Figura 4.15 Diagrama de momentos	99
Figura 4.16 Acople flexible	104
Figura 4.17 Diagrama de cuerpo libre y cortante del eje de carga.....	106
Figura 4.18 Diagrama de momentos para el eje de carga.	106
Figura 4.19 Mordazas de sujeción.	108
Figura 4.20 Placa Soporte.....	108
Figura 4.21 Estructura Soportante.	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Efectos de cada fase sobre los costos	11
Tabla 1.2 Guía de diseño para piezas fundidas.	24
Tabla 1.3 Clasificación según la Probabilidad de ocurrencia.	37
Tabla 1.4 Clasificación según Gravedad o Severidad de fallo.	37
Tabla 1.5 Clasificación según la Probabilidad de no detección.....	38
Tabla 2.1 Funciones de pérdidas de Taguchi.....	48
Tabla 2.2 Relaciones señal ruido (S/N) de Taguchi.	54
Tabla 2.3 Matriz de diseño factorial 2 ²	56
Tabla 2.4 Signos para los contrastes de los experimentos 2 ²	56
Tabla 2.5 Tabla de experimentos factoriales fraccionados.	59
Tabla 2.6 Clasificación de las tolerancias	61
Tabla 2.7 Tabla guía para la selección de tolerancias de formas y posición.....	62
Tabla 2.8 Relación entre el mecanizado y la superficie	63
Tabla 2.9 Valores de rugosidad superficial	64
Tabla 2.10 Tolerancias respecto a los procesos de fabricación	65
Tabla 3.1 Límites de resistencia de fatiga.	68
Tabla 3.2 Resistencia a la fatiga para diferentes materiales.	68
Tabla 3.3 Factores de Corrección del Límite de Resistencia a la Fatiga.....	70
Tabla 3.4 Resultados de los Ensayos de Fatiga.	78
Tabla 4.1 Identificación de clientes.	81
Tabla 4.2 Jerarquización de las necesidades de los clientes.	83
Tabla 4.3 Jerarquización de la relación necesidades de los clientes vs. Parámetros de diseño.	83
Tabla 4.4 Componentes de la Máquina de Fatiga.....	84
Tabla 4.5 Especificaciones de máquina de ensayo.....	84
Tabla 4.6 Relación entre las especificaciones del producto y características de las piezas.....	84
Tabla 4.7 Piezas críticas de la máquina de ensayos de fatiga.....	85
Tabla 4.8 Relación entre las características de las piezas vs. Operaciones de fabricación.....	86
Tabla 4.9 Operaciones críticas de fabricación.....	86
Tabla 4.10 Operaciones de Fabricación vs. Especificaciones de producción.	87
Tabla 4.11 Factores de Control y Ruido.....	87
Tabla 4.12 Matriz de Diseño para 21kg.....	88
Tabla 4.13 Matriz de Diseño para 18kg.....	89
Tabla 4.14 Matriz de Diseño para 14kg.....	89
Tabla 4.15 Parámetros estimados para 21kg.....	92
Tabla 4.16 Parámetros estimados para 18kg.....	93
Tabla 4.17 Parámetros estimados para 14kg.....	93
Tabla 4.18 Valores de los factores que influyen en el límite a la fatiga	97
Tabla 4.19 Diámetros calculados en función del factor de seguridad.	100
Tabla 4.20 Factores para el cálculo de los rodamientos en Y de bolas.	101
Tabla 4.21 Horas de servicio recomendadas para diferentes clases de máquinas.	102
Tabla 4.22 Diámetros del eje de carga calculados en función del factor de seguridad.....	107

LISTA DE ANEXOS

ANEXO N°1: Planos De Las Probetas Para El Ensayo De Fatiga.....	120
ANEXO N°2: QFD (Despliegue de la Función de la Calidad).....	124
ANEXO N°3: AMFE (Análisis Modal de Fallos Y Efectos).....	127
ANEXO N°4: Catálogos de Elementos Mecánicos.....	130
ANEXO N°5: Resultados del Diseño Estructural en SAP	141
ANEXO N°6: Rotating Bending Beam Fatigue Testing (Boeing).....	144
ANEXO N°7: Planos de Diseño de La Máquina de Ensayos de Fatiga	162

RESUMEN

El presente documento detalla la aplicación de la nueva filosofía de Ingeniería Concurrente y su herramienta el Diseño Robusto desarrollado en la Máquina de Ensayos de Fatiga de Viga Rotatoria de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

En el primer capítulo se desarrolla el marco teórico en el que se fundamenta esta filosofía, las fases de aplicación, elementos y orientación, además se habla de las herramientas que utiliza la Ingeniería Concurrente y se hace una revisión breve del ciclo y costo de vida de un producto.

Una descripción detallada del Diseño Robusto en el cual se basa el presente proyecto, se desarrolla en el segundo capítulo, aquí se define la metodología de Taguchi, y sus tres etapas para la optimización de productos: Diseño del sistema, Diseño de parámetros y Diseño de tolerancias. Se habla también de la variabilidad en la calidad de un producto y la relación Señal/Ruido.

En el tercer capítulo se describe los fundamentos utilizados en el ensayo de fatiga, y las condiciones que debe cumplir la máquina de fatiga de viga rotatoria para que el ensayo proporcione resultados con una alta confiabilidad.

En el cuarto capítulo se desarrollo el Diseño Robusto en sus tres etapas, para lo cual se realizó un Despliegue de la Función de la Calidad en la fase de Diseño del Sistema, un Diseño de Experimentos para la fase de Diseño de Parámetros, además del cálculo y selección de componentes de la máquina de fatiga para el desarrollo del Diseño de Tolerancias. Los resultados obtenidos en cada una de estas fases, con la aplicación ordenada de herramientas, se presentan en este capítulo. Los análisis estadísticos y los resultados gráficos que se presentan han sido realizados con el programa JMP.

Finalmente en el capítulo cinco se presentan las conclusiones y recomendaciones luego de finalizado el proyecto.

PRESENTACIÓN

Actualmente una institución de cualquier tipo debe innovar procedimientos, materia prima, recurso intelectual y tecnología para alcanzar estándares de calidad, en procesos y productos, es ahí donde la Ingeniería Concurrente al ser aplicada nos permite desarrollar productos que cumplan con las exigencias del cliente.

La Ingeniería Concurrente es una metodología que asocia las actividades que intervienen para el desarrollo de un producto y proceso. Esta técnica promueve el análisis durante todo el ciclo de vida del producto, por lo que resulta fundamental el cambio radical en la concepción del diseño tradicional.

El Diseño Robusto es una herramienta de esta filosofía, que busca mejoras radicales, por medio de reducciones drásticas de la variación de parámetros claves para la satisfacción de las necesidades de los clientes, alcanzando una alta confiabilidad. Mediante el cual se define, experimenta, analiza y mejora empleando de una forma metódica, diferentes herramientas estadísticas y de gestión que permiten de manera eficaz llegar al diseño óptimo.

El presente documento describe como puede ser implementado un Diseño Robusto en una Máquina de Ensayos de Fatiga con dificultades propias de la industria ecuatoriana. Los autores desean que esta información pueda ser utilizada en el desarrollo de proyectos similares en otros diseños.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS DE LA INGENIERÍA CONCURRENTE

El objetivo de este capítulo es mostrar los fundamentos esenciales para la realización de este proyecto. También se describe las herramientas que utiliza la Ingeniería Concurrente para su implantación.

1.1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería concurrente es una metodología donde se asocia actividades que forman parte del entorno del producto, analizando, desarrollando y evaluando características implícitas en los factores que influyen en la concepción, creación y aceptación del producto, obteniendo mejor calidad en un precio adecuado y en un menor tiempo.

La estructura del diseño tradicional solo toma en cuenta a las fases de diseño y fabricación a diferencia de la ingeniería concurrente que además de estas fases encierra también la comercialización, posventa y fin de vida del producto.

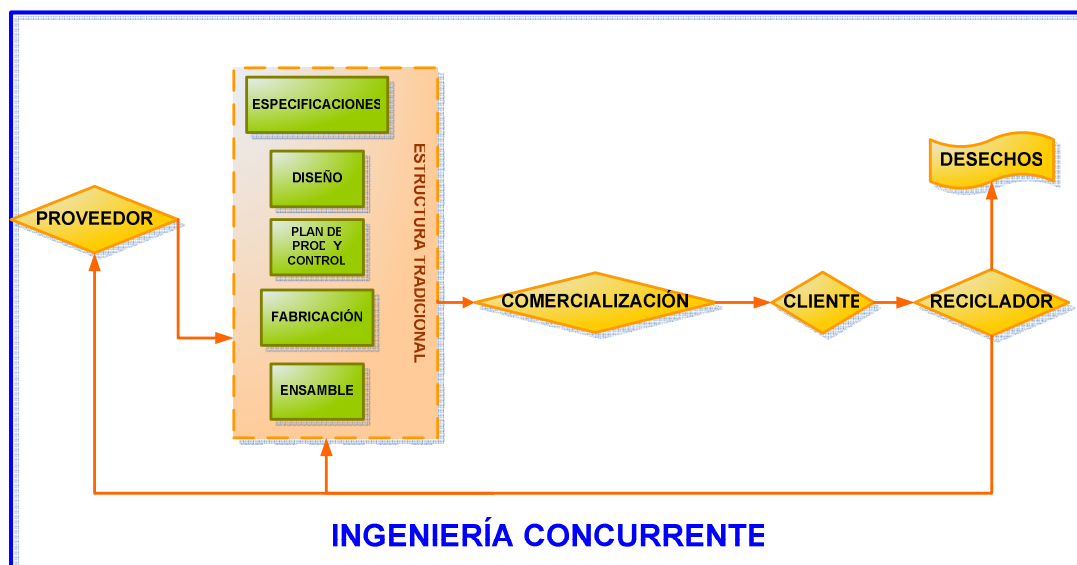


Figura 0.1 Estructura del Diseño Tradicional y la Ingeniería Concurrente.

Las innovaciones tecnológicas son herramientas que incrementa la eficiencia de un proceso, para alcanzar estándares competitivos se debe implantar un sistema de gestión de procesos, evaluar su función respecto al desarrollo del producto, aportar con ideas nuevas y colaborar con los departamentos que desarrollan actividades asociadas.

1.2 DEFINICIÓN DE LA INGENIERÍA CONCURRENTE

Se define la Ingeniería Concurrente, como una metodología en la cual considera el Desarrollo de Productos de una manera integrada, donde concurre la calidad, el entorno, los recursos humanos, gama del producto, equipos de trabajo multidisciplinarios, gestión de proyectos, estructura modular, tecnologías de la información y comunicaciones, prototipos rápidos, etc.

El propósito de la Ingeniería Concurrente es reducir el tiempo en el cual se desarrolla un producto mediante actividades en paralelo lo que difiere del diseño tradicional que realiza actividades secuenciales y por ende tiene una mayor duración.

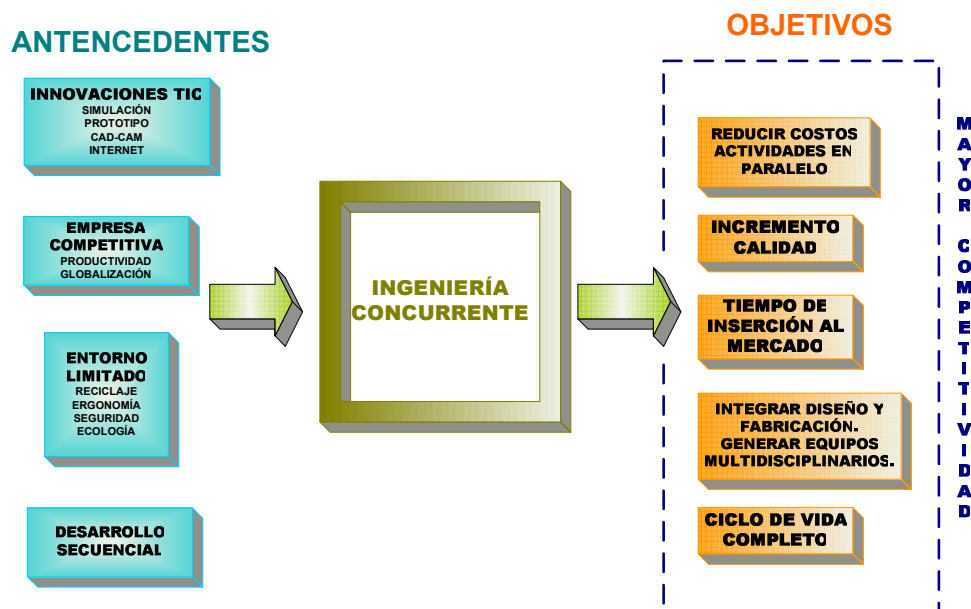


Figura 0.2 Antecedentes y Objetivos de la Ingeniería Concurrente.

1.2.1 ORIENTACIÓN Y ELEMENTOS

La metodología de la Ingeniería Concurrente puede englobarse en dos orientaciones principales:

- Ingeniería Concurrente en relación a la Productividad (Fabricación, Costo, Calidad, Comercialización), considera el mercado al que se dirige y los procesos de fabricación.
- Ingeniería en relación al entorno (Ergonómica, Seguridad, Medio Ambiente, Reciclaje)

Existen diferentes elementos esenciales o líneas de actuación que son utilizados en esta filosofía, entre los cuales tenemos:

1.2.1.1 Organización

La organización es una variable fundamental para que la aplicación de la Ingeniería Concurrente tenga un alto grado de efectividad. Se basa en la introducción de nuevas estructuras organizativas como equipos multidisciplinarios y equipos pluridisciplinarios que realicen actividades de modo concurrente y trabajen de modo interactivo.

Los departamentos que se encuentran involucrados en la creación de un producto, conllevan aspiraciones comunes formando un equipo multidisciplinario que alcance objetivos de calidad, costos, plazo y prestaciones del nuevo producto.

1.2.1.2 Recursos Humanos

Los cambios que implica llevar de una organización funcional con jerarquías a una estructura por equipos de trabajo requiere de técnicas y métodos de motivación, de trabajo en equipo, de consenso en la toma de decisiones, de delegación de responsabilidades, de dirección, planificación y seguimiento de proyectos, de dirección de reuniones y lo que es más difícil de conseguir, un lenguaje común que elimine el lenguaje técnico de las diferentes especialidades, por medio de capacitación.

1.2.1.3 Información

Para llevar a cabo la implementación de esta metodología debe existir una retroalimentación de la información del producto interdepartamental, desde su fase inicial que se refiere a los requerimientos de los clientes hasta su fase final que es cuando el producto se lanza al mercado.

Se debe fomentar una comunicación constante entre ellos a través de juntas programadas, en las cuales se tomen decisiones y se deleguen responsabilidades, variando temporalmente el responsable de cada departamento.

1.2.1.4 Tecnología

Entre los elementos de la Ingeniería Concurrente se considera el sistema informático CIM¹ (Computer Integrated Manufacturing), este sistema permite operar, procesar y verificar información en todo el proceso desde la planificación, diseño, fabricación y la calidad, cuando se utiliza estos sistemas informáticos se le conoce a esta metodología como Ingeniería Concurrente Asistida por Computadora (Computer Aided Concurrent Engineering, CACE)

Los módulos que constituyen el CIM son:

- CAE (COMPUTER AIDED ENGINEERING)
- CAD (COMPUTER AIDED DESIGN)
- CAP (COMPUTER AIDED PLANNING)
- CAM (COMPUTER AIDED MANUFACTURING)
- PPC (PRODUCTION PROGRAM CONTROL)
- DNC (DISTRIBUTED OR DIRECT NUMERICAL CONTROL)
- DL (DATA LOGGING)
- CAQ (COMPUTER AIDED QUALITY)

¹ Salvador Capuz Rizo, Introducción al Proyecto de Producción, Alfaomega, México, 2001; pág. 59.

Para realizar un sistema de Ingeniería Concurrente Asistido por Computadora es necesario contar con los siguientes módulos:

1. Modelado de Información, que se relaciona con la identificación y composición de los datos, información y conocimiento que describe por completo un objeto real y permite la construcción de modelos de información que apoyen las necesidades de formación del ciclo de vida del producto.
2. Aplicaciones de apoyo a la decisión, son las aplicaciones relacionadas a la implementación e integración de un conjunto de herramientas de software para atacar un diseño específico, problemas de ingeniería o manufactura que ayudarán a la realización del producto.
3. Arquitectura del sistema de información, es la arquitectura que permite la integración de los dos modelos de información y de las aplicaciones de ingeniería concurrente dentro de un ambiente adecuado para el usuario.

1.2.2 IMPLANTACIÓN Y LIMITACIONES

1.2.2.1 Implantación

La implantación consta de 3 fases:



Figura 0.3 *Implantación de la Ingeniería Concurrente.*

1.2.2.2 Limitaciones

Entre las principales limitaciones se tiene las organizativas y tecnológicas:

1.2.2.2.1 Organizativas

- La empresa y sus dirigentes no están preparadas para un cambio.
- Clima organizacional inadecuado.
- Contratos laborales que dificultan el cambio.
- Falta de motivación y capacitación.
- Limitada participación de clientes y proveedores.
- Desconfianza para innovar y afrontar riesgos.
- Desconfianza para realizar inversiones económicas.

1.2.2.2.2 Tecnológicas

- Falta de conocimiento de las tecnologías de la información
- Herramientas y equipos obsoletos
- Sistemas informáticos limitados
- Sistemas de mantenimiento inadecuados
- Control de calidad inadecuado al producto
- Recursos humanos y materiales inadecuados
- Mala gestión de la información técnica y administrativa.

1.3 CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO

El ciclo de vida de un producto se refiere a la consideración de los diferentes estados que va a atravesar un producto a lo largo de su existencia. Las primeras etapas son las de desarrollo, diseño y fabricación, luego pasa por las etapas de comercialización, utilización y reciclaje.

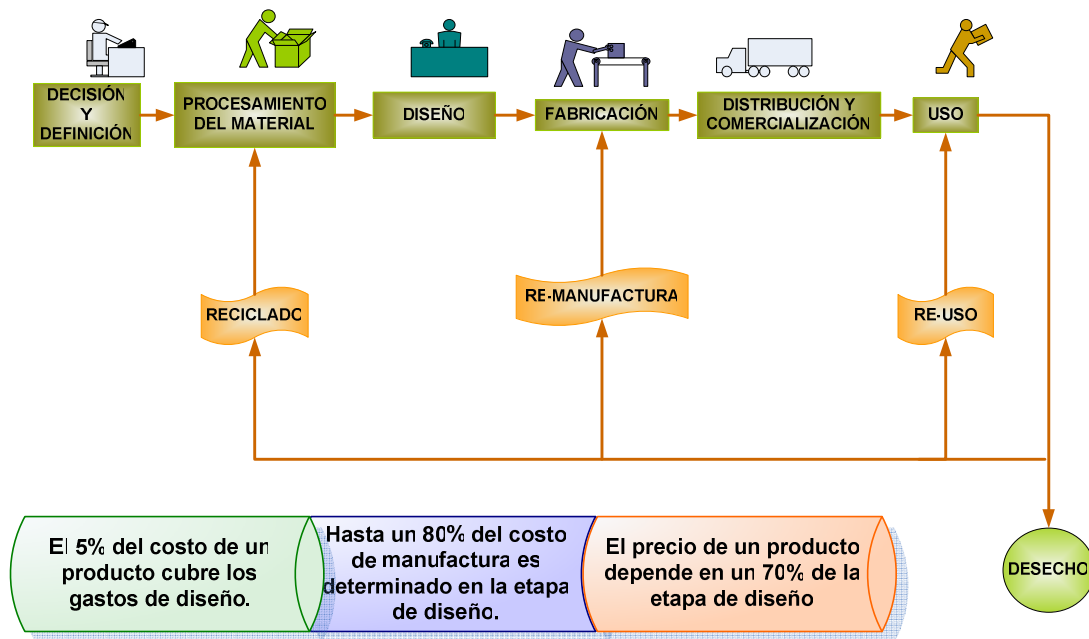


Figura 0.4 Ciclo de vida del producto.

1.3.1 ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO

La ingeniería concurrente abarca varias etapas para el desarrollo de un producto, desde su concepción hasta su fin de vida, en los siguientes puntos se abarca cada una de ellas y su incidencia sobre el éxito del producto.

1.3.1.1 Decisión y Definición

La primera etapa corresponde a la toma de decisión de realizar el producto y de definirlo según las especificaciones requeridas por el usuario.

Para aceptar o rechazar una decisión se debe analizar la capacidad de poder invertir recursos materiales, humanos y de tiempo, orientados a los clientes potenciales.

La definición es la etapa crítica del producto ya que es el éxito de este durante el ciclo de vida, por medio del cual se establece la satisfacción de las necesidades del mercado, la viabilidad de la fabricación a costos rentables y la seguridad que presenta este.

1.3.1.2 Diseño y desarrollo

En esta etapa se busca llegar a un concepto del producto que cumpla con las especificaciones planteadas, además del ciclo de vida previsto y su viabilidad de fabricación.

Dentro del desarrollo del producto se debe tomar en cuenta no solo el diseño sino también las actividades que deben realizarse para llevarlo hacia el usuario.

Se establece que el producto tenga el funcionamiento adecuado durante todo su ciclo de vida.

1.3.1.3 Fabricación

Es el conjunto de actividades efectivas para elaborar el producto en condiciones convenientes de calidad, costos y tiempo.

Las actividades principales que se desarrollan en esta etapa son:

- Planificación, programación de la producción, preparación de las herramientas y equipos necesarios.
- La elaboración de piezas y componentes.
- Adquisiciones de los diferentes accesorios para el ensamble del equipo
- Montaje del equipo
- Control de la calidad mediante pruebas que garanticen las especificaciones técnicas del producto.
- Realizar la documentación (manual de instrucciones, manual de mantenimiento y garantías).

1.3.1.4 Distribución y comercialización

Dentro de esta etapa se realizan actividades tales como transporte y distribución, que no añaden valor al producto pero si representan un aumento en su costo.

El producto se da a conocer al usuario por medio de la comercialización, en este punto se establece el precio y las condiciones de servicios postventa como garantías y mantenimiento.

Dentro de esta etapa el producto sufre diferentes cambios desde su introducción al mercado donde es lanzado al mercado con una producción a gran escala y un programa exhaustivo de mercadotecnia en el cual las ventas son pocas y existen mayores gastos, siguiendo en un crecimiento de ventas hasta llegar a estabilizarse y por último sufren un declive en el mercado.

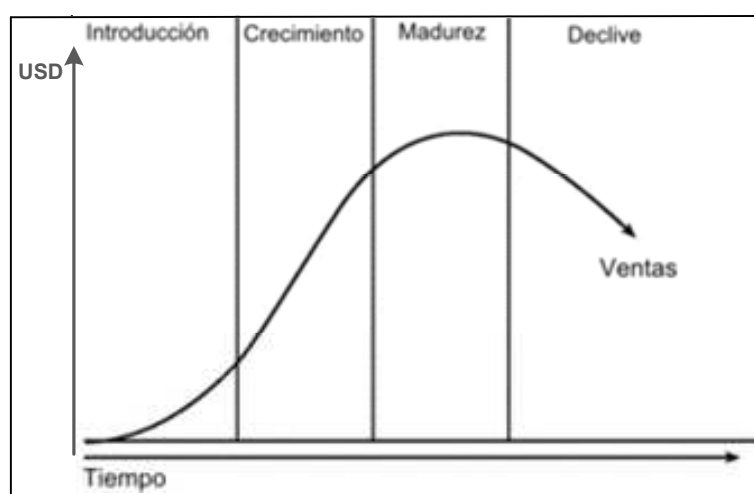


Figura 0.5 *Ciclo de vida del producto con respecto a las ventas*

1.3.1.5 Utilización y mantenimiento

Los departamentos de ventas y post-venta no dejan de ser parte importante del desarrollo del producto, ya que son los departamentos que reciben la mayor retroalimentación por parte del cliente, ya sea cliente directo, indirecto o potencial.

Ellos son el enlace entre el diseño y producción con el cliente, ya sea que reciban información en el momento de la venta o en el momento del servicio del producto.

Es el funcionamiento del producto para el cual fue diseñado, en esta etapa se presentan fallos, para predecir los mismos se realizan actividades de mantenimiento. En esta etapa son importantes aspectos como:

- Funciones y prestaciones a la utilización efectiva.
- Versatilidad, seguridad y maniobrabilidad en el uso
- Diseño estético del producto
- Consumos admisibles de suministros de energía y reducción máxima de agentes contaminantes.
- Manual de mantenimiento.
- Estrategias y acciones de mantenimiento.

1.3.1.6 Fin de vida

Esta última etapa abarca el fin de vida útil del producto y su eliminación.

Existen consecuencias económicas y ambientales debido a la eliminación del producto, es por eso que en esta generación se han creado nuevas formas tales como la reutilización y reciclado del producto.

1.3.2 COSTO DEL CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO

El precio de venta es la suma de los costos de las etapas del ciclo de vida, en la cual también se debe considerar las etapas de posventa como son:

- Costo de Utilización y Mantenimiento
- Costo de fin de vida

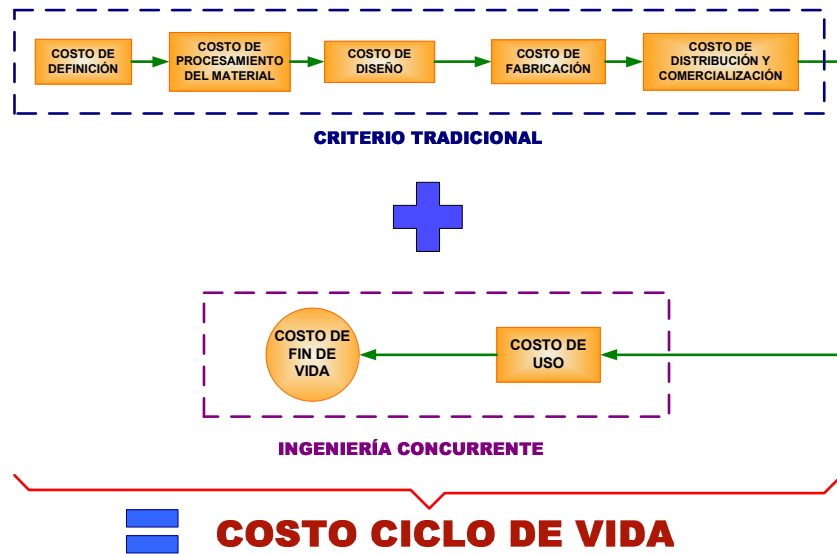


Figura 0.6 Costo del ciclo de vida del producto.

Las decisiones que se tomen en la fase de diseño condicionan el costo en el resto de etapas.

Costos del producto	Porcentaje	Efectos sobre la producción	Porcentaje
Diseño	5%	Diseño	70%
Materiales	50%	Materiales	20%
Mano de obra	15%	Mano de obra	5%
Gastos generales	30%	Gastos generales	5%

Tabla 0.1 Efectos de cada fase sobre los costos²

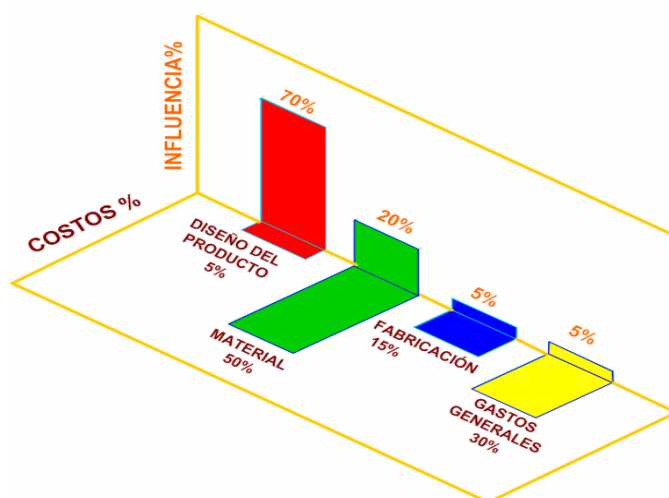


Figura 0.7 Influencia de los costos de cada fase sobre el costo del producto.

² Salvador Capuz Rizo, Introducción al Proyecto de Producción, Alfaomega, México, 2001; pág. 43.

1.4 CICLO BÁSICO DE DISEÑO

El diseño establece planes que encierran un conjunto de actividades para satisfacer las necesidades del cliente orientadas a la resolución de problemas. Este ciclo tiene las siguientes fases:

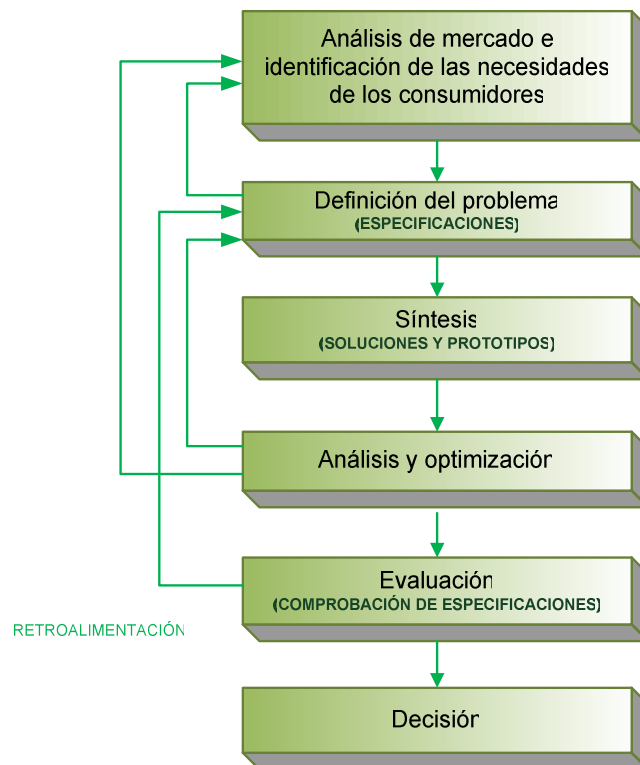


Figura 0.8 *Ciclo Básico de Diseño.*

1.5 ETAPAS DEL PROCESO DE DISEÑO

1.5.1 DEFINICIÓN DEL PRODUCTO

La definición de un producto debe incluir todas las especificaciones con las cuales se va a diseñar. En la Ingeniería Concurrente una especificación es un conjunto de atributos que debe tener el producto para satisfacer las necesidades o preferencias de los clientes.

Las especificaciones definen diversos factores tales como:

- Costos incurridos en el producto

- Vida esperada del producto
- Temperaturas de operación
- Modos de fabricación
- Confiabilidad
- Limitaciones dimensionales y de peso
- Velocidades y avances esperados
- Impactos ambientales
- Servicio de entorno
- Aspectos legales

Para que las especificaciones puedan cumplirse no deben ser ni muy ambiciosas ni demasiado limitadas, ya que estas influyen directamente en el costo del producto, en la viabilidad de fabricación y su robustez.

Estas pueden ser requerimientos o deseos, la primera corresponde a las especificaciones necesarias que todo producto debe tener y la segunda son especificaciones que optimizan el aspecto del producto.

Se debe disponer de una lista de referencia de especificaciones que permite establecer funciones, características, prestaciones y condiciones de funcionamiento, para poder elaborar una definición del producto apropiada.

Los requerimientos iniciales tales como: especificaciones de diseño, descripción del usuario, desempeño esperado y otros requerimientos, contienen de forma implícita los requerimientos de diseño, de ensamble y funcionales.

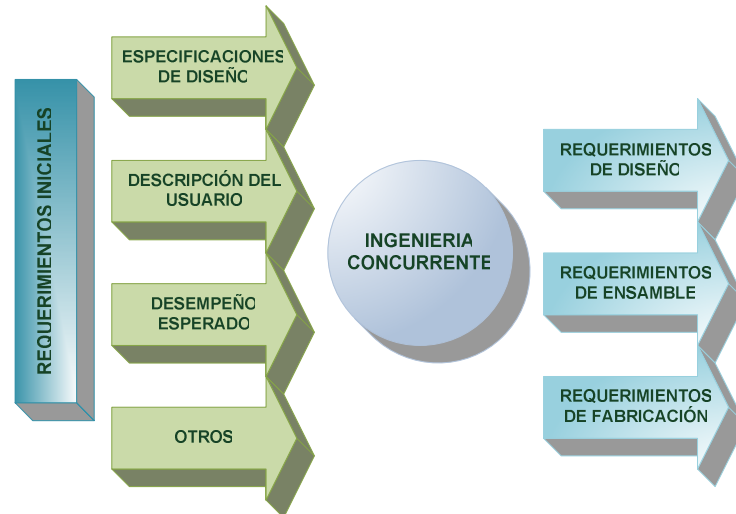


Figura 0.9 *Requerimientos Funcionales.*

1.5.2 DISEÑO CONCEPTUAL

Es la etapa de innovación y donde se debe impulsar un sentido crítico y riguroso en la evaluación de las soluciones. Para avalar las evaluaciones se deben desarrollar prototipos preliminares y simulaciones virtuales que desechen dudas.

La estructura funcional es la principal herramienta en el diseño conceptual. Orientándose a tres objetivos:

- Ofrecer una estructura funcional más específica.
- Proveer de un sistema de búsqueda más eficiente que los criterios de solución, que permitan dar soluciones de una forma integral.
- Permite la creación de la estructura modular del producto.

1.5.3 DISEÑO DE MATERIALIZACIÓN

Es la materialización del producto, partiendo de criterios técnicos y económicos que dan la forma y dimensiones finales, para la realización de las funciones. Por medio del diseño de materialización se da alternativas de solución constructivas para luego evaluarlas. En esta etapa se desarrollan los planos, hipótesis de partida, cálculos, simulaciones, prototipos y ensayos realizados con los resultados utilizando en el proceso los sistemas informáticas (CAD/CAE).

1.5.3.1 Pasos del diseño de materialización

- Identificar los requerimientos limitadores.
- Determinar las funciones y parámetros críticos.
- Desplegar alternativas de diseño de materialización preliminar.
- Evaluar las anteriores alternativas y seleccionar una de ellas.
- Materializar las restantes funciones.
- Completar el diseño de materialización provisional.
- Ensayar y validar el diseño de materialización provisional.
- Incorporar las últimas modificaciones.

1.5.3.2 Generación de variantes por inversión

Estas pueden presentar valoraciones que difieren en aspectos como dimensiones exteriores, la precisión necesaria, la facilidad de fabricación, el comportamiento a fatiga de determinados elementos o la seguridad del sistema.

1.5.3.3 Establecimiento de un protocolo de ensayo

Este constituye una parte del proyecto del ensayo y debe considerar los siguientes aspectos:

- Definición de los objetivos del ensayo.
- Diseño del ensayo.
- Planificación del ensayo.
- Preparación del prototipo y del banco de ensayo.
- Interpretación y validación de los resultados.

1.5.4 DISEÑO DE DETALLE

En esta etapa se desarrolla toda la información necesaria para la fabricación del producto. Dentro de esta información tenemos los planos de conjunto y piezas, esquemas de montaje, especificaciones de los materiales, técnicas y de gestión.

En la siguiente figura se presenta las fases del diseño de detalle para llegar a obtener el dimensionamiento de las piezas.

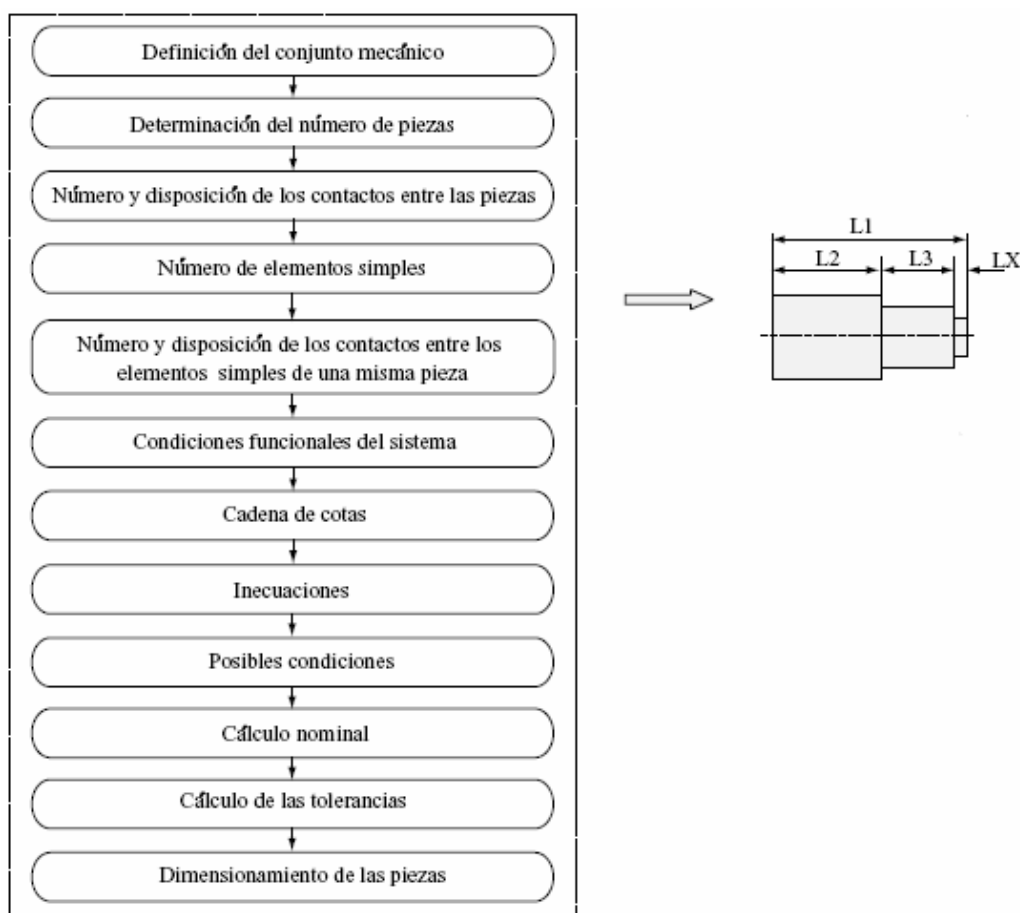


Figura 0.10 Fases en el Diseño de Detalle.³

1.5.4.1 Completar la determinación de piezas y componentes

En esta parte se detalla toda la información para la fabricación de piezas y componentes, dentro de esta información debe constar:

- a) *Determinar la geometría y los materiales*

³ Pérez R., Caracterización y Reproducción de los requerimientos Funcionales y las Tolerancias en el diseño Conceptual, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2002, Cap2, pág. 30.

- Formas y dimensiones
- Tolerancias
- Radios de acuerdo, chaflanes
- Determinación de materiales y procesos

b) Determinar los acabados

- Recubrimientos
- Implantación de cables
- Determinación de lubricantes y otros fluidos

c) Lista de pieza y componentes

Se debe codificar cada pieza y componente, esto se logra actualmente con sistemas informáticos. Los sistemas de codificación deben tener las siguientes propiedades:

- Suministrador, plazos de entrega y coste
- Módulos a los que pertenecen
- Procesos de fabricación, máquinas y tiempo que requieren
- Útiles de forma en caso de existir.

1.5.4.2 Simplificar soluciones

En el diseño de detalle se debe simplificar las piezas y reducir la complejidad de los sistemas, de lo cual se puede obtener:

- Disminución del número y tipos de elemento de unión, de elementos de guiado y componentes de uso frecuente.
- Eliminación de variantes en componentes análogos

- Unir si es posible dos o más piezas en una sola.

1.5.4.3 Revisar el proyecto

En esta fase se analiza que cada parte y aspecto del proyecto concuerden, para lo cual se debe realizar los siguientes pasos:

- Revisar que cumpla todas las funciones
- Comprobar que sea fabricable
- Repasar que el proyecto sea completo.

1.6 HERRAMIENTAS PARA LA INGENIERÍA CONCURRENTE

Las herramientas de la ingeniería concurrente son técnicas que se utilizan para el desarrollo de un producto, resolver problemas en la fabricación, montaje y en su fin de vida. Seguidamente se detallan las principales herramientas.

1.6.1 DISEÑO MODULAR Y COMPLEJIDAD DEL PRODUCTO

Es una herramienta básica en la implantación de la Ingeniería Concurrente, por medio de la cual se logra que determinadas partes o subsistemas estén organizados en conjuntos denominados módulos de tal forma que faciliten su utilización con diversos objetivos en diferentes sistemas o máquinas, además de mejorar la versatilidad en su fabricación, ensamblaje y reciclaje.

1.6.1.1 Modularidad

Existen diferentes tipos de módulos entre los cuales tenemos:

- *Módulos funcionales.*- por medio de estos se materializa una o mas funciones del producto.
- *Módulos constructivos.*- estructuran y facilitan la fabricación de un producto reduciendo su complejidad y por ende su costo.

La estructura modular y los módulos deben establecerse en la etapa de definición y diseño conceptual, cuando estos parámetros son bien pensados se logra obtener un proyecto más corto y económico. Los principales objetivos que busca la modularidad son:

- a) Agrupar las funciones en módulos
- b) Establecer las interfases adecuadas entre módulos
 - Interfase mecánica
 - Interfase de energía
 - Interfase transferencia de materiales
 - Interfase de señal

1.6.1.1.1 Ventajas del Diseño Modular

- Incremento de flexibilidad dependiendo de las combinaciones decididas.
- Disminución de costos en consideración al criterio de economía a escala.
- Los criterios de optimización y mantenimiento se facilitan.
- Cada uno de los elementos modulares tiene la capacidad de ser utilizado y comercializado individualmente.
- Flexibilidad en la organización de la fabricación. Se pueden subcontratar de manera independiente la fabricación de los diferentes módulos y desarrollarse en paralelo, lo que reduce el tiempo total de diseño.
- Facilidad de ensamblado.
- Mejora de la fiabilidad. Derivada de la previa verificación de cada uno de los módulos.

1.6.1.1.2 Limitaciones del Diseño Modular

- Insuficiente información acerca de las metodologías para el desarrollo del diseño modular.
- Si la estructura se divide en muchos módulos, se tiene una mayor complejidad.
- Adaptación del usuario a la estructura modular.

1.6.1.1.3 Implantación del Diseño Modular

- Revisar las especificaciones y requerimientos de la máquina.
- Comprender la función de la máquina, de los subcomponentes y de cada uno de los elementos.
- Crear y diseñar los módulos necesarios.
- Desarrollar alternativas de solución en base a un criterio modular.
- Seleccionar la alternativa con mayor ventaja técnica y económica.
- Diseñar los módulos
- Fabricar los módulos
- Ensamblar los módulos en el conjunto.
- Comprobar el funcionamiento de la máquina

1.6.1.2 Complejidad

La medición de la complejidad es una forma de conducir al diseñador en la creación de productos que tengan un balance efectivo entre manufactura y ensamble, considerando las dificultades que se presentan al tratar de hacer que el producto cumpla con estas dos de manera eficiente.

La complejidad está relacionada con el número y las relaciones entre los elementos que intervienen en la determinación de una pieza, componente o producto.

En la siguiente figura se presenta una clasificación aproximada de la complejidad de los productos.

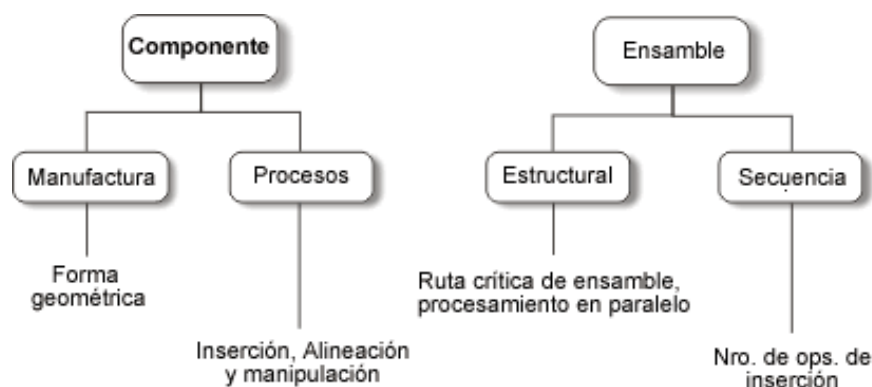


Figura 0.11 *Clasificación de la Complejidad.*⁴

1.6.1.2.1 Complejidad de piezas y componentes

A medida que una pieza es más complicada en su fabricación aumenta su complejidad. Los factores que se toman en cuenta en la complejidad de una pieza o componente son los métodos de fabricación, el número de cotas y la tolerancia.

1.6.1.2.2 Complejidad de un conjunto

El ensamble de productos es la actividad que más influencia tiene sobre la complejidad total del producto. Dicha complejidad se puede dividir en 'complejidad estructural' y 'complejidad secuencial'. La última actividad, secuencia de ensamble, se ha estudiado por varios años, esto en cuanto a la predicción y la asignación de recursos para el proceso de emplazar los diferentes componentes. Dichos estudios han producido medios para detectar las fuentes de complejidad, así como las variables a ser rastreadas. La complejidad estructural, por el contrario, se presenta como una percepción más subjetiva y evasiva sobre la

⁴ www.hull.ac.uk/MAPP/sandpit/content/publications/Publications.htm

configuración del producto. Mientras más grande es el número de piezas que conforman un conjunto mayor es su complejidad.

Se puede obtener grandes beneficios de la disminución de la complejidad de un producto entre lo que se tiene:

- Disminución del número de piezas a fabricar
- Disminución del número de interfases
- Disminución del número de elementos de unión
- Disminución del coste
- Mayor fiabilidad del conjunto

1.6.1.2.3 Evaluación de la complejidad

Se puede evaluar la complejidad por medio de dos factores como lo son:

- *Factor de complejidad de piezas y componentes*

Los métodos que se utilizan son extensos y poco eficaces por lo cual no se los analiza.

- *Factor de complejidad de un conjunto, Cf*

Existe una metodología propuesta por Pugh (1991) la cual ofrece una valoración global y considera los siguientes parámetros⁵:

C_f = factor de complejidad de un conjunto.

N_p = número de piezas o componentes.

N_t = número de tipos distintos de piezas o componentes.

N_i = número de conexiones, interfases.

f = número de funciones que realiza el conjunto.

⁵ Riba Romeva Carles, Diseño Concurrente, Ediciones UPC, España, 2002; pág. 136.

K= factor de conveniencia.

$$C_f = \frac{K}{f} \cdot \sqrt[3]{N_p \cdot N_t \cdot N_i} \quad (\text{Ec.1.1})$$

Para una misma máquina f siempre es el mismo, por tanto tenemos:

$$C_f = \sqrt[3]{N_p \cdot N_t \cdot N_i} \quad (\text{Ec.1.2})$$

1.6.2 DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN

Este principio analiza el óptimo número de piezas para desarrollar las funciones del equipo, ya que el número de componentes influyen en el ensamble, fabricación, logística, almacenaje, documentación y mantenimiento, lo cual repercute en la productividad.

El diseño de fabricación considera los siguientes aspectos:

- Decidir que componentes se va a fabricar en la empresa y cuales se subcontrata.
- Cuales métodos de fabricación conocidos implanta en el proceso.
- Alcanzar las especificaciones requeridas de los componentes mediante programas de fabricación virtual y de simulación.
- Reducir la complejidad.
- Incrementar la compatibilidad.
- Buscar la estandarización.
- Buscar la robustez del diseño para asegurar la calidad.
- Optimizar la eficacia en el uso de los materiales y en las operaciones.
- Realizar guías de referencias, ya que estas orientan el diseño, en las etapas que tienen mayor incidencia (D = diseño; U = utillaje; P = proceso;

M = mecanizado posterior) y los efectos en los que tienen más repercusión (C = coste; Q = calidad):

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Procurar formar cuerpos sencillos de fácil desmoldeo, a ser posible sin la necesidad de noyos (o núcleos)	D, U	C
Prever los ángulos de desmoldeo, especialmente si las paredes son altas	D	Q
Evitar el descentrado de los noyos (o núcleos) y paredes de distinto grosor. Si es necesario, apoyar el noyos (o núcleos) por dos puntos	D, U, P	C, Q
Procurar en toda la pieza paredes aproximadamente del mismo grosor. En todo caso, las transiciones deben ser progresivas	D, P	Q
Evitar concentraciones de nervios en un mismo punto	P	Q
Facilitar el mecanizado por medio de resaltes en las zonas que deban mecanizarse	M	C
Orientar correctamente las superficies a mecanizar en relación a las herramientas (dirección de las brocas, de las fresas)	M	C, Q

Tabla 0.2 *Guía de diseño para piezas fundidas.*⁶

- Asociar las piezas de fabricación en familias, las cuales a pesar de ser diferentes presentan similitudes o atributos, permitiendo una mayor eficacia en la producción.
- Organizar el taller mecánico por grupos de máquinas que intervienen en la fabricación de las principales familias de piezas.
- Codificar y clasificar las piezas.

1.6.3 DISEÑO PARA EL MONTAJE

Se define como el conjunto de procedimientos (manipulación, unión, ajuste, y verificación) de piezas y componentes, alcanzando la contextura final y desempeñando su funcionalidad.

Entre los aspectos que se debe considerar en el diseño de montaje tenemos⁷:

⁶ Riba Romeva Carles, *Diseño Concurrente*, Ediciones UPC, España, 2002; pág. 144.

⁷ *Idem* 6; pág. 153.

a) Manipulación de piezas y componentes:

- Reconocimiento de una pieza o componente.
- Determinación de la zona de manipulación.
- Realización de la operación de manipulación.
- Movimientos de posicionamiento y de orientación.

b) Composición de piezas y de componentes:

- Unión de piezas.
- Inserción (eje en un alojamiento, corredera en una guía).
- Colocación de cables y conducciones.
- Llenado de recipientes y depósitos (engrase, líquidos, gases)

c) Unión de piezas y de componentes:

- Uniones desmontables (roscadas, pasadores, chavetas).
- Encaje por fuerza (calado de piezas, unión elástica).
- Uniones por deformación (remaches, rebordonado).
- Uniones permanentes (soldadura, encolado).

d) Operaciones de ajuste:

- Mejora de piezas (rebabas, lima, ajuste por deformación).
- Operaciones de ajuste mecánico (conos, micro ruptores).
- Operaciones de ajuste eléctrico (potenciómetros, condensadores).

e) Operaciones de verificación:

- Puesta a punto (regulaciones, inicialización informática).

- Verificación de la funcionalidad del producto. El diseño de fabricación.

1.6.3.1 Métodos de evaluación de la facilidad del montaje

Para la evaluación de la facilidad de montaje existen dos métodos:

a. Disminución del número de piezas

Para disminuir el número de piezas, se hacen tres preguntas básicas como se indica en la figura.

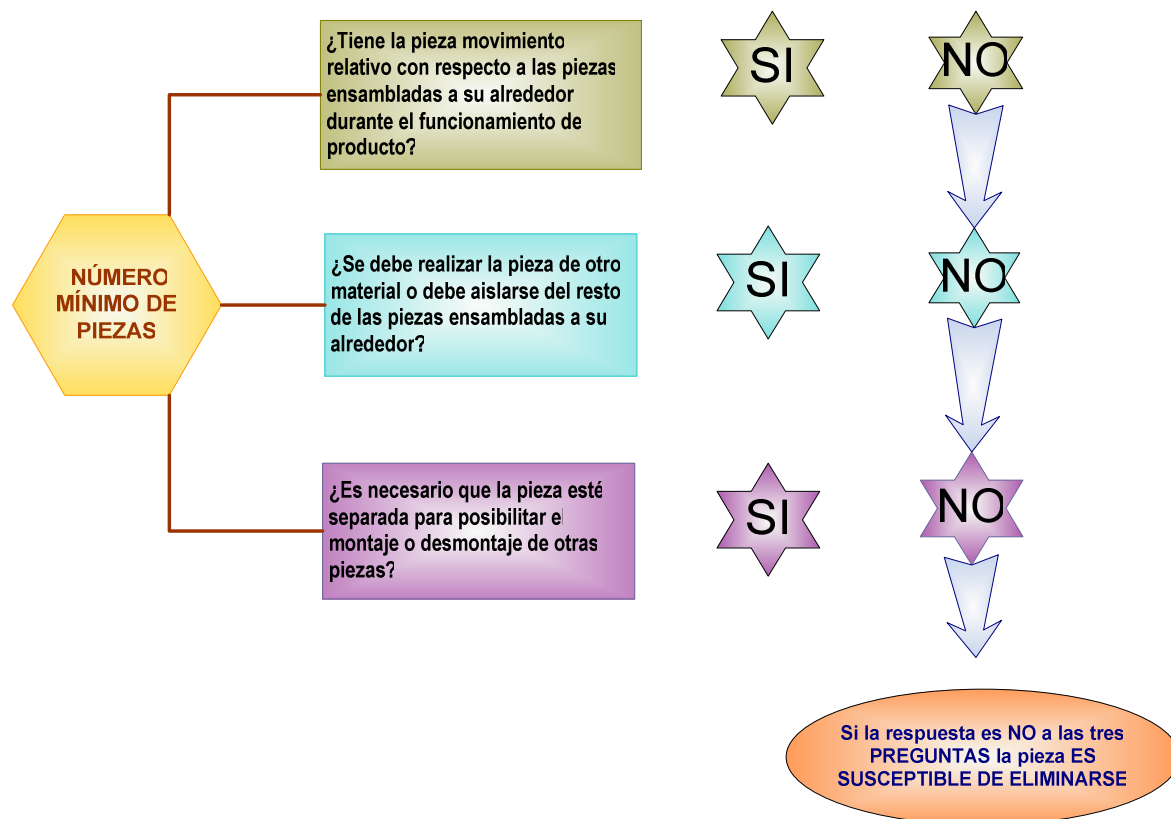


Figura 0.12 Método de la disminución del número de piezas.

b. Método de Boothroyd & Dewhurst

Establece el análisis del montaje por medio del índice de eficiencia de ensamblaje de un producto⁸.

Permite comparar entre sí diferentes alternativas de diseño y evaluar cuantitativamente su dificultad de ensamblaje.

⁸ Riba Romeva Carles, Diseño Concurrente, Ediciones UPC, España, 2002; pág. 144.

$$E_{ma} = \frac{N_{\min} \cdot t_a}{t_{ma}} \quad (\text{Ec.1.3})$$

Donde:

E_{ma} = índice de eficiencia de ensamblaje de un producto.

N_{\min} = número mínimo de piezas necesario.

t_a = tiempo de montaje de una pieza (3 sg).

t_{ma} = tiempo estimado para el montaje del producto real.

1.6.3.2 Reducción del costo de montaje

El principal objetivo que busca el diseño para el montaje es disminuir el costo del producto, reduciendo el número de piezas a ensamblar y por ende aumentando su calidad.

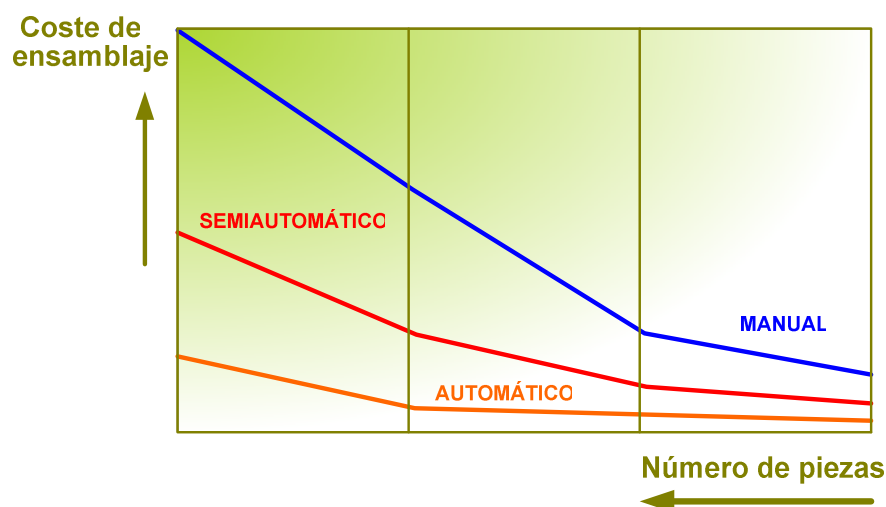


Figura 0.13 Costo de ensamblaje.⁹

1.6.3.3 Limitaciones del diseño de montaje

Entre las principales dificultades que presenta el diseño de montaje tenemos¹⁰:

- La flexibilidad de los talleres de fabricación y de los sistemas de montaje.

⁹ Riba Romeva Carles, Diseño Concurrente, Ediciones UPC, España, 2002; pág. 165.

¹⁰ Salvador Capuz Rizo, Introducción al Proyecto de Producción, Alfaomega, México, 2001; pág. 196.

- El flujo de materiales y la forma que han sido concebido y organizado.
- El nivel de automatización del proceso y de los sistemas de montaje.

1.6.3.4 Recomendaciones en el diseño para el montaje

Entre las principales recomendaciones tenemos:

- Estructura modular.
- Disminuir la complejidad.
- Establecer un elemento base que sirva de referencia a las demás piezas y componentes.
- Restringir al mínimo las direcciones de montaje.
- Facilitar la composición.
- Reducir al máximo las uniones.

1.6.4 DISEÑO PARA LA CALIDAD

Por medio de este diseño se asegura que en la definición de un producto o servicio se han considerado las necesidades y requerimientos del cliente. Nos permite planificar la calidad durante todo el ciclo de vida de un producto.

Para mejorar la calidad en los productos se requiere de nuevas organizaciones y métodos de gestión que se ven reflejados en:

- Hacer el trabajo bien desde el inicio y una sola vez
- Evitar y reducir los costos inútiles
- Anticiparse a los fallos mediante acciones preventivas.
- Asegurar que el producto garantice los requerimientos y necesidades de los usuarios.

- Establecer criterios y parámetros adecuados para obtener un diseño robusto del producto.
- Reducir los errores en la producción.

La aplicación del diseño para la calidad se realiza por medio de las técnicas de Taguchi y las metodologías para mejorar la calidad, y es lo que se conoce como DISEÑO ROBUSTO.

En la siguiente figura se relaciona el diseño robusto y las fases del desarrollo del producto.

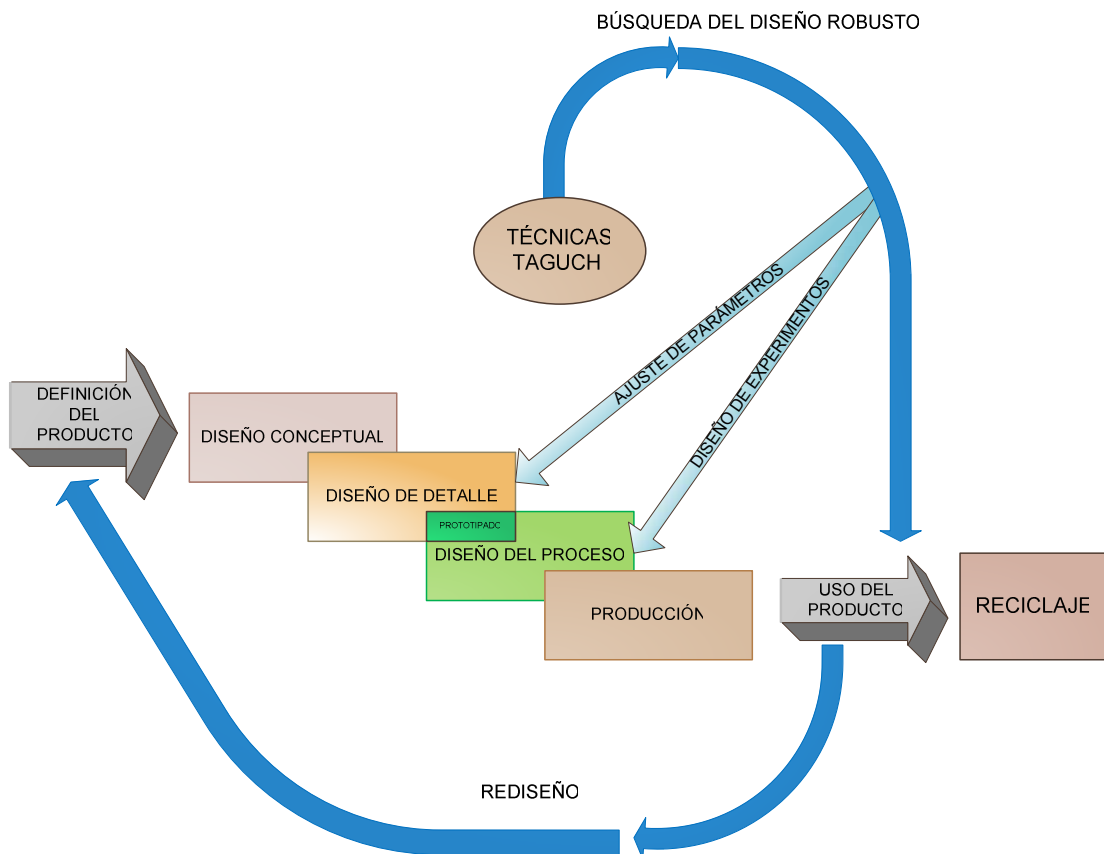


Figura 0.14 *El Diseño Robusto en el Desarrollo de Productos.*¹¹

¹¹ Salvador Capuz Rizo, Introducción al Proyecto de Producción, Alfaomega, México, 2001; pág.180.

1.6.4.1 Metodologías para Mejorar la Calidad

Actualmente existen metodologías que se han desarrollado para mejorar la calidad en el diseño y ciclo de vida de un producto. En el presente proyecto se desarrollaran tres técnicas principales que son:

- a. Desarrollo de la función de la calidad QFD
- b. Diseño de experimentos
- c. Análisis de modos de fallo y sus efectos

1.6.4.1.1 *Diseño de la función de la calidad QFD*

Es un procedimiento sistemático y estructurado que permite transformar las necesidades del cliente en las especificaciones iniciales para diseñar un producto, por medio de equipos multidisciplinarios.

Esta metodología fue desarrollada en Japón a finales de los setenta, y debemos contar con los siguientes requerimientos¹²:

- Tener amplios conocimientos del producto, de las tecnologías, de los procesos de producción y del mercado.
- Un equipo multidisciplinario
- Contemplar todas las funciones implicadas en el ciclo de vida del producto.
- Contar con la presencia del cliente en las etapas iniciales.

Con la aplicación del Diseño de la función de la Calidad se logra las siguientes ventajas:

- Reducción del tiempo de desarrollo de productos hasta un 50%.
- Reducción de problemas iniciales de diseño
- Clientes más satisfechos y mayores ventas.

¹² Sanz Félix y Lafargue José, Diseño Industrial, Thompson Editores, España, 2002; pág. 76.

- Definición consistente del producto.
- Eliminación de procesos que no añaden valor al producto.
- Aumento de la productividad.

Fases del Diseño de la función de la Calidad

Las fases del desarrollo de un producto se representan por medio de matrices, cuyas características contribuyen para establecer las especificaciones de entrada a la matriz siguiente, en secuencia:

- Fase 0. Identificación de los clientes potenciales
- Fase I. Determinación de las expectativas del cliente
- Fase II. Definición del producto
- Fase III. Definición de los componentes
- Fase IV. Definición del proceso de producción
- Fase V. Organización de la producción

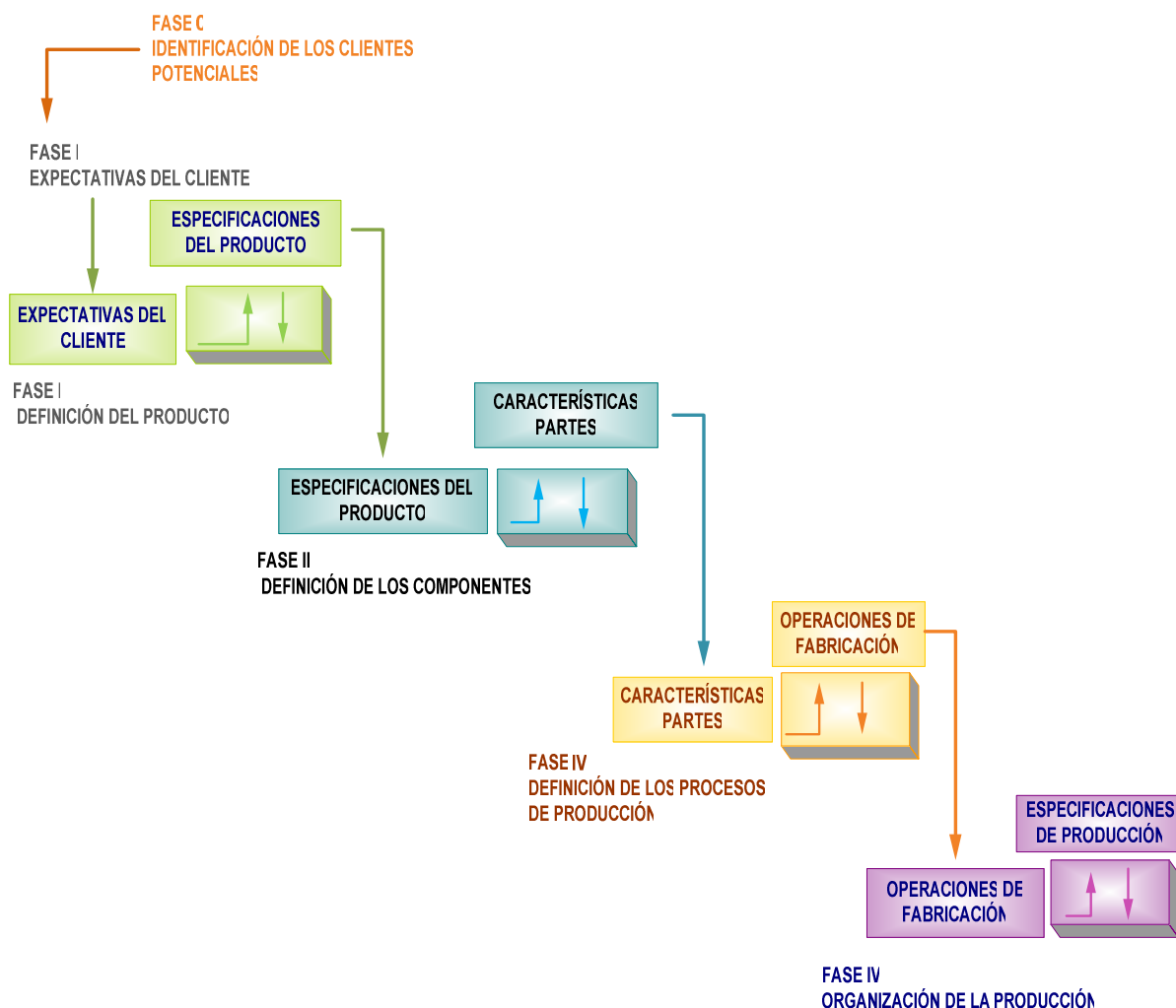


Figura 0.15 *Matrices y fases del desarrollo de la función de la calidad.*¹³

Puede tener hasta seis niveles sucesivos de la fase 0 a 5 dependiendo de los objetos de diseño.

En la fase II de definición del producto se establece la casa de la calidad, la misma que interpreta las necesidades de los usuarios en especificaciones y requerimientos técnicos del producto. Para su realización se deben seguir los siguientes pasos:

- Identificación de las necesidades del cliente (“qué” y “cómo”)
- Relación entre los “qué” y “cómo”, si es una relación fuerte 9 puntos, relación media 3 puntos, relación débil 1 punto y sin relación 0 puntos.

¹³ Salvador Capuz Rizo, Introducción al Proyecto de Producción, Alfaomega, México, 2001; pág. 156.

- c. Jerarquización de los “cómos”, mediante la multiplicación de la relación por el peso relativo de los qué y sumando por columnas.
- d. Correlaciones entre los “cómos”.
- e. Establecer los objetivos de diseño.
- f. Comparación con la competencia.
- g. Informaciones adicionales de la matriz.

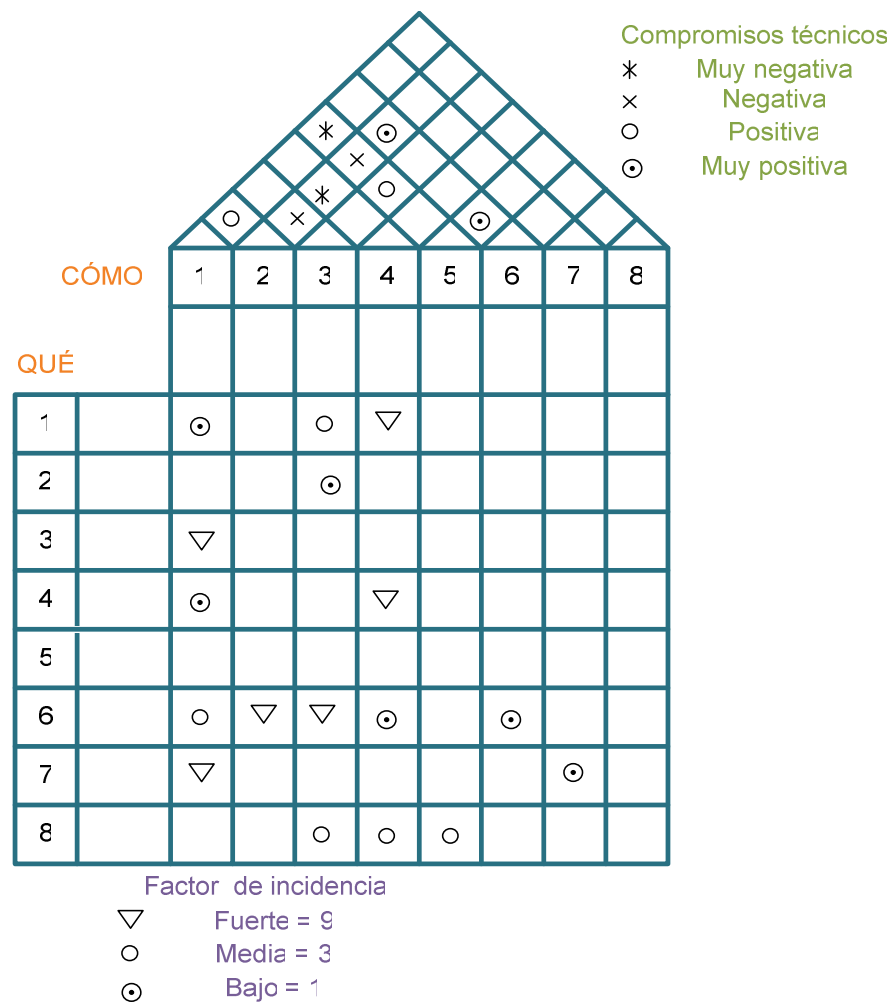


Figura 0.16 Casa de la calidad.¹⁴

¹⁴ Salvador Capuz Rizo, Introducción al Proyecto de Producción, Alfaomega, México, 2001; pág. 162.

1.6.4.1.2 Diseño para experimentos

En esta etapa se analiza la correlación (análisis de sensibilidad) entre las variables del proceso (factores controlables) y las prestaciones del sistema. Al evaluar la calidad o eficiencia de un producto se determina algunos aspectos a corto plazo, como rendimiento del proceso, peso del paquete, pureza, dimensiones de la pieza, etc. Mientras a largo plazo los aspectos son vida del producto, índices de deterioro, tiempo entre fallas, etc.

Se consideran las siguientes fases para el diseño para experimentos:

- a) Mediante diagramas Ishikawa, Brainstorming o QFD se desarrollan las causas de fallo.
- b) Se debe realizar un estudio de las causas incontrolables y controlables que puedan insensibilizar al producto. Por medio de técnicas como FMEA (Análisis Modal de Fallos y Efectos) y FTA (Análisis de Fallos en árbol).
- c) Se realizan experimentos para evaluar las características de los productos. Entre los métodos experimentales tenemos:

- **El método ANOVA.-** los elementos que intervienen comprenden un plan aleatorio estructurado para eliminar posibles inconsistencias y reducir al máximo tendencias provenientes de variables controladas y no controladas¹⁵.
- **Experimentos de un solo factor.-** se define a un sistema de factor único, obteniendo una respuesta. Por este método se analiza medianas y varianzas que enuncie acuerdo con el método ANOVA.
- **Efectos fijos.-** es adecuado para desarrollar una interferencia en un conjunto pequeño de niveles de factor específicamente elegidos.
- **Efectos aleatorios.-** se utiliza para estimar componentes de la variación.

¹⁵ Hodson K William, Manual del Ingeniero Industrial, Mc. Graw Hill, Tomo II, México, 1996; pág. 11.75

- **Diseño por bloques.-** presenta limitaciones al hallar estratificaciones por bloque, para experimentar de manera aleatoria dentro de cada bloque.
- **Técnicas de Taguchi.-** es el concepto de diseño robusto que muestra una variación en las condiciones del entorno y reduce los efectos sobre sus prestaciones. La filosofía de Taguchi para quien la calidad de un producto es la (mínima) pérdida que en el mismo causa a la sociedad desde que es fabricado hasta su retiro¹⁶. Entre los fundamentos de Taguchi:
 - ✓ Pérdida a la sociedad.
 - ✓ Función de pérdidas.
 - ✓ Valor medio de la función de pérdidas.

1.6.4.1.3 Análisis de modos de fallo y sus efectos

El AMFE o Análisis Modal de Fallos y Efectos es un método dirigido a lograr el Aseguramiento de la Calidad, que mediante el análisis sistemático, contribuye a identificar y prevenir los modos de fallo, tanto de un producto como de un proceso, evaluando su gravedad, ocurrencia y detección, mediante los cuales, se calculará el Número de Prioridad de Riesgo, para priorizar las causas, sobre las cuales habrá que actuar para evitar que se presenten dichos modos de fallo. Es una metodología orientada a maximizar la satisfacción del cliente mediante la reducción o eliminación de los problemas potenciales o conocidos.

Por el método AMFE se alcanza objetivos como:

- Satisfacer al cliente
- Introducir en las empresas la filosofía de la prevención

¹⁶ Salvador Capuz Rizo, Introducción al Proyecto de Producción, Alfaomega, México, 2001; pág. 179.

- Identificar los modos de fallo que tienen consecuencias importantes respecto a diferentes criterios: disponibilidad, seguridad, etc.
- Precisar para cada modo de fallo los medios y procedimientos de detección
- Adoptar acciones correctoras y/o preventivas, de forma que se supriman las causas de fallo del producto, en diseño o proceso
- Valorar la eficacia de las acciones tomadas y ayudar a documentar el proceso

Las actividades que se deben desarrollar para el método AMFE son:

- Determinar los modos de fallo.
- Determinar los efectos de las fallas en el cliente.
- Identificar causas potenciales de cada modo de falla.
- Enlistar los controles actuales para cada causa o modo de falla.
- A cada causa asignar severidad, ocurrencia y detección de acuerdo a la escala escogida.
- Calcular el Número de Prioridad de Riesgo (NPR o RPN en inglés) para cada Causa.

$$\text{NPR} = \text{severidad} \times \text{ocurrencia} \times \text{detección} \quad (\text{Ec.1.4})$$

- Determinar las acciones recomendadas para reducir los altos NPR's.
- Tomar las acciones apropiadas y recalculando NPR's.

Para la determinación del fallo se utilizan tres factores como lo son:

- **Ocurrencia:** frecuencia de fallos

Criterio	Valor de O
Muy escasa probabilidad de ocurrencia. Defecto inexistente en el pasado	1
Escasa probabilidad de ocurrencia. Muy pocos fallos en circunstancias pasadas similares	2-3
Moderada probabilidad de ocurrencia. Defecto aparecido ocasionalmente	4-5
Frecuente probabilidad de ocurrencia. En circunstancias similares anteriores el fallo se ha presentado con cierta frecuencia	6-7
Elevada probabilidad de ocurrencia. El fallo se ha presentado frecuentemente en el pasado	8-9
Muy elevada probabilidad de fallo. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente	10

Tabla 0.3 *Clasificación según la Probabilidad de ocurrencia.*¹⁷

- **Severidad:** seriedad del fallo

Criterio	Valor de S
Infima. El defecto sería imperceptible por el usuario	1
Escasa. El cliente puede notar un fallo menor, pero sólo provoca una ligera molestia	2-3
Baja. El cliente nota el fallo y le produce cierto enojo	4-5
Moderada. El fallo produce disgusto e insatisfacción el cliente	6-7
Elevada. El fallo es crítico, originando un alto grado de insatisfacción en el cliente	8-9
Muy elevada. El fallo implica problemas de seguridad o de no conformidad con los reglamentos en vigor	10

Tabla 0.4 *Clasificación según Gravedad o Severidad de fallo.*¹⁸

¹⁷ www.eneotecnologia.com

¹⁸ Idem 17.

- **Detectabilidad:** Si es fácil o difícil detectar el fallo

Criterio	Valor de D
Muy escasa. El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes.	1
Escasa. El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría raramente escapar a algún control primario, pero sería posteriormente detectado	2-3
Moderada. El defecto es una característica de bastante fácil detección	4-5
Frecuente. Defectos de difícil detección que con relativa frecuencia llegan al cliente	6-7
Elevada. El defecto es de naturaleza tal, que su detección es relativamente improbable mediante los procedimientos convencionales de control y ensayo	8-9
Muy elevada. El defecto con mucha probabilidad llegará al cliente, por ser muy difícil detectable	10

Tabla 0.5 *Clasificación según la Probabilidad de no detección.*¹⁹

1.6.5 DISEÑO PARA EL ENTORNO

La optimización del uso de los productos, la dificultad de la eliminación de desechos, la reducción del impacto ambiental, además de la relación hombre – máquina son factores que actualmente juegan un rol significativo para el desarrollo eficiente de un proyecto, por lo que deben ser considerados en el diseño de un producto.

1.6.5.1 Diseño y ergonomía

La ergonomía es la ciencia que estudia cuantitativa y cualitativamente, las condiciones de trabajo en la empresa, y tiene por objeto, a su vez, el establecimiento de técnicas que conducen a una mejora de la productividad y de la integración en el puesto de trabajo de los productos directos, etimológicamente procede de los términos griegos ergon (trabajo) y nomos (norma)²⁰.

¹⁹ www.eneotecnologia.com

²⁰ Sanz Félix y Lafargue José, *Diseño Industrial*, Thompson Editores, España, 2002; pág. 89.

Los condicionantes impuestos por los factores del entorno en la actividad humana son:

- Carga física
- Carga mental
- Factores ambientales (iluminación, ruido y temperatura).

Existe una variedad de normas concernientes a la ergonomía, entre las principales tenemos:

- ISO 6385: Principios ergonómicos en el diseño de los sistemas de trabajo.
- ANSI B 11 TR -1-1993: Guías ergonómicas para el diseño , instalaciones y uso de máquinas y herramientas
- ANSI Z-365: Control del trabajo relacionado con alteraciones del trauma acumulativo.



Figura 0.17 Consideraciones ergonómicas al diseñar²¹

²¹ Mondelo P. y Gregori E., Ergonomía 1 Fundamentos, Ediciones UPC, España, 1999; pág. 22.

Para que un proyecto sea factible debe tener presente en su diseño los conceptos de ergonomía, tales como:

a. Antropometría

La antropometría describe las diferencias cuantitativas de las medidas del cuerpo humano, estudia las dimensiones tomando como referencia las distintas estructuras anatómicas.

Sirve de herramienta a la ergonomía para adaptar el entorno a las personas.

b. Interacción persona – máquina

Tenemos tres tipos de interacciones, la primera es la interacción manual en la cual el usuario aporta con energía al funcionamiento del producto; la segunda es la interacción mecánica donde el aporte de energía por parte del usuario es limitado y la tercera es la interacción automática, en esta el usuario solo es encargado de la programación y mantenimiento.

c. Comunicación y mando

Para que exista una relación adecuada de las personas con el entorno se debe disponer de sistemas de comunicación y mando como lo son:

- Sistemas y dispositivos visuales
- Sistemas y dispositivos sonoros
- Sistemas y dispositivos táctiles

Para un diseño correcto de un producto se debe integrar la modelización y simulación ergonómica que evalúan posturas, manipulación de cargas y visualización de pantallas.

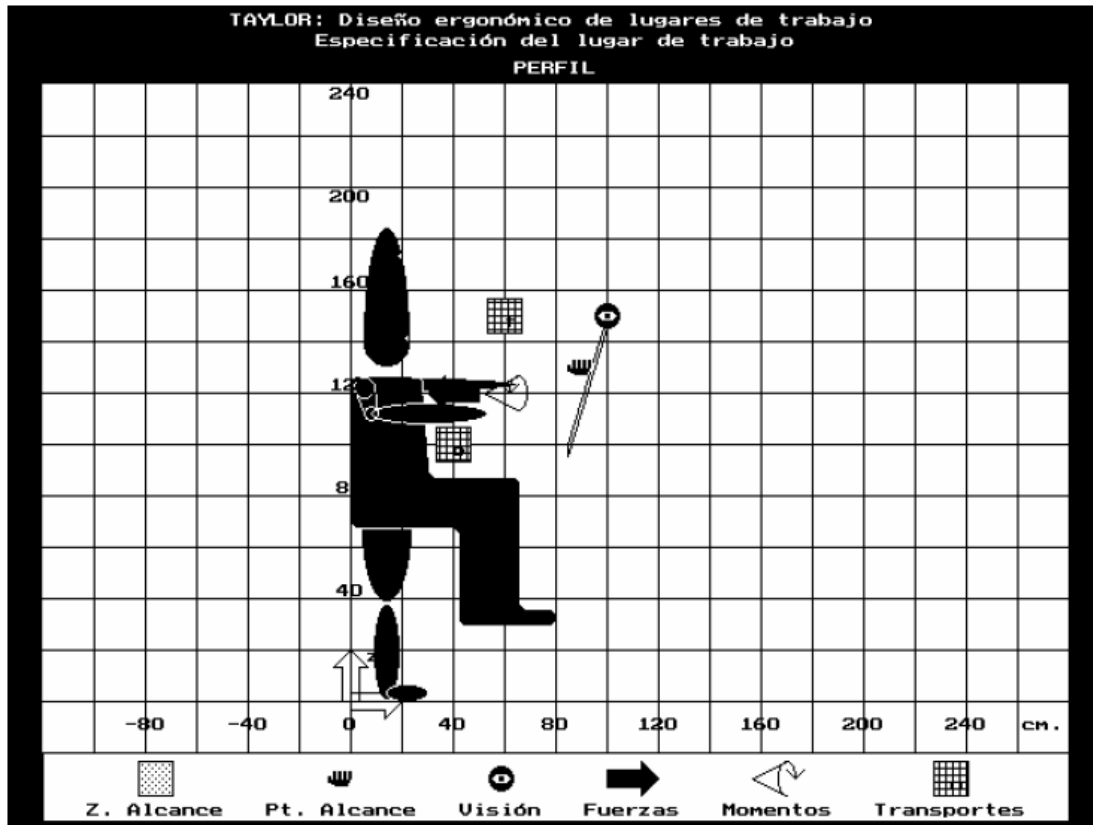


Figura 0.18 *Simulación ergonómica*²²

1.6.5.2 Diseño y disponibilidad

Un producto tiene disponibilidad cuando es capaz de funcionar o estar listo para hacerlo en cualquier momento.

La disponibilidad abarca la fiabilidad y mantenibilidad de un producto.

- **Fiabilidad**

La fiabilidad es factor indispensable en el diseño ya que si no alcanza con los niveles apropiados será necesario rediseñar el producto.

La fiabilidad se incrementa cuando tenemos el número mínimo de elementos en el sistema necesario para su correcto funcionamiento.

²² Mondelo P. y Gregori E., Ergonomía 3 Puestos de Trabajo, Ediciones UPC, España, 1999; pág. 33.

- **Mantenibilidad**

El mantenimiento representa un alto porcentaje en el coste total a lo largo de la vida de un producto, es por eso que en diseño se debe tener en cuenta los siguientes parámetros como la facilidad de desmontaje y montaje y el evitar uniones complejas.

1.6.5.3 Seguridad en las máquinas

En los procesos y productos industriales normalmente se presentan accidentes laborales donde en la mayoría de los casos intervienen el personal humano.

Toda persona o institución que realiza procesos industriales adquieren obligaciones que garanticen la seguridad de su equipo y personal, mediante normas o reglamentos se establece el sistema de gestión de salud y seguridad.

La incorporación de esta etapa debe ser implantada en el inicio del ciclo de vida del producto. Las especificaciones de salud y seguridad deben ser asociadas a las especificaciones del producto.

Entre los métodos de análisis de riesgo y mejora de la seguridad tenemos:

- a. Análisis preliminar de riesgos (PHA Preliminary Hazard Analysis).
- b. Análisis de riesgos y de funcionamiento (HAZOP Hazard and Operability Analysis)
- c. Revisión de la seguridad en el diseño (SDR Safety Design Review).

1.6.5.4 Impactos ambientales y fin de vida

El diseño adecuado de un producto en la actualidad busca reducir los impactos medioambientales durante todo su ciclo de vida al máximo, mediante acciones como:

- Controlar los consumos de energía
- Reducir y evitar las emisiones a la atmósfera
- No contaminar las aguas

- Evitar las radiaciones
- Reutilizar y reciclar

Dentro del proceso de diseño se definen parámetros para minimizar la producción de desechos al fin de vida del producto y se realiza diferentes procesos tales como:

a. Reutilización

Es la acción de proporcionarles un nuevo uso a determinadas partes de un producto, con lo cual se obtiene los siguientes beneficios:

- Reducción de residuos y espacios para depositar los desechos.
- Con la reutilización de una parte de un producto se obtiene ahorros en la energía.
- Reducción de los costos de compra de componentes.

b. Reciclaje

Son aquellas actividades por medio de las cuales se el productos, sus partes o sus materias primas empiezan un nuevo ciclo de utilización.

Con el reciclaje se logra que el ciclo de vida de un producto sea un bucle cerrado, ahorrando recursos naturales y generando menos residuos.

c. Recuperación de energía

Es la acción de obtener el contenido energético de un producto por medio de su combustión.

CAPÍTULO 2

DISEÑO ROBUSTO

El objetivo de este capítulo es describir una de las herramientas esenciales de la Ingeniería Concurrente como es el Diseño Robusto, en base al cual se realiza la aplicación en el presente proyecto.

1.7 CONCEPTO DEL DISEÑO ROBUSTO

El diseño robusto se basa en especificar los valores para los parámetros de diseño, lo cual implica establecer tolerancias que conlleven a una mayor facilidad en la línea de producción, para que el producto funcione correctamente aunque existan factores de distorsión.

El objetivo de desarrollar el diseño robusto es mantener las características de calidad con un nivel mínimo de variabilidad. La variabilidad en el nivel de calidad es atribuida a factores externos (temperatura ambiental, humedad, etc.), factores internos (deterioro, entre otros) y factores de producción (capacidad de los procesos de fabricación).

Las características esenciales del diseño robusto son:

- La variación afecta negativamente a la calidad.
- Optimización en los datos
- Experimentación
- Inducción de desviaciones
- Análisis de datos y pronósticos
- Interacciones y comprobaciones.

Las ideas de conseguir la calidad en las etapas de diseño, utilizando técnicas experimentales para conseguir productos robustos, se deben al ingeniero japonés Genichi Taguchi.

Para el Dr. Taguchi, la calidad de un producto decrece en la medida en que los valores de sus características funcionales se alejan de los valores objetivos. Esta variabilidad con respecto a los valores objetivos es el principal enemigo de la calidad y el momento más adecuado para combatirla es en las fases tempranas del diseño.

El diseño robusto combina métodos estadísticos y de ingeniería para optimizar los procesos de diseño y fabricación de modo que aumente la calidad y se reduzcan los costos de los productos.

1.8 FUNDAMENTOS DE LAS TÉCNICAS DE TAGUCHI

Para entender de mejor manera la perspectiva de las técnicas de Taguchi es necesario conocer los conceptos de: pérdidas a la sociedad, función de pérdidas y valor medio de la función de pérdidas.

1.8.1 PÉRDIDAS A LA SOCIEDAD

Para Taguchi cualquier producto que se aleje por defecto de su valor ideal presenta una pérdida de valor a la sociedad, se refleja en costos medioambientales, factores como la insatisfacción del cliente, costos debido a garantías, mala imagen de la empresa y por ende pérdida de mercado.

El cliente no satisfecho puede reclamar una compensación económica porque el producto no cumple con las especificaciones de calidad, implicando pérdidas económicas que son directamente proporcionales a la desviación cuadrática de la característica de la calidad respecto a su valor nominal u objeto²³.

Las fuentes de pérdidas son:

- Consumo de energía

²³ Prat/Tort/Grima/Pozueta, Métodos Estadísticos Control y Mejora de la Calidad, Ediciones UPC, España, 1999; pág. 224.

- Mínima esperanza de vida
- Incremento de costos en mantenimiento y fiabilidad
- Necesidad de espacio o volumen ocupado
- Tiempo de colocación o preparación.

1.8.2 FUNCIÓN DE PÉRDIDAS

El objetivo de la función de pérdida es evaluar cuantitativamente la pérdida de calidad debido a variaciones funcionales.

La representación cuadrática de la función de pérdida, es una forma eficiente y efectiva para establecer la pérdida debido a la desviación de una característica de calidad del valor nominal; esto es la pérdida debida a la mala calidad. Es importante tener en cuenta las siguientes características:

- Conformarse con los límites de especificación, es un indicador inadecuado de la calidad o pérdida debida a la mala calidad.
- La pérdida de calidad es causada por la insatisfacción del consumidor.
- La pérdida de calidad puede relacionarse con las características del producto.
- La pérdida de calidad es una pérdida financiera.
- La función de pérdida es una herramienta para evaluar la pérdida en la etapa inicial del desarrollo del producto.

Una manera tradicional de interpretar una especificación es que cualquier pieza con medición entre el límite inferior de especificación (*LIE*) y el límite superior de especificación (*LSE*) es igual de buena, mientras que cualquier pieza que esté por fuera de este rango se considera totalmente mala y es rechazada, esto se muestra en la siguiente figura:

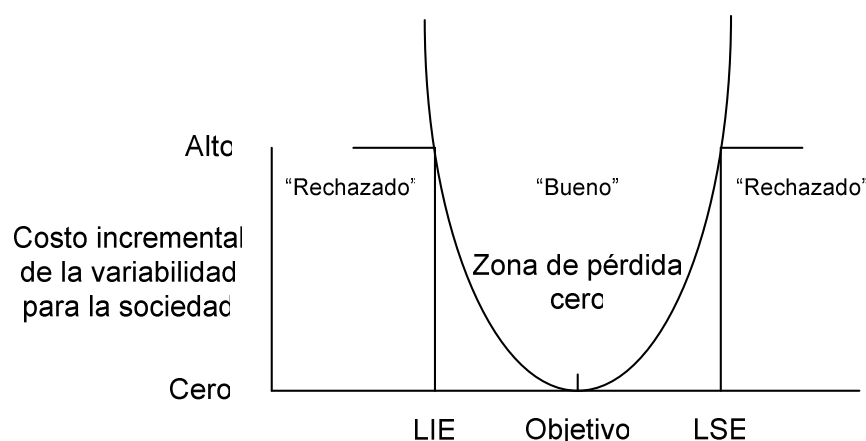


Figura 0.1 *Función de pérdida de calidad.*

La función de pérdida vale cero cuando el desvío con respecto al parámetro objetivo es nulo y se incrementa cuadráticamente cuando los valores de los productos fabricados se acercan a los límites de tolerancia. En otras palabras, los productos cercanos a los límites de tolerancia son productos casi defectuosos y se deben trabajar para reducir la variabilidad de sus procesos de producción.

La función de pérdida se define como²⁴:

$$L(y) = k(y - T)^2 \quad (\text{Ec.2.1})$$

Donde:

- $L(y)$ = indica la pérdida (en unidades monetarias) que sufre la sociedad.
- k = constante específica de cada caso considerado.
- T = valor objetivo que la dimensión de interés debe tener (T mide la calidad nominal o de diseño)
- y = valor de la característica cuantitativa de calidad considerada.

²⁴ Prat/Tort/Grima/Pozueta, Métodos Estadísticos Control y Mejora de la Calidad, Ediciones UPC, España, 1999; pág. 239.

La pérdida para un proceso en conjunto, se obtiene promediando la calidad de diferentes unidades producidas. Esta calidad se obtiene hallando el valor medio de la función de pérdidas:

$$E(L) = k[(\mu - T)^2 + \sigma^2] \quad (\text{Ec.2.2})$$

Donde:

- $E(L)$ = valor medio de la función de pérdidas
- σ = desviación típica que presenta la característica una vez está en manos del cliente.
- μ = media que presenta la característica una vez está en manos del cliente.

Existen tres casos generales de funciones de pérdidas que pueden ser aplicados a la calidad de un producto como se muestra en la tabla siguiente:

<i>Características</i>	<i>Pérdida individual/pieza</i>	<i>Pérdida promedio/pieza</i>
Nominal es mejor	$k(y - T)^2$	$k[(\mu - T)^2 + \sigma^2]$
Inferior es mejor	$k(y)^2$	$k[\mu^2 + \sigma^2]$
Más alto es mejor	$k\left(\frac{1}{y^2}\right)$	$k\left(\frac{1}{y^2}\right)\left[1 + \left(\frac{3\sigma^2}{\mu^2}\right)\right]$

Tabla 0.1 *Funciones de pérdidas de Taguchi.*

Ejemplo de Aplicación:

Suponga que un servicio de paquetería promete entregar a las 10 de la mañana. Un retraso de más de dos horas de la hora prometida es inaceptable para los clientes y por política de la empresa si la hora de entrega no se cumple debe compensar al cliente con un abono de \$10, dependiendo del retardo. La constante K en la función de pérdida es entonces:

$$L = K (y-T)^2$$

$$10.0 = K (2 - 0)^2$$

$$K = 10/2^2 = \$2.5 \text{ por hora al cuadrado}$$

El costo de controlar el proceso de entrega (por entrega) decrece conforme se permita una desviación mayor del objetivo de entrega planteado. La empresa estima que el costo del proceso (PC) es alto cuando no se permite una desviación del objetivo (\$20 por entrega) pero decrece con la desviación según la función lineal:

$$PC = A - B (y - T) = 20 - 5(y - T)$$

El costo total en función de la variable de calidad y es entonces la suma del costo de penalidad y el costo del proceso.

$$20 - 5(y - 0) + 2.5(y - 0)^2$$

El punto y donde se minimiza el costo total:

$$y = B/2K = 5/2 \times 2.5 = 1 \text{ hora}$$

La empresa debe ajustar su proceso de servicio de manera de no permitir una desviación del objetivo mayor a una hora.

1.8.2.1 Medición de la Robustez

Diseño robusto es un proceso para optimizar. La robustez se mide por medio de la relación Señal/Ruido (S/R), la cual proporciona una medida de como acercar el diseño al óptimo funcionamiento de un producto o proceso.

Si mejoramos la variabilidad, la linealidad y la sensibilidad entonces incrementamos la relación señal/ruido.

$$S/R = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía perdida}} \quad (\text{Ec.2.3})$$

(energía transformada en otras cosas)

1.9 TÉCNICAS DE TAGUCHI

Taguchi propone una filosofía de la ingeniería de calidad fuera de línea que se centra en la investigación y desarrollo de productos, para lo cual define tres etapas consecutivas para la optimización de productos: Diseño del sistema, Diseño de parámetros y Diseño de tolerancias.

1.9.1 DISEÑO DEL SISTEMA

Es la etapa inicial en la que se desarrolla un prototipo del producto, mediante la aplicación del conocimiento científico-técnico.

Durante el diseño del sistema, se realiza la selección de materiales, equipos y valores preliminares de los parámetros del producto y del proceso.

El objetivo de esta fase es encontrar el sistema que cumpla con las funciones de calidad, pero a la vez sea el más sencillo y económico que funcione bajo ciertas condiciones. Además se debe comprender las necesidades del cliente y el entorno de fabricación de la tecnología adoptada.

Una herramienta útil para desarrollar esta primera etapa es el Desarrollo de la Función de la Calidad (QFD).

1.9.2 DISEÑO DE PARÁMETROS

El diseño de parámetros busca optimizar a través de la experimentación el diseño funcional del producto, mejorando el desempeño y costo. Mediante este se analiza resultados, para determinar los mejores niveles de los factores o parámetros del diseño, con lo cual se alcanza productos con características de calidad con valores más cercanos al valor nominal y con mínima variabilidad en menor tiempo y costo, para poder alcanzar ventajas de rendimiento.

1.9.2.1 Factores controlables y factores de ruido

Taguchi establece que los factores que afectan al producto son:

Factores de control.- son los factores que el experimentador controla durante el diseño del producto, una vez establecidos permanecen constantes durante la vida

útil del producto tales como tipo de material, aislantes, dimensiones de las piezas, velocidad de los accionamientos, temperatura de los procesos, etc.

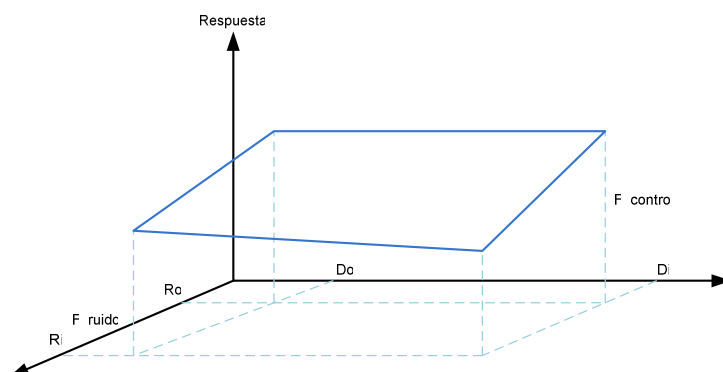
Factores ruido.- son los factores que el experimentador no puede controlar, afectan las características de calidad del producto sea en la fase inicial de la fabricación o en su etapa de funcionamiento. Estos pueden ser la temperatura ambiente en la fabricación, el conocimiento del operario en el proceso, la humedad relativa, el desgaste en las piezas, etc.

El fenómeno de la variabilidad es debido a la presencia del ruido externo y ruido interno. Los factores no controlables provocan la variabilidad y se transmite por los factores de control.

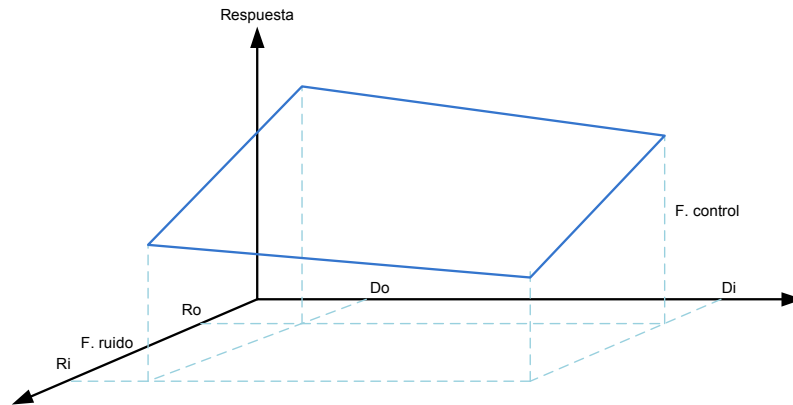
Se debe realizar estrategias de prevención, para evitar la presencia de la variabilidad si ocurre alguna de las dos circunstancias:

- a) *Ruido Externo.-* existen interacciones entre factores de control y factores ruido. Esto involucra que el factor ruido en la respuesta depende en el nivel en que se encuentre el factor de control.
- b) *Ruido Interno.-* la relación entre los factores de control y la respuesta no es lineal.

En las figuras siguientes se muestra un método de la selección de la matriz de diseño y la interpretación de los resultados:



La variabilidad transmitida por el factor R al cambiar de R_0 a R_1 es la misma para cualquier nivel de D



La variabilidad transmitida por el factor R es diferente dependiendo del nivel en que se encuentre el factor de diseño D

Figura 0.2 Variabilidad transmitida por un factor ruido R para diferentes niveles del factor de diseño D²⁵.

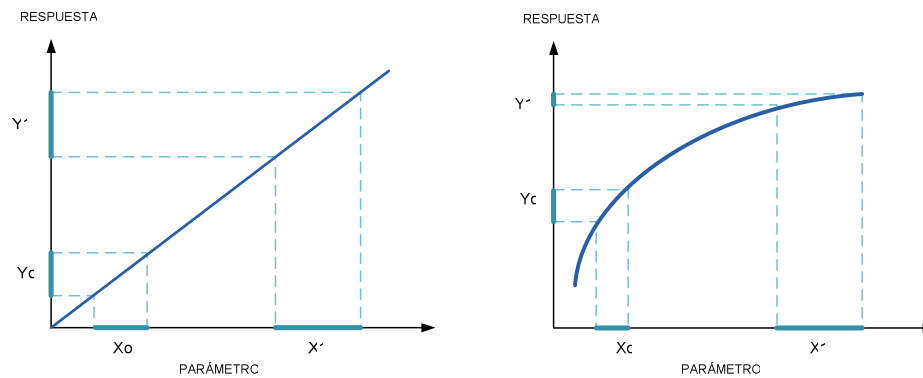


Figura 0.3 Relación lineal y no lineal entre los parámetros del producto y la característica de calidad²⁶.

En la siguiente figura se muestra los diferentes tipos de ruido que alejan la característica de su valor nominal.

²⁵ Prat/Tort/Grima/Pozueta, Métodos Estadísticos Control y Mejora de la Calidad, Ediciones UPC, España, 1999; pág. 250.

²⁶ Idem 25.

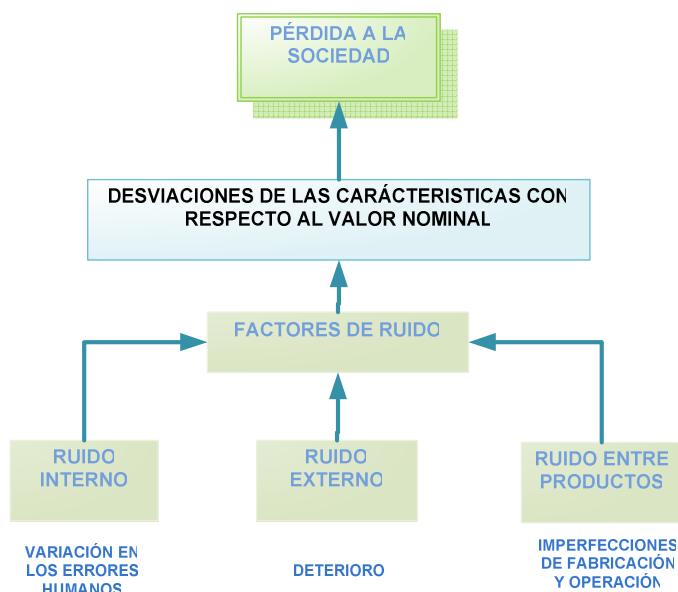


Figura 0.4 *Factores de ruido*

1.9.2.2 Proceso del Diseño de Experimentos

La determinación de parámetros se basa en la relación entre las variables del proceso y las prestaciones del producto, por lo que la experimentación permite obtener esta relación. Los pasos que se deben seguir en la realización de un experimento son:

1. Definir y declarar el problema

Establecer un listado de las posibles causas de defectos por medio de diagramas como Ishikawa o el QFD.

2. Escoger los factores y niveles

Seleccionar las causas incontrolables y controlables, utilizando métodos como el AMFE (Análisis Modal de Fallas y Efectos) y el Análisis Causa-Raíz. Además estableciendo las variables o factores y el número de valores o niveles que convienen que tomen estas variables.

3. Definición de las condiciones de los experimentos

Establecer el número de experimentos y las combinaciones de los niveles en cada uno de ellos por medio de la Matriz de Diseño

4. Escoger el diseño experimental

Establecer el método estadístico adecuado para la realización del diseño experimental.

5. Realizar el experimento

Estudiar las características de los productos y elaborar una muestra de los valores suficientes para obtener resultados válidos.

6. Obtención de la relación S/N

Dependiendo del objetivo que se busca, se escoge la expresión adecuada para el cálculo de S/N.

Características	Relación S/N	Términos
Nominal es mejor	$\theta(x) = -10 \log \frac{\overline{y^2}}{s^2}$	x = vector que representa una determinada combinación de niveles de los factores de diseño
Más bajo es mejor	$\theta(x) = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^r y_i^2 \right]$	y _i = respuesta en la condición i-ésima de la matriz externa. n = Número de condiciones experimentales de la matriz externa.
Más alto es mejor	$\theta(x) = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^r (1/y_i^2) \right]$	s ² = Varianza de las respuestas obtenidas en cada una de las condiciones experimentales definidas por la matriz externa, para un determinado valor de x.

Tabla 0.2 Relaciones señal ruido (S/N) de Taguchi²⁷.

7. Analizar los resultados

Los resultados se analizan por medio de análisis de varianza, el método tradicionalmente utilizado es el Análisis Estadístico de Varianza (ANOVA). Otro método es el de Taguchi el cual emplea técnicas gráficas donde representa la variación de S/N en función de los niveles establecidos para cada factor controlable y luego, la variación del parámetro a estudio en función de dichos niveles.

²⁷ Prat/Tort/Grima/Pozueta, Métodos Estadísticos Control y Mejora de la Calidad, Ediciones UPC, España, 1999; pág. 241.

8. Plantear conclusiones y recomendaciones

Mediante las gráficas obtenidas se toma decisiones que son técnicas y que posteriormente se estudiarán desde el punto de vista económico, para obtener las conclusiones óptimas de los parámetros.

1.9.2.3 Matriz de Diseño

La matriz de diseño debe permitir estimar un modelo del tipo²⁸

$$Y = \beta_o + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_k Z_k + \sum \beta_{kl} Z_k Z_l + \sum \beta_{ik} X_i Z_k + \varepsilon \quad (\text{Ec.2.4})$$

En el cual estimado los parámetros, su correcta interpretación permite alcanzar el valor de mínima variabilidad.

Los efectos β_{ik} significativos permiten seleccionar los niveles de los factores de control X_i en que el producto sea más robusto a la variabilidad transmitida por los factores de ruido Z_k .

Se debe diseñar por separado las matrices para los factores de control y para los factores de ruido, luego se unen para formar la matriz del producto, la misma que se obtiene por medio de la experimentación factorial fraccional.

La matriz de diseño se representa con dos entradas, una en la cual aparece los k factores de control según la experimentación 2^{k-p} y en otra los factores de ruido r según una experimentación 2^{r-q}

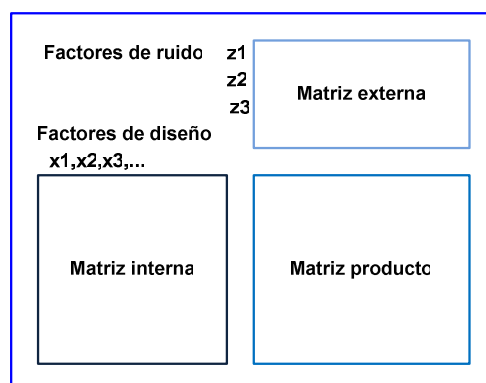


Figura 0.5 *Diseño de la Matriz de Experimentos*

²⁸ Prat/Tort/Grima/Pozueta, Métodos Estadísticos Control y Mejora de la Calidad, Ediciones UPC, España, 1999; pág. 237.

1.9.2.4 Experimentación factorial completa

La experimentación factorial radica en reproducir factores de interés, con todas sus posibles combinaciones. Por lo general se realiza este método de experimentación cuando se analiza pocos factores, ya que un gran número de estos implica que no sea viable la experimentación. El método más utilizado en el diseño factorial es la experimentación de dos niveles o 2^k factoriales²⁹, donde:

$$\text{Número de experimentos} = 2^k$$

2 = número de niveles
k = número de factores

Mediante el Algebra Boleana establecemos las posibles combinaciones, las cuales dependen del número de factores donde el nivel bajo de un factor es designado con un “-” ó -1 y el nivel alto es designado con un “+” ó 1. Así, para un diseño factorial 2^2 la matriz de diseño es:

A	B
-1	-1
1	-1
-1	1
1	1

Tabla 0.3 Matriz de diseño factorial 2^2 .

Los símbolos (1), a, b, y ab significan la suma de los totales de las n observaciones que se toman en cada uno de los casos y los efectos factoriales pueden ser A,B y la interacción entre ambos, AB.

<i>Experimentos</i>	<i>Efecto factorial</i>			
	I	A	B	AB
1 (1)	+	-	-	+
2 a	+	+	-	-
3b	+	-	+	-
4ab	+	+	+	+

Tabla 0.4 Signos para los contrastes de los experimentos 2^2 .

²⁹ Prat/Tort/Grima/Pozueta, Métodos Estadísticos Control y Mejora de la Calidad, Ediciones UPC, España, 1999; pág. 136.

Para analizar los efectos principales y la interacción de los mismos se utiliza las siguientes fórmulas:

$$A = \frac{1}{2n} [a + ab - b - (1)] \quad (\text{Ec.2.5})$$

$$B = \frac{1}{2n} [-a + ab + b - (1)] \quad (\text{Ec.2.6})$$

$$AB = \frac{1}{2n} [-a + ab - b + (1)] \quad (\text{Ec.2.7})$$

Se debe considerar que se deben realizar al menos 2 replicas del experimento para que esté presente variabilidad. La réplica es reproducir el experimento en las condiciones establecidas, este debe realizarse en diferentes tiempos, no consecutivamente.

Luego de analizar las interacciones se establece las combinaciones críticas, para establecer los factores en los que se va a robustecer el producto.

1.9.2.5 Experimentación factorial fraccional

Una de las limitaciones que presenta el diseño factorial completo, es que no se puede analizar varios factores, ya que el número excesivo de experimentos resultaría no conveniente.

El diseño factorial fraccional analiza los efectos principales y las interacciones de dos factores, los cuales contienen las características más importantes de la superficie en estudio.

La notación en la experimentación factorial fraccional es la siguiente:

Número de experimentos = 2^{k-p}	2 = número de niveles
	k = número de factores
	p= grado de fraccionamiento

El diseño factorial fraccional plantea que el número de experimentos ideal son de 8 a 16, por lo cual el grado de fraccionamiento varía de acuerdo al número de factores.

Número de Factores	Número de Experimentos	
	8	16
3	2^3	
4	2^{4-1}	
5	2^{5-2}	2^{5-1}
	D=AB E=AC	E=ABCD
6	2^{6-3}	2^{6-2}
	D=AB E=AC F=BC	E=ABC F=BCD
7	2^{7-4}	2^{7-3}
	D=AB E=AC F=BC G=ABC	E=ABC F=BCD G=ACD
8		2^{8-4}
		E=ABC F=BCD G=ACD H=ABD
9		2^{9-5}
		E=ABC F=BCD G=ACD H=ABD J=ABCD
10		2^{10-6}
		E=ABC F=BCD G=ACD H=ABD J=ABCD K=AB
11		2^{11-7}
		E=ABC F=BCD G=ACD H=ABD J=ABCD K=AB L=AC
12		2^{12-8}
		E=ABC F=BCD G=ACD H=ABD J=ABCD K=AB L=AC M=AD
13		2^{13-9}
		E=ABC

	F=BCD G=ACD H=ABD J=ABCD K=AB L=AC M=AD N=BC
14	2^{14-10} E=ABC F=BCD G=ACD H=ABD J=ABCD K=AB L=AC M=AD N=BC O=BD
15	2^{15-11} E=ABC F=BCD G=ACD H=ABD J=ABCD K=AB L=AC M=AD N=BC O=BD P=CD

Tabla 0.5 *Tabla de experimentos factoriales fraccionados*³⁰.

1.9.3 DISEÑO DE TOLERANCIAS

Uno de los aspectos conceptuales más importantes de la Ingeniería Concurrente consiste en considerar la variación dimensional de las piezas de forma simultánea al diseño del producto, es decir, las tolerancias relacionadas al proceso de diseño y las relacionadas al proceso de fabricación se analizan y se especifican de forma simultánea.

El diseño de tolerancias es la fase final del proceso para robustecer un producto, es la extensión del diseño de parámetros.

La gestión de las tolerancias se divide en tres módulos de aplicación:

³⁰ Prat/Tort/Grima/Pozueta, Métodos Estadísticos Control y Mejora de la Calidad, Ediciones UPC, España, 1999; pág. 215.

Módulo de especificación: en este módulo se discute cuáles son las tolerancias más adecuadas para el ensamble en función de los requerimientos funcionales.

Módulo de análisis: en este módulo se analiza cuáles son los efectos de las tolerancias en los requerimientos funcionales.

Módulo de síntesis: en este módulo se realiza una optimización o un ajuste de valores de las tolerancias conociendo los requerimientos funcionales y los procesos de fabricación.



Figura 0.6 Módulos de aplicación de las tolerancias³¹

Tolerancias

Se conoce como tolerancia a la diferencia entre las medidas límites entre las cuales se encuentra comprendida la dimensión real, la magnitud de la tolerancia no debe comprometer a la función asignada a la pieza.

Para establecer las tolerancias adecuadas que no incurran en aumentos de costos se debe considerar los siguientes aspectos:

- Fijar la tolerancia tan ancha como sea admisible para el correcto funcionamiento de la pieza.

³¹ Pérez R., Caracterización y Reproducción de los requerimientos Funcionales y las Tolerancias en el diseño Conceptual, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2002, Cap2, pág. 11.

- Reducir al máximo de los componentes que llevan dimensiones con tolerancias estrechas para acortar el tiempo de procesos costosos.

El análisis de las dimensiones y tolerancias es el proceso de estimar la acumulación de las tolerancias de diseño en las dimensiones de los componentes para asegurar que las piezas puedan ser ensambladas, a partir de las tolerancias de las piezas o componentes del ensamble.

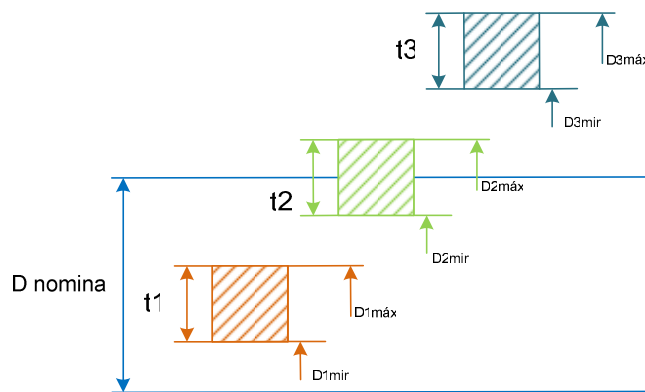


Figura 0.7 Tolerancia

Las tolerancias que se toman en cuenta para una superficie son:

TIPO DE TOLERANCIA	CARACTERISTICAS	SIMBOLO
Forma	Rectitud	—
	Planicidad	□
	Redondez	○
	Cilindricidad	∅
	Forma de una línea	⤿
	Forma de una superficie	⤿
Orientación	Paralelismo	//
	Perpendicularidad	⊥
	Inclinación	∠
Situación	Posición	⊕
	Concentricidad y Coaxialidad	◎
	Simetría	≡
Oscilación	Circular	↗
	Total	↗↘

Tabla 0.6 Clasificación de las tolerancias

En la siguiente tabla se muestra una guía para la selección de las tolerancias de forma y posición.

Funciones	Ejemplos	Trabajo	Ra μm	Er% 	Er% 	Er% 						
Superficies Brutas sin contacto		Común	25 12.5	0.03 0.05	0.05	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.3cm 0.02 scm	0.2
Superficies con contacto fijo	Transmisión controlada a mano posicionamiento	Normal	6.3 3.2 1.6	0.03 0.05	0.02	0.05	0.02	0.05	0.05	0.05	0.1 0.01	0.1
Centrado guiado superficies de rozamiento a baja y mediana velocidad	Engranajes caras de pistón Tambores de freno cojinetes de bronce dientes de engranaje muñones superficies deslizantes Cojinetes pistones cilindros ensambles forzados asientos de válvula cojinetes antifricción piezas deslizantes muñones	Cuidadoso	0.8 0.4	0.01	0.01	0.02	0.1	0.02	0.02	0.02	Depende de si la realización se hace con vernier	
Superficies de rozamiento a alta velocidad hermeticidad alta precisión	Soportes de cigüeñal árboles de leva vástagos de válvula levas cilindros de bomba hidráulica cojinetes guías de máquinas herramientas pivotes Contacto de calibres planos de apoyo comparadores Planos de apoyo bloques patrón acabado espejo		0.2 0.1 0.05 0.025									
		0.05 (s.c.m)	0.05									

Los valores de la tabla están dados en mm a menos que se especifique otra cosa

Tabla 0.7 Tabla guía para la selección de tolerancias de formas y posición³²

1.9.3.1 Rugosidad de Superficie

El valor de la tolerancia debe ser mayor a la rugosidad de la superficie. La tolerancia y la rugosidad están relacionadas directamente, lo cual implicaría que una tolerancia nominal conlleve a la rugosidad nominal, el diseñador debe establecer el valor de la tolerancia y el de la rugosidad. Cuando se fabrica piezas con el valor máximo admisible de tolerancia no es necesario establecer rugosidad.

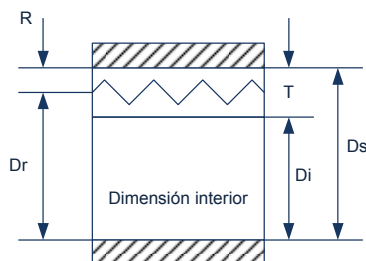



Figura 0.8 Rugosidad de superficie³³

³² Villanueva S. y Ramos J., Manual de Métodos de Fabricación Metalmeccánica, AGT editores, México, 1994, pág. 76

Existe una relación directa entre los procesos de mecanizado y la rugosidad obtenida, como se muestra en las siguientes tablas.

MECANIZADO	Rugosidad (μm)												
	0,025	0,03	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	16	20	25
Rebabado, cizallado, corte a la llama													
Torneado, Fresado y Limado													
Taladrado													
Cepillado													
Alesado													
Brochado													
Rectificado													
Bruñido													
Superacabado (lapeado)													
Pulido especular													
Granallado													
Laminado en caliente													
Colado en arena													
Forjado													
Colado en coquilla													
Colado a presión													
Laminado, cilindrado y trefilado en frío													
Extruido													
Electrocorrosión													

 Rugosidad más frecuente

 Rugosidad menos frecuente

Tabla 0.8 *Relación entre el mecanizado y la superficie*³⁴

³³ Armbruster Bernd, Manual de Tolerancias Dimensionales y Ajustes, EPN, Quito, 2004, pág. 11.

³⁴ Norma INEN, Código de Dibujo Técnico-Mecánico, Quito, 1989, pág. 111.

Valor de rugosidad (μm)	Número del grado de rugosidad
50	N12
25	N11
12,5	N10
6,3	N9
3,2	N8
1,6	N7
0,8	N6
0,4	N5
0,2	N4
0,1	N3
0,05	N2
0,025	N1

Tabla 0.9 *Valores de rugosidad superficial*³⁵

1.9.3.2 Fabricación de la Tolerancia

La tolerancia real que se alcanza depende en gran medida de los procesos de fabricación, dentro de estos procesos se debe considerar aspectos adicionales tales como el estado del equipo, la capacidad del operario y el medio ambiente.

Para seleccionar el proceso de fabricación de debe considerar los siguientes aspectos:

- La dimensión y su tolerancia acotada en el plano.
- Fabricar con la desviación máxima permisible de tolerancia, que no implique cambios en el funcionamiento de la pieza.
- Establecida la tolerancia, seleccionar el proceso de fabricación que conlleve a lo estipulado en los planos.

Las tolerancias deben ser compatibles con los procesos de fabricación por lo cual se recomienda los siguientes valores.

³⁵ Norma INEN, Código de Dibujo Técnico-Mecánico, Quito, 1989, pág. 110.

PIEZAS DE MOLDEADAS EN ARENA	La mayor dimensión de la pieza	Grupos de dimensiones en mm						
		≤25	25 a 63	63 a 100	100 a 160	160 a 250	250 a 400	400 a 630
Tolerancias para piezas de fundición gris no aleada	Menor a 250	±1	±1.5	±2	±2.5	±3		
	De 250 a 630	±1.5	±2	±2	±2.5	±3	±4	±4.5
	De 630 a 1600	±2	±2.5	±3	±3.5	±4	±4.5	±5.5
Procedimientos especiales		Tolerancia en % para dimensiones inferiores a 250 mm						
Con arena autesecante		±0.5 % con una tolerancia mínima de ±0.5mm						
Schaw		±0.3 % con una tolerancia mínima de ±0.1mm						
Molde de cera perdida		±0.2 % con una tolerancia mínima de ±0.05mm						
En coquilla, por gravedad		±0.5 % con una tolerancia mínima de ±0.2mm						
En coquilla, a presión		±0.3 % con una tolerancia mínima de ±0.1mm						
PIEZAS OBTENIDAS POR DEFORMACIÓN		Grupos de dimensiones en mm						
		≤50	50 a 80	80 a 200	200 a 315	315 a 400	400 a 500	500 a 630
Forjado		±3	±3	±4	±6	±8	±9	±10
Matrizado		±0.5	±1	±1	±1.5	±2	±2.5	±2.5
PIEZAS OBTENIDAS A PARTIR DE CHAPA								
Ensamblado por soldadura		±2 mm/m con una tolerancia mínima de ±1mm		Corte con sierra			±1 mm/m con una tolerancia mínima de ±0.5mm	
Recorte con prensa		Preciso	IT8 a IT9	Chapa para calderas			±0.5 mm/m con una tolerancia mínima de ±0.3mm	
		Burdo	IT9 a IT10					
PIEZAS OBTENIDAS POR DESPRENDIMIENTO DE MATERIAL								
Brochado		Preciso	IT5 a IT7	Escariado			Preciso	IT5 a IT7
		Medio	IT8 a IT9				Medio	IT8
Cepillado		Preciso	IT8 a IT9	Rectificado			Preciso	IT5 a IT7
		Medio	IT10				Medio	IT8
Electro – erosión		Preciso	0.05	Taladrado			Medio	IT10 a IT11
		Medio	0.10				Burdo	IT12
Fresado		Preciso	IT6 a IT7	Torneado			Preciso	IT6 a IT7
		Medio	IT8 a IT9				Medio	IT8 a IT9
		Burdo	IT10				Burdo	IT10

Tabla 0.10 Tolerancias respecto a los procesos de fabricación³⁶

³⁶ Villanueva S. y Ramos J., Manual de Métodos de Fabricación Metalmecánica, AGT editores, México, 1994, pág. 110

CAPÍTULO 3

ENSAYO DE FATIGA

El objetivo de este capítulo es describir los fundamentos considerados en el ensayo de fatiga, por medio del cual se obtiene la resistencia a la fatiga de materiales dúctiles y frágiles.

1.10 RESISTENCIA A LA FATIGA

La resistencia a la fatiga es aquella que soporta el material bajo cargas que varían cíclicamente en el tiempo.

1.10.1 FALLAS POR FATIGA

La falla por fatiga se presenta cuando existen deformaciones plásticas cíclicas cerca de las concentraciones de esfuerzos, y se produce por debajo del límite elástico de los materiales.

Existen tres etapas en las fallas por fatiga:

- Inicio de la grieta
- Propagación de la grieta
- Fractura súbita por el desarrollo de la grieta.

1.10.2 CARGAS POR FATIGA

Las cargas por fatiga son aquellas que varían con el tiempo, generalmente son de forma sinusoidal en maquinas rotativas, e irregulares en equipos de servicio.

Las relaciones más usuales de esfuerzo-tiempo son:

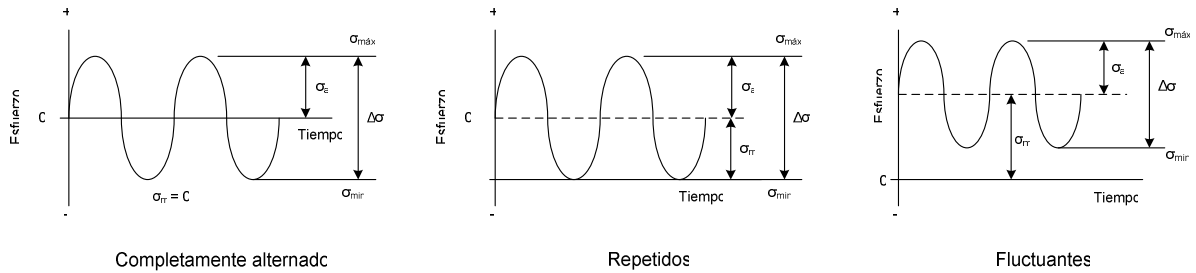


Figura 0.1 Cargas de máquina rotativa.

Estas cargas se definen por sus componentes medios, de amplitud, valor máximo y mínimo y las relaciones que existen entre ellos.

1.10.3 RELACIÓN VIDA - ESFUERZO

La resistencia a la fatiga se determina por medio de un ensayo en el cual las probetas se someten a cargas que varían en el tiempo, mientras se cuenta el número de ciclos de esfuerzo hasta la destrucción de la probeta. Se debe considerar que la probeta debe tener excelentes acabados superficiales.

De este ensayo se obtiene el diagrama Resistencia a la Fatiga (S) – Número de ciclos (N), para lo cual se debe realizar varios ensayos con el mismo material.

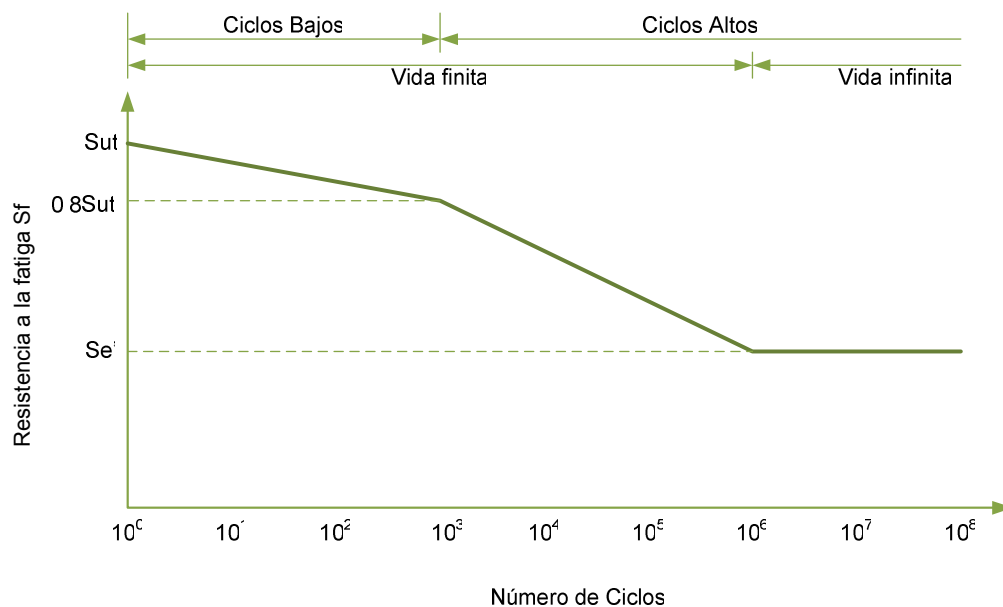


Figura 0.2 Diagrama S-N para un ensayo.

La grafica corresponde a la resistencia a la fatiga para materiales dúctiles, en la cual se conoce a S_e' como la resistencia límite a la fatiga de las probetas. En metales no ferrosos y aleaciones no existe límite a la fatiga.

Acero	$S_e' = 0,5 S_{ut}$	$S_{ut} < 200\text{Ksi (1400 MPa)}$
	$S_e' = 100 \text{ ksi (700 MPa)}$	$S_{ut} \geq 200\text{Ksi (1400 MPa)}$
Hierros	$S_e' = 0,4 S_{ut}$	$S_{ut} < 60\text{Ksi (400 MPa)}$
	$S_e' = 24 \text{ ksi (160 MPa)}$	$S_{ut} \geq 60\text{Ksi (400 MPa)}$

Tabla 0.1 Límites de resistencia de fatiga.³⁷

La resistencia a la fatiga S_f para cualquier número de ciclos está dada por las siguientes ecuaciones.

Materiales Dúctiles	<i>Vida Finita</i> $10^3 \leq N \leq 10^6$	$S_f = N^b 10^c$ $b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{0,8 S_{ut}}{S_e}\right)$ $c = \log\left(\frac{(0,8 S_{ut})^2}{S_e}\right)$
	<i>Vida Infinita</i> $10^6 \leq N \leq \alpha$	$S_f = S_e$
Materiales Frágiles	<i>Vida Finita</i> $10^3 \leq N \leq 10^6$	$S_f = N^b 10^c$ $b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{0,8 S_{ut}/k_t}{S_e}\right)$ $c = \log\left(\frac{(0,8 S_{ut}/k_t)^2}{S_e}\right)$
	<i>Vida Infinita</i> $10^6 \leq N \leq \alpha$	$S_f = S_e$

Tabla 0.2 Resistencia a la fatiga para diferentes materiales.³⁸

³⁷ Joseph E. Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, McGraw-Hill, México, 2002, pág. 312.

³⁸ Idem 37, pág. 314.

1.10.4 CÁLCULO DE LA FATIGA

Para calcular el límite de resistencia a la fatiga se debe considerar las condiciones reales a las que se encuentran sometidos los elementos mecánicos, tales como:

- Material: composición química, base de la falla, variabilidad.
- Manufactura: método de fabricación, tratamiento térmico, corrosión por desgaste, condición superficial, concentración de esfuerzo.
- Entorno: corrosión, temperatura, estado de esfuerzo, tiempos de relajación.
- Diseño: forma, vida, estado de esfuerzos, concentración de esfuerzos, velocidad, rozamiento, desgaste³⁹.

Para el diseño de elementos reales se consideran diferentes factores que afectan directamente al valor del Límite de Resistencia a la Fatiga como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S_e = S_e' \times k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_f \quad (\text{Ec.3.1})$$

Donde:

S_e = Límite de resistencia a la fatiga

S_e' = Límite de resistencia a la fatiga de una probeta

Factores de corrección	Características
k_a = Factor de acabado superficial	Este factor depende del acabado superficial que tenga el elemento a diseñar y de la resistencia a la tensión.
k_b = Factor de tamaño	Considera que piezas de mayor tamaño que la probeta fallan bajo el efecto de esfuerzos menores que esta.
k_c = Factor de confiabilidad	Debido a distorsiones que se dan en la realización del ensayo de un mismo

³⁹ Joseph E. Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, McGraw-Hill, México, 2002, pág. 317.

	material se debe tener en cuenta la confiabilidad con la que se trabaja.
k_e = Factor de concentración de esfuerzos	Toma en cuenta los cambios en el contorno geométrico del elemento.
k_d = Factor de temperatura	Considera las temperaturas reales a las que trabaja el elemento a diseñar, ya que a bajas temperaturas la fatiga se reduce y a altas se aumenta.
k_f = Factor de varios efectos	Considera otros efectos como esfuerzos residuales.

Tabla 0.3 Factores de Corrección del Límite de Resistencia a la Fatiga.

1.11 NORMAS PARA EL ENSAYO DE FATIGA

El ensayo de fatiga está sujeto a las siguientes normas:

1. Low Cycle Fatigue (ASTM Standard E606-80).
2. High Cycle Fatigue (ASTM Standard E466-82).
3. Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life and Strain-Life Fatigue Data (ASTM Standard E739-91)
4. Plane-Strain Fracture Toughness Test Method (ASTM Standard E399-90).
5. Fatigue Crack Growth and Threshold Crack Growth (ASTM Standard E647-91).
6. Creep Crack Growth Test Method (ASTM Standard E1457-92).
7. Surface Fatigue Crack Growth Test Method (ASTM Standard E399-90). Test Method (ASTM Standard E740-88).

1.12 ENSAYO DE FATIGA A FLEXIÓN DE VIGA ROTATORIA

El ensayo de fatiga a flexión de viga rotatoria de R.R. Moore es una prueba para determinar la resistencia a la fatiga de los materiales. El ensayo consiste en hacer girar la probeta a 1725 rpm, la misma que se encuentra cargada a flexión pura

constante, hasta que se fracture y entonces se registra el número de ciclos. Este se debe realizar varias veces para diferentes esfuerzos, lo que proporciona diferentes valores con los cuales se realiza el diagrama S–N en papel logarítmico.

Entre las consideraciones que se deben considerar para el ensayo de fatiga tenemos:

- El momento de flexión es constante en la parte curva de la probeta.
- El momento de flexión es máximo en el área de menor sección de la probeta.
- La fuerza cortante es cero en el sistema.
- El esfuerzo de torsión es cero en el sistema.
- La probeta debe cumplir con todas las características para el ensayo.
- La torsión es despreciable en los rodamientos.
- Para que el ensayo sea válido la probeta debe fallar en la zona de menor sección transversal.
- Al flexionar la probeta la fibra que se encuentra a tracción se encuentra después de una semirevolución a compresión.

1.12.1 MAQUINA PARA EL ENSAYO DE FATIGA

La máquina de flexión rotativa para el ensayo de fatiga tiene los siguientes elementos principales:

- Motor eléctrico
- Elementos de sujeción
- Eje
- Conjunto de rodamientos

- Estructura soportante.
- Contador de ciclos.
- Sistema de control para el motor eléctrico.
- Elemento de carga.
- Accesorios de montaje.

La siguiente figura muestra esquemáticamente una máquina de ensayo a la fatiga por flexión de viga rotatoria.

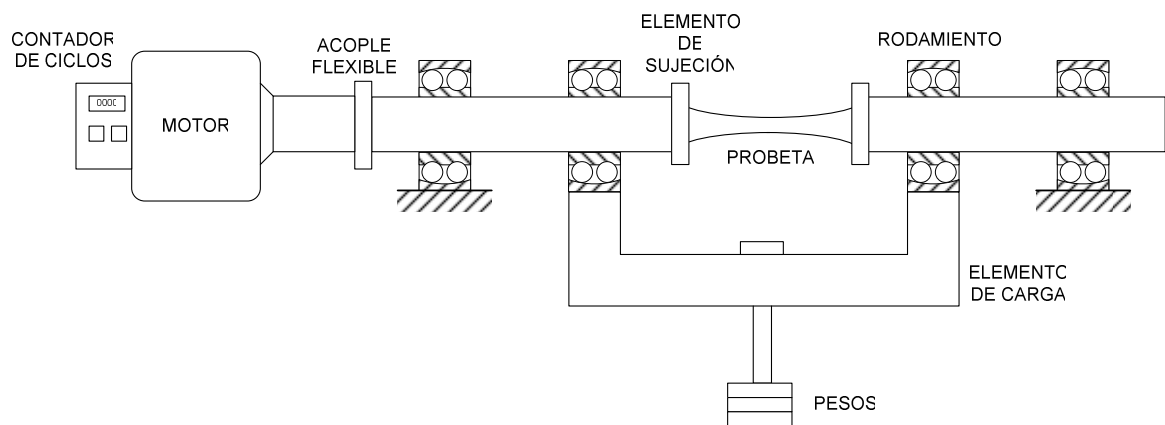


Figura 0.3 Esquema de la Máquina de Ensayo de Fatiga.

1.12.1.1 Funcionamiento de la máquina

El motor eléctrico es el encargado de transmitir movimiento al eje, que se encuentra acoplado al sistema de rodamientos, los cuales deben ser seleccionados para que únicamente soporten carga radial. Los elementos de sujeción deben ser acoplados al sistema de transmisión por los accesorios de montaje, la estructura soportante se debe encontrar nivelada en toda la superficie garantizando el correcto funcionamiento de la máquina. El elemento de carga es instalado en los apoyos de la probeta.

1.12.2 PROBETA PARA EL ENSAYO DE FATIGA

La probeta para el ensayo de fatiga debe ser simétrica transversal y longitudinalmente, debe ser fabricada cuidadosamente, teniendo en cuenta que el

pulido final debe ser en forma axial para evitar ralladuras circunferenciales. La geometría de la probeta depende de las condiciones de operación de la máquina (momento flector nominal o máximo).

Los resultados que se obtengan de la resistencia a la fatiga dependen de la geometría de la probeta como se muestra en el siguiente grafico.

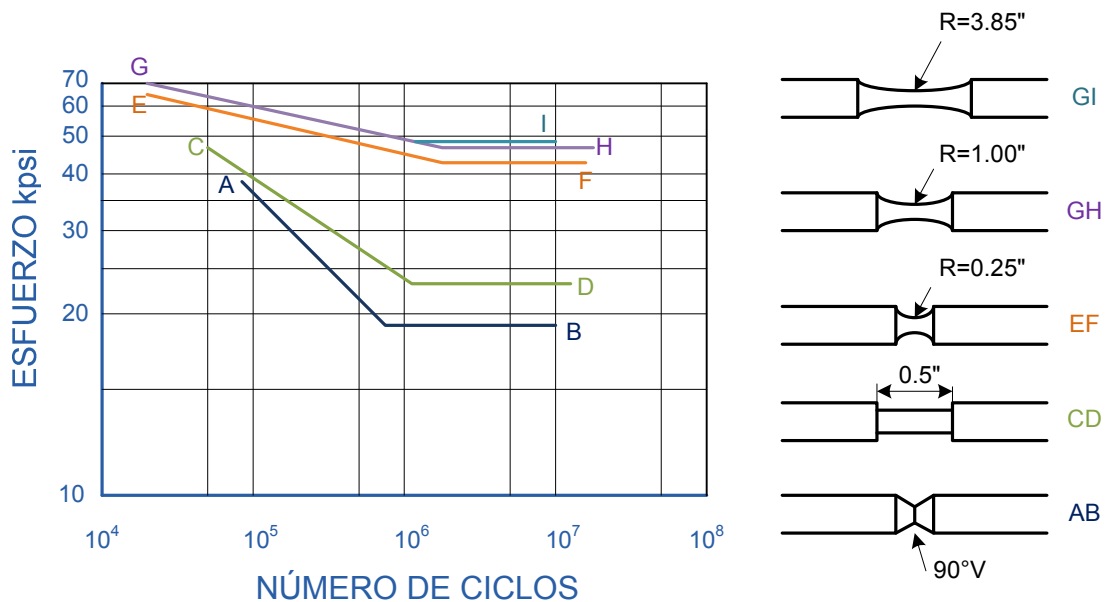


Figura 0.4 Efectos de los cambios en la forma de la probeta sobre la fatiga.

1.12.3 CONDICIONES DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Entre los principales defectos que presenta la máquina de ensayos de fatiga de viga rotatoria tenemos:

- Falta de alineación.
- Mecanismo de sujeción de la probeta no confiable.
- Falta de control shut /down.
- Existencia de cargas axiales durante la realización del ensayo.

- Cuantificador de ciclos análogo.
- Pésimas condiciones de la estructura soportante.
- Sistema de cargas inapropiado.
- El motor eléctrico proporciona un número de revoluciones menor al requerido.
- No tiene carcasa de seguridad.

En las siguientes fotografías se muestra el estado actual de la máquina:



Figura 0.5 Estado actual de la máquina de ensayos de fatiga.

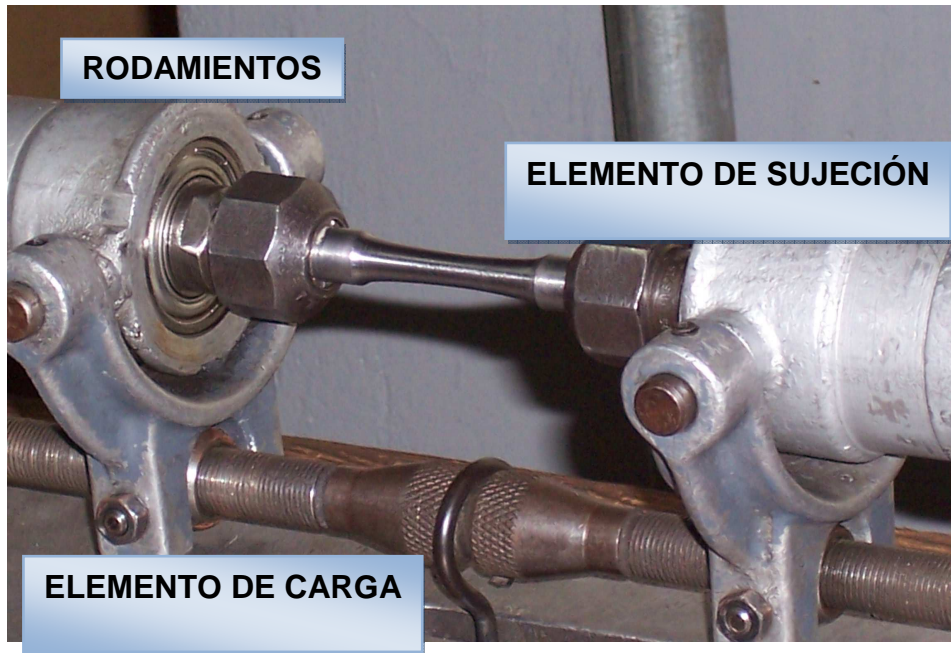


Figura 0.6 Rodamientos y elementos de sujeción.

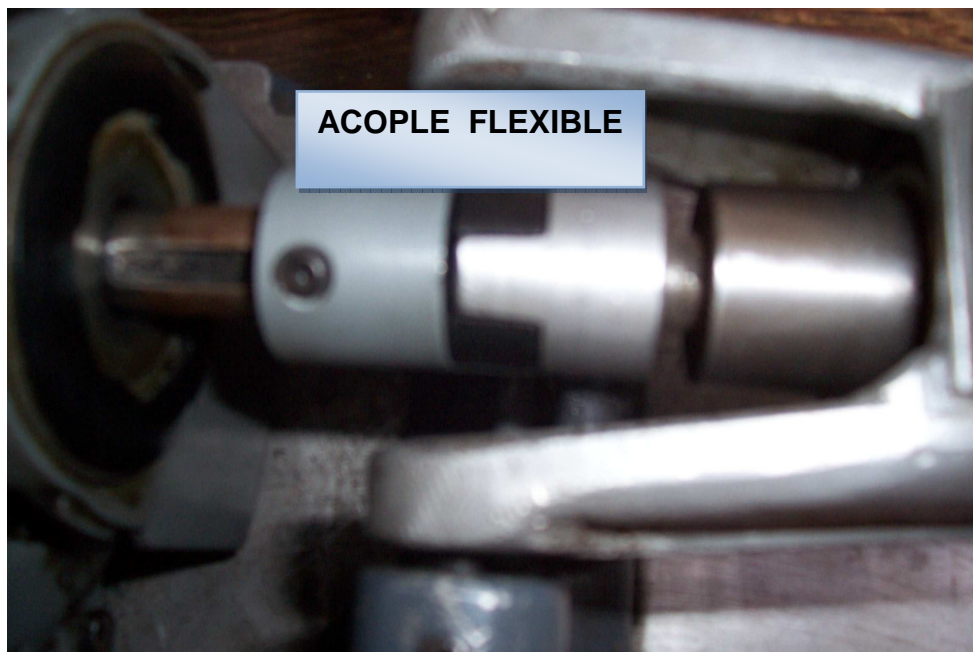


Figura 0.7 Acople flexible de la máquina de ensayos de fatiga.

Los ensayos que se realizan en la máquina de la Facultad de Ingeniería Mecánica presentan las siguientes condiciones:

- Las probetas no cumplen con las tolerancias especificadas porque se fabrican en las máquinas del laboratorio de Máquinas Herramientas de la EPN, las mismas que se encuentran en malas condiciones debido a sus años de uso.
- La máquina de Ensayo de Fatiga no cumple con las especificaciones de ensayo por lo ya establecido.

1.12.3.1 Realización del ensayo de fatiga de una máquina de viga rotatoria

En primera instancia se realiza ensayos en la máquina de la facultad obteniendo resultados que salen del contexto teórico, lo cual implica realizar ensayos de fatiga en una institución que presta servicios de laboratorio de materiales, para poder establecer parámetros de comparación entre un ensayo a condiciones confiables y un ensayo a las condiciones de la máquina de fatiga de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Las dimensiones de la probeta para el ensayo de fatiga tanto como para la máquina de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la E.P.N. como para la de la Escuela Politécnica del Ejército se presentan en el anexo 1.

Esta comparación es necesaria para poder realizar el estudio del QFD (Despliegue de la Función de la Calidad) en la cual necesitamos conocer como se encuentra nuestros potenciales competidores.

Se debe recalcar que las probetas que se utilizaron en el ensayo realizado por la ESPE fueron fabricadas en máquinas de control numérico de última tecnología, por lo cual cumplían con las tolerancias establecidas de ensayo.

En la realización del ensayo se mide los siguientes valores:

N = número de ciclos

X = distancia de la chumacera fija a chumacera flotante en pulgadas.

d = diámetro mínimo de la probeta en pulgadas.

Q = carga a la que se somete a la probeta.

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{0,8 S_{ut}}{S_e}\right) \text{ (Ec.3.2)}$$

$$c = \log\left(\frac{(0,8 S_{ut})^2}{S_e}\right) \text{ (Ec.3.3)}$$

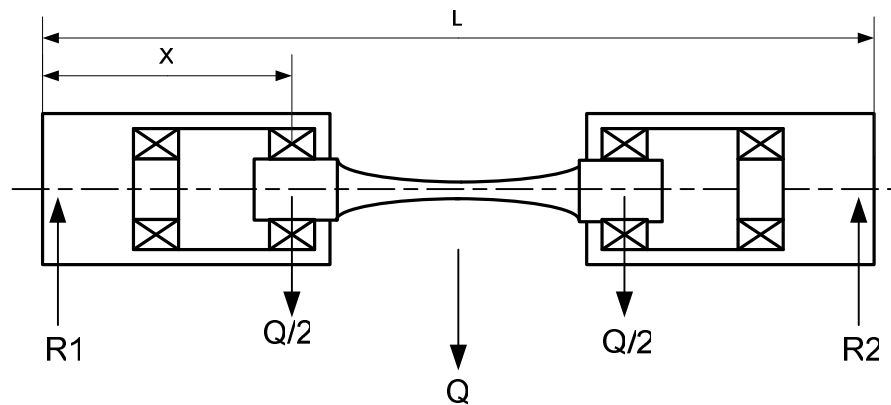


Figura 0.8 Esquema de los valores a medir en el ensayo de fatiga.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de los dos lugares, y los valores teóricos a los que se aspira llegar:

MÁQUINA DE FATIGA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL									
RPM	832								
N	S _{ut} (Kpsi)	x (pulg)	d (pulg)	S _e '	b	c	S _f (Kpsi)	Q (lb)	Q (kg)
0	104,400	7,87	0,300	52,200	-0,0680	2,1259	102,0110		
1000	104,400	7,87	0,300	52,200	-0,0680	2,1259	83,5200	56,2613	25,5733
3000	103,090	7,87	0,290	51,545	-0,0680	2,1204	76,5320	46,5685	21,1675
5000	103,930	7,87	0,303	51,965	-0,0680	2,1240	74,5200	51,7197	23,5090
7500	85,500	7,95	0,300	42,750	-0,0680	2,0392	59,6372	39,7689	18,0768
10000	103,950	7,98	0,300	51,975	-0,0680	2,1240	71,1008	47,2351	21,4705
12000	101,453	8,00	0,300	50,727	-0,0680	2,1135	68,5374	45,4183	20,6447
15000	84,290	7,91	0,290	42,145	-0,0680	2,0330	56,0848	33,9541	15,4337
18000	102,087	7,97	0,300	51,044	-0,0680	2,1162	67,0891	44,6259	20,2845
1000000	102,087	7,97	0,300	51,044	-0,0680	2,1162	67,0891		
10000000	102,087	7,97	0,300	51,044	-0,0680	2,1162	67,0891		

MÁQUINA DE FATIGA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO									
RPM	1400								
N	Sut (Kpsi)	x (pulg)	d (pulg)	Se'	b	c	Sf (Kpsi)	Q (lb)	Q (kg)
0	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	102,0110		
1000	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	81,6088		
2873	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	75,9542	47,5310	21,6050
5486	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	72,6839	40,7264	18,5120
32389	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	64,4124	31,5084	14,3220
1000000	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	51,0055		
1E+09	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	51,0055		
MÁQUINA DE FATIGA TEÓRICA									
RPM	1750								
N	Sut (Kpsi)	x (pulg)	d (pulg)	Se'	b	c	Sf (Kpsi)	Q (lb)	Q (kg)
0	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	102,0110		
1000	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	81,6088		
1000000	102,011	7,87	0,284	51,006	-0,0680	2,1159	51,0055		
100000000	102,011	7,87	0,284	51,006	0,0000	0,0000	51,0055		

Tabla 0.4 Resultados de los Ensayos de Fatiga.

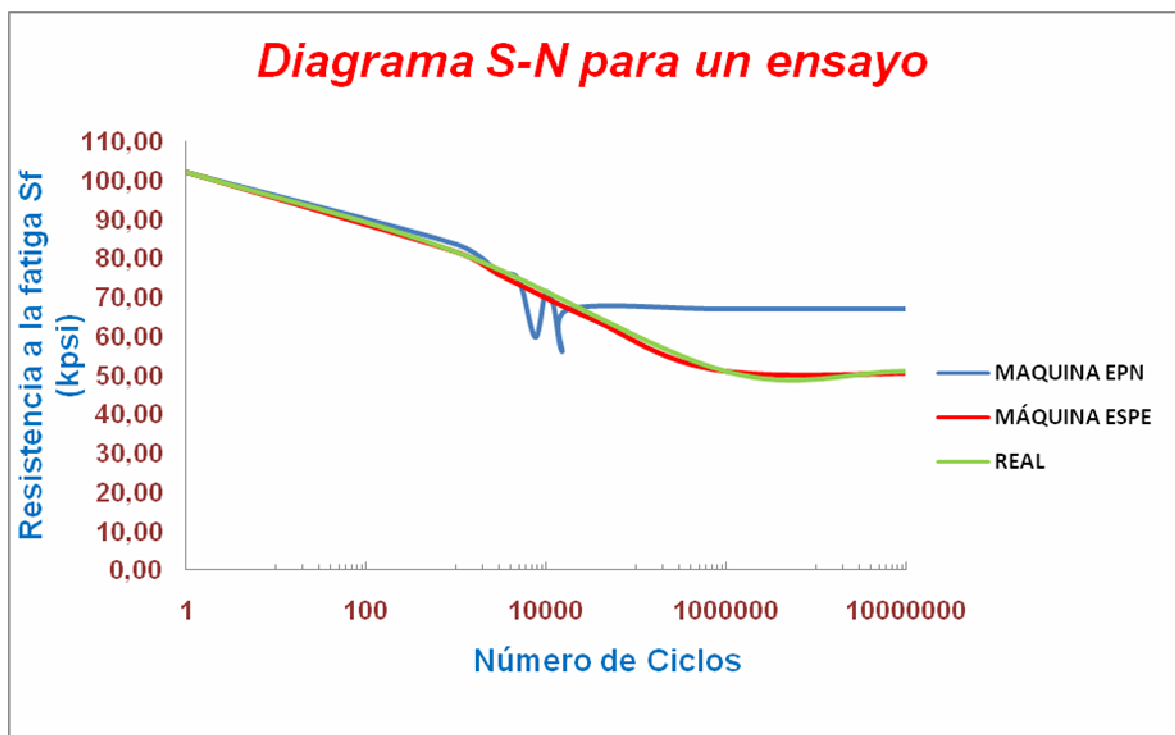


Figura 0.9 Comparación diagrama S-N para un ensayo.

Como se puede observar la curva que resulta de realizar los ensayos de fatiga en la máquina de la Facultad de Ingeniería Mecánica presenta una infidelidad la cual no garantiza apreciar el fenómeno de la fatiga en condiciones reales.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DEL DISEÑO ROBUSTO EN LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA DE VIGA ROTATORIA

El objetivo de este capítulo es desarrollar las fases del Diseño Robusto aplicado al Diseño de la Máquina de Ensayos de Fatiga de la Facultad de Ingeniería Mecánica, así como también presentar los diferentes cálculos y planos correspondientes.

1.13 DISEÑO DEL SISTEMA PARA LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA DE VIGA ROTATORIA

Con el diseño del sistema buscamos reflejar las necesidades de los clientes en especificaciones técnicas del producto, entendiéndose por clientes no solo a los usuarios finales sino a todas las personas que se ven inmersas en el desarrollo del producto. La herramienta que se utiliza para desarrollar el diseño del sistema es el QFD (Despliegue de la Función de la Calidad).

1.13.1 QFD APLICADO A LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA

El QFD implica el desarrollo de 6 fases que se detallan a continuación y se presentan en el anexo 2.

1.13.1.1 Fase 0. Identificación de los clientes potenciales

En esta primera fase se identifica los clientes internos y externos que están relacionados con el diseño de nuestro producto. A pesar de que los departamentos de venta, bodega y postventa solo son supuestos, se toman en cuenta para que el diseño incluya todo el ciclo de vida del producto.

Clientes Internos	Clientes Externos
Departamento de Diseño	Instituciones Educativas
Departamento de Producción	Laboratorios de Materiales
Departamento de Ventas	Empresas de Diseño
Personal de Bodega	Empresas de Fabricación de Materiales
Departamento de Postventa	Centros de Investigación de Materiales

Tabla 0.1 *Identificación de clientes.*

1.13.1.2 Fase 1. Determinación de las expectativas del cliente

Se determinan las necesidades del cliente y se las clasifica de acuerdo al tipo de requerimiento, pueden ser funcionales, estéticos, de costos, de seguridad y medio ambiente. Luego se asigna un peso ponderado dependiendo de la importancia para el cliente. Además debemos valorar los siguientes aspectos:

Evaluación de los clientes: calificación que proporcionan los clientes a las diferentes necesidades de 0 al 100%.

Brecha absoluta ponderada: porcentaje que podemos ganar si mejoramos al 100% la evaluación de esta necesidad.

Brecha relativa ponderada: porcentaje de mejora en esta necesidad.

1.13.1.3 Fase 2. Definición del producto

En esta fase se establece los parámetros de diseño que se pueden controlar y medir para alcanzar las necesidades del cliente.

Como siguiente paso se procede a la construcción de la Matriz Casa de la Calidad estableciendo la relación entre las necesidades del cliente y los parámetros de diseño, calificándolos de la siguiente manera⁴⁰:

- Relación fuerte 9 puntos
- Relación media 3 puntos
- Relación débil 1 punto

⁴⁰ Salvador Capuz Rizo, Introducción al Proyecto de Producción, Alfaomega, México, 2001; pág. 160.

El techo de la Casa de la Calidad no es más que la correlación entre los parámetros de diseño que puede ser positiva o negativa. Para que sea positiva basta que se cumpla una de las especificaciones. Para que sea negativa deben ser incompatibles los parámetros.

Otro fin de esta matriz es establecer los objetivos de los parámetros de diseño en términos medibles. Para cada una de las necesidades se debe valorar aspectos como:

Tasa de importancia (TI): se atribuye una ponderación de 1 a 5 (de menos a más) a cada demanda. Se sugiere que los pesos atribuidos cubran un rango entre 3 y 5 (no caer en la tentación de colocar 5 a todas).

Situación actual (SA): se califica entre 1 y 5 la situación de la compañía con respecto a cada demanda. Al igual que en el caso anterior, las calificaciones deben tener una cierta variabilidad. En este caso se sugiere un rango mayor o igual a 2.

Plan de la organización (PL): valorar de 1 a 5 la situación en que se desearía estar para cada una de las demandas. Para establecer el plan de la organización es necesario comparar la Situación Actual (SA) con la Tasa de Importancia (TI) y con la situación de la competencia.

Tasa de mejora (TM): se calcula dividiendo el Plan de la Organización (PL) para la Situación Actual (SA).

$$TM=PL/SA \quad (\text{Ec.4.1})$$

Importancia de las ventas (IV): se trata de asignar un peso a cada demanda del cliente según lo importancia de satisfacerla, con el propósito de aumentar las ventas (1.5 muy importante; 1.2 relativamente importante; 1 irrelevante).

Peso absoluto de cada necesidad: se calcula multiplicando la tasa de importancia (TI) por la tasa de mejora (TM) y por la importancia en las ventas (IV).

$$\text{Peso absoluto}=TI \times TM \times IV \quad (\text{Ec.4.2})$$

Peso solicitado (peso relativo): se calcula convirtiendo el peso absoluto de cada necesidad en porcentaje. (Dividir el Peso Absoluto de cada necesidad por la suma de los pesos absolutos de todas las necesidades y multiplicar por 100).

1.13.1.3.1 Resultados de la matriz de la Casa de la Calidad

Con esta matriz podemos establecer las necesidades primordiales de los clientes como se muestra en la tabla 4.2, la situación actual respecto a la competencia (ESPE y UPS de Cuenca), además de las metas que se persigue dentro de los parámetros de diseño. Se determina que para el usuario lo principal es la facilidad de operación de la máquina de ensayos, además de una óptima realización del ensayo que proporcione resultados confiables.

Necesidades del cliente	Peso solicitado %
fácil de operar	18,93%
óptima realización del ensayo	9,47%
proporcione resultados confiables	7,57%
tenga un precio competitivo	7,57%
sea ergonómica	6,06%

Tabla 0.2 Jerarquización de las necesidades de los clientes.

La relación entre las necesidades del cliente y los parámetros de diseño proporciona una idea clara de cuales son los factores sobre los cuales se debe enfocar para robustecer producto y así satisfacer al cliente. En el caso de la máquina de fatiga son:

Parámetros de Diseño	Relación Necesidades del cliente vs. Parámetros de Diseño
Facilidad de fabricación y ensamblaje	16,1%
Costos	15,9%
Montaje de la probeta	13,7%
Mantenibilidad	10,8%
Alineación	10,0%

Tabla 0.3 Jerarquización de la relación necesidades de los clientes vs. Parámetros de diseño.

1.13.1.4 Fase 3. Definición de los componentes

En esta fase se define los componentes de la máquina por medio de la Matriz de Desarrollo del Producto, para generar un prototipo. Los elementos determinados son:

Componentes
ESTRUCTURA
EJES
RODAMIENTOS
CUANTIFICADOR DE CICLOS
MECANISMO DE SUJECCIÓN
TIPO DE MOTOR
CONTROL AUTOMÁTICO
ACOPLES Y UNIONES
SISTEMA DE CARGAS

Tabla 0.4 Componentes de la Máquina de Fatiga.

El desarrollo de esta matriz sigue los pasos mencionados en las fases anteriores pero esta vez se relaciona los Parámetros de Diseño con las Características de las Piezas.

Con esta matriz obtenemos los Parámetros de Diseño del producto con su respectiva ponderación. Los resultados se muestran en la tabla 4.5.

Parámetros de Diseño	Peso solicitado %
Alineación	20,8%
Montaje de la probeta	20,8%
Funciones automatizadas	10,7%
No presencia de cargas axiales	10,4%
Seguridad	8,3%

Tabla 0.5 Especificaciones de máquina de ensayo

Características de las piezas	Relación especificaciones del producto vs. características de las piezas
Tipo de motor	16,8%
Marca y tipo de rodamiento	15,8%
Mecanismo de sujeción	13,1%
Acoples y uniones	13,1%

Tabla 0.6 Relación entre las especificaciones del producto y características de las piezas.

Luego de analizar todos estos parámetros y las relaciones con los componentes obtenemos un prototipo de la máquina de ensayos como se muestra en la siguiente figura:

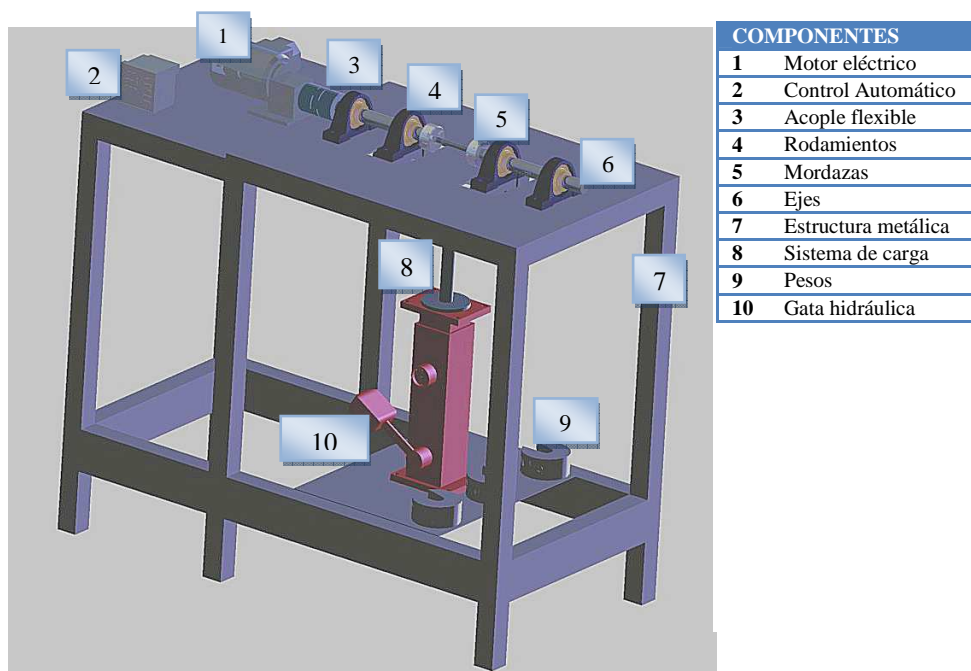


Figura 0.1 Prototipo de la máquina de ensayos de fatiga.

1.13.1.5 Fase 4. Definición de los Procesos de Producción

En esta fase se emplea la Matriz de Control del Proceso de Fabricación que partiendo de las características de las piezas o componentes a fabricar, define las operaciones de fabricación necesarias, como se muestra en las tablas 4.7 y 4.8.

Características de las piezas	Peso solicitado %
Mecanismo de sujeción	24,93%
Mecanismo de transmisión de fuerza	12,46%
Marca y tipo de rodamiento	9,97%
Material y recubrimiento de la estructura	7,98%
Cuantificador de ciclos	7,98%

Tabla 0.7 Piezas críticas de la máquina de ensayos de fatiga.

Operaciones de Fabricación	Características de las piezas vs. Operaciones de fabricación
montaje y alineación del motor	12,5%
torneado interno del acople	11,1%
instalación de los controles automáticos	10,1%
montaje de ejes - mordaza	9,2%
fresado de chavetero en el eje	8,5%
montaje del acople al eje	8,5%
montaje de ejes - chumaceras	7,5%
torneado de ejes	7,3%
montaje del acople al eje del motor	7,0%
alineamiento de chumaceras	4,5%
construcción y montaje de pesos	3,3%
montaje chumaceras - elemento de transmisión de carga	2,9%
montaje en estructura metálica	2,6%
pintura de la máquina	2,6%
instalación y carcasa de seguridad	2,3%

Tabla 0.8 *Relación entre las características de las piezas vs. Operaciones de fabricación.*

1.13.1.6 Fase 5. Organización de la producción

Esta fase se fundamenta en la Matriz de Gama de Fabricación en la cual se puede ver que la producción está relacionada con las operaciones de fabricación, por tanto es indispensable determinar las especificaciones de producción las mismas que se observan en la tabla 4.9.

Operaciones de Fabricación	Peso solicitado %
Montaje de ejes - mordaza	12,46%
Alineamiento de chumaceras	12,46%
Montaje y alineación del motor	12,46%
Instalación de los controles automáticos	7,97%
Torneado de ejes	6,38%

Tabla 0.9 *Operaciones críticas de fabricación.*

Especificaciones de Producción	Operaciones de Fabricación vs. Especificaciones de producción
Mano de obra calificada	33,7%
Disponibilidad de herramientas	28,5%
Instalaciones adecuadas	9,9%
Recursos económicos	9,5%
Disponibilidad de materia prima	8,7%
Maquinaria eficiente	6,7%
Disponibilidad de servicios	3,0%

Tabla 0.10 Operaciones de Fabricación vs. Especificaciones de producción.

1.14 DISEÑO DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA DE VIGA ROTATORIA

El primer paso a seguir en el diseño de parámetros es definir el problema, es decir establecer cuales son los componentes críticos de la máquina de fatiga y esto se realiza por medio de el QFD, además se debe establecer los niveles que deben tomar los factores, para lo cual se realiza el AMFE de diseño de la máquina de fatiga y otro del proceso del ensayo de fatiga, que se presentan en el anexo 3 obteniendo los siguientes resultados:

FACTORES DE CONTROL		Nivel 1 (-)	Nivel2 (+)
TF	Diámetro Sistema de Transmisión de Fuerza	20 mm	31mm
ES	Tipo de Elementos de Sujeción	Dados	Mandriles
RD	Tipo de Rodamientos	De bolas	De bolas en Y

FACTORES DE RUIDO		Nivel 1 (-)	Nivel2 (+)
FP	Forma de Construcción de la Probeta	Manual	Automático
OP	Operario	No apto	Apto

Tabla 0.11 Factores de Control y Ruido.

El objetivo de la experimentación es encontrar la combinación ideal con la cual podamos acercarnos a resultados que presenten una mínima variabilidad con respecto a la curva real, por lo que el cálculo de la relación S/N (señal/ruido) será a partir de la característica NOMINAL ES MEJOR.

1.14.1 ESTUDIO DEL EFECTO EN LA VARIABLE DE SALIDA

Para estudiar el efecto de los factores: diámetro del sistema de transmisión de fuerza, tipo de elemento de sujeción y tipo de rodamientos, en el número de ciclos generados en el ensayo, se diseña el experimento factorial 2^3 para los factores de control y 2^2 para los factores de ruido, el cual debe cumplir con el siguiente procedimiento:

1. Preparar 32 probetas en acero A42 para el ensayo de fatiga según la matriz diseñada, de acuerdo a límites de especificación de cada nivel.
2. Realizar el ensayo y registrar en una hoja de datos los valores de los ciclos correspondientes para cada carga.
3. Analizar estadísticamente los resultados.
4. Registrar las conclusiones obtenidas.

Al no poder realizar todos los experimentos con las combinaciones requeridas, se procedió a asumir porcentajes de pérdida de fiabilidad en los resultados del ensayo dependiendo de los factores y niveles que interactuaban en cada combinación con lo cual se alcanza los siguientes resultados:

MATRIZ DE DISEÑO			MATRIZ DE FACTORES DE RUIDO			
			Manual	Manual	Automático	Automático
MATRIZ DE FACTORES DE CONTROL			No apto	Apto	No apto	Apto
20 mm	Dados	De bolas	3374	3324	3249	3199
20 mm	Dados	De bolas en Y	3273	3223	3148	3098
20 mm	Mandriles	De bolas	3173	3123	3048	2998
20 mm	Mandriles	De bolas en Y	3073	3023	2948	2898
31mm	Dados	De bolas	3348	3298	3223	3173
31mm	Dados	De bolas en Y	3248	3198	3123	3073
31mm	Mandriles	De bolas	3148	3098	3023	2973
31mm	Mandriles	De bolas en Y	3048	2998	2923	2873

CICLOS

Tabla 0.12 Matriz de Diseño para 21kg.

MATRIZ DE DISEÑO			MATRIZ DE FACTORES DE RUIDO			
			Manual	Manual	Automático	Automático
MATRIZ DE FACTORES DE CONTROL			No apto	Apto	No apto	Apto
20 mm	Dados	De bolas	7846	7610	7256	7020
20 mm	Dados	De bolas en Y	7374	7138	6784	6548
20 mm	Mandriles	De bolas	6902	6666	6312	6076
20 mm	Mandriles	De bolas en Y	6430	6194	5840	5604
31mm	Dados	De bolas	7728	7492	7138	6902
31mm	Dados	De bolas en Y	7256	7020	6666	6430
31mm	Mandriles	De bolas	6784	6548	6194	5958
31mm	Mandriles	De bolas en Y	6312	6076	5722	5486

CICLOS

Tabla 0.13 Matriz de Diseño para 18kg.

MATRIZ DE DISEÑO			MATRIZ DE FACTORES DE RUIDO			
			Manual	Manual	Automático	Automático
MATRIZ DE FACTORES DE CONTROL			No apto	Apto	No apto	Apto
20 mm	Dados	De bolas	22966	23908	25322	26264
20 mm	Dados	De bolas en Y	24851	25793	27206	28149
20 mm	Mandriles	De bolas	26735	27678	29091	30033
20 mm	Mandriles	De bolas en Y	28620	29562	30976	31918
31mm	Dados	De bolas	23437	24379	25793	26735
31mm	Dados	De bolas en Y	25322	26264	27678	28620
31mm	Mandriles	De bolas	27206	28149	29562	30504
31mm	Mandriles	De bolas en Y	29091	30033	31447	32389

CICLOS

Tabla 0.14 Matriz de Diseño para 14kg.

Cumplido el procedimiento hasta el punto 3 y con los datos obtenidos, se procede a realizar un análisis de la Matriz de Diseño con apoyo del software JMP Statistical Discovery Software.

Una forma eficaz de resumir la información contenida en el experimento es a través de un gráfico de cubo, en el cual se puede observar los valores promedio de respuesta en cada una de las esquinas que representan las ocho combinaciones posibles de los factores y sus niveles. De este gráfico se pueden extraer las primeras conclusiones acerca de como actúan los factores en la respuesta, pero es conveniente seguir con un análisis del factor señal/ruido.

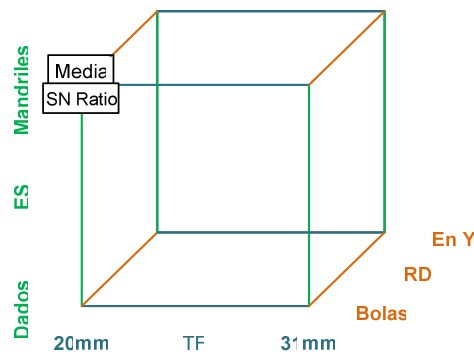


Figura 0.2 Gráfico general del cubo.

$$Mean = \frac{\sum \text{ciclos}}{4} = \frac{3374 + 3324 + 3249 + 3198}{4} = 3286,25 \quad (\text{Ec.4.3})$$

$$StaDesv = \sqrt{\frac{\sum (\text{Ciclos} - \text{Media})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{18300,75}{3}} = 78,10 \quad (\text{Ec.4.4})$$

$$SNRatio = 10 \times \log_{10} \frac{Media^2}{StaDesv.^2} = 10 \times \log_{10} \frac{3286,5^2}{78,10^2} = 32,48 \quad (\text{Ec.4.5})$$

	TF	ES	RD	Pattern	--	--	+-	++	Mean	Desviación Standar	SN Ratio
1	20mm	Dados	Bolas	---	3374	3324	3249	3198	3286,25	78,1040972	32,4805356
2	20mm	Dados	En Y	---+	3274	3223	3148	3098	3185,75	78,1040972	32,2107575
3	20mm	Mandriles	Bolas	--+	3173	3223	3048	2998	3110,5	105,079335	29,4262578
4	20mm	Mandriles	En Y	---+	3073	3023	2948	2898	2985,5	77,7281588	31,6887739
5	31mm	Dados	Bolas	++--	3348	3298	3223	3173	3260,5	77,7281588	32,4541165
6	31mm	Dados	En Y	+++	3248	3198	3123	3073	3160,5	77,7281588	32,1835483
7	31mm	Mandriles	Bolas	+++	3148	3092	3023	2973	3059	76,815797	32,0025787
8	31mm	Mandriles	En Y	+++	3048	2998	2923	2873	2960,5	77,7281588	31,6157337

Cube Plot

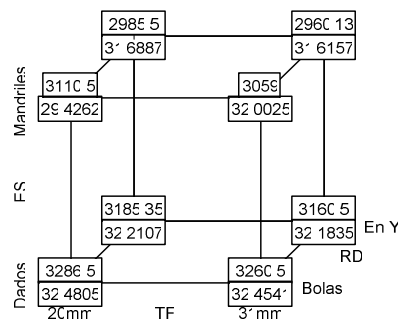


Figura 0.3 Gráfico de cubo del experimento factorial para 21kg.

	TF	ES	RD	Pattern	--	-+	+ -	++	Mean	Desviación Standar	SN Ratio
1	20 mm	DADOS	DE BOLAS	---	7846	7610	7256	7020	7433	366,876909	26,1328751
2	20 mm	DADOS	DE BOLAS EN Y	---+	7374	7138	6784	6548	6961	366,876909	25,5630251
3	20 mm	MANDRILES	DE BOLAS	--+	6902	6666	6312	6076	6489	366,876909	24,9531479
4	20 mm	MANDRILES	DE BOLAS EN Y	--++	6430	6194	5840	5604	6017	366,876909	24,2971927
5	31 mm	DADOS	DE BOLAS	+++	7728	7492	7138	6902	7315	366,876909	25,993879
6	31 mm	DADOS	DE BOLAS EN Y	+++	7256	7020	6666	6430	6843	366,876909	25,4145232
7	31 mm	MANDRILES	DE BOLAS	+++	6784	6548	6194	5958	6371	366,876909	24,7937445
8	31 mm	MANDRILES	DE BOLAS EN Y	+++	6312	6076	5722	5486	5899	366,876909	24,1251603

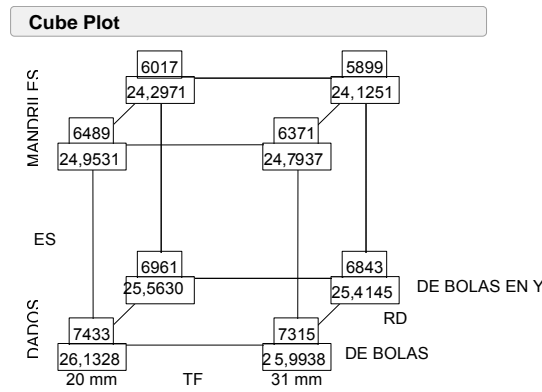


Figura 0.4 Gráfico de cubo del experimento factorial para 18kg.

	TF	ES	RD	Pattern	--	-+	+ -	++	Mean	Desviación Standar	SN Ratio
1	20 mm	DADOS	DE BOLAS	---	22966	23908	25322	26264	24615	1464,93458	24,5076322
2	20 mm	DADOS	DE BOLAS EN Y	---+	24851	25793	27206	28149	26499,75	1464,77379	25,1494243
3	20 mm	MANDRILES	DE BOLAS	--+	26735	27678	29091	30033	28384,25	1464,77379	25,7461373
4	20 mm	MANDRILES	DE BOLAS EN Y	--++	28620	29562	30976	31918	30269	1464,93458	26,3035968
5	31 mm	DADOS	DE BOLAS	+++	23437	24379	25793	26735	25086	1464,93458	24,6722637
6	31 mm	DADOS	DE BOLAS EN Y	+++	25322	26264	27678	28620	26971	1464,93458	25,3015763
7	31 mm	MANDRILES	DE BOLAS	+++	27206	28149	29562	30504	28855,25	1464,77379	25,8890856
8	31 mm	MANDRILES	DE BOLAS EN Y	+++	29091	30033	31447	32389	30740	1464,93458	26,4377126

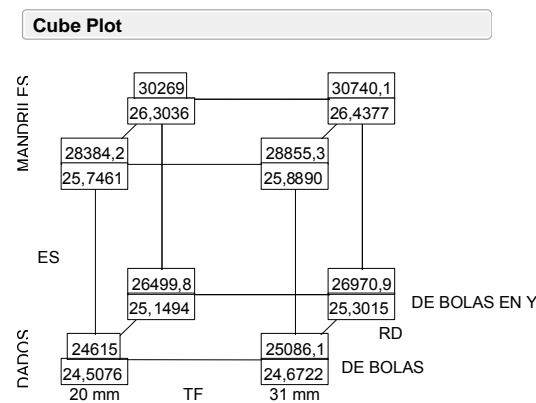


Figura 0.5 Gráfico de cubo del experimento factorial para 14kg.

1.14.1.1 Análisis de significancia

Una forma de analizar la significancia de los efectos de los factores en el resultado o salida es a través de un diagrama de Pareto.

Para el este caso los resultados son los siguientes:

$$Intercept = \frac{\sum mean \times signofact}{8} = \frac{3286,25 + 3185,75 + 3110,5 + 2985,5 + 3260,5 + 3160,5 + 3059 + 2960,5}{8} = 3126,0625$$

(Ec.4.6)

$$TF = \frac{\sum mean \times signofact}{8} = \frac{-3286,25 - 3185,75 - 3110,5 - 2985,5 + 3260,5 + 3160,5 + 3059 + 2960,5}{8} = -15,9375$$

(Ec.4.7)

$$ES = \frac{\sum mean \times signofact}{8} = \frac{-3285,25 - 3185,75 + 3110,5 + 2985,5 - 3260,5 - 3160,5 + 3059 + 2960,5}{8} = -97,1875$$

(Ec.4.8)

$$RD = \frac{\sum mean \times signofact}{8} = \frac{-3285,25 + 3185,75 - 3110,5 + 2985,5 - 3260,5 + 3160,5 - 3059 + 2960,5}{8} = -53$$

(Ec.4.9)

Parameter Estimates

Term	Estimate
Intercept	3126,0625
TF[20mm]	15,9375
ES[Dados]	97,1875
RD[Bolas]	53

Tabla 0.15 Parámetros estimados para 21kg.

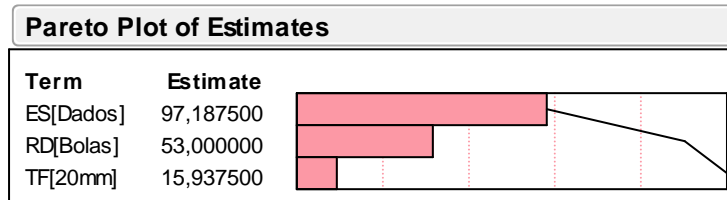


Figura 0.6 Diagrama de Pareto de los efectos estimados para 21 kg.

Parameter Estimates

Term	Estimate
Intercept	6666
TF[20 mm]	59
ES[DADOS]	472
RD[DE BOLAS]	236

Tabla 0.16 Parámetros estimados para 18kg.

Pareto Plot of Estimates

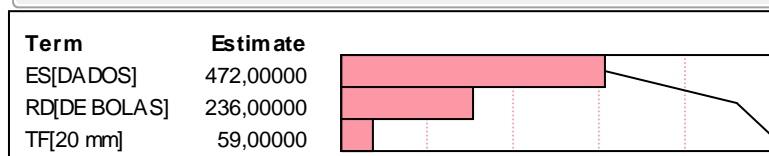


Figura 0.7 Diagrama de Pareto de los efectos estimados para 18 kg.

Parameter Estimates

Term	Estimate
Intercept	27677,531
TF[20 mm]	-235,5313
ES[DADOS]	-1884,594
RD[DE BOLAS]	-942,4063

Tabla 0.17 Parámetros estimados para 14kg.

Pareto Plot of Estimates

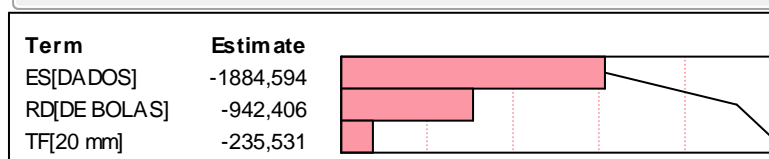


Figura 0.8 Diagrama de Pareto de los efectos estimados para 14 kg.

De los dos gráficos se concluye que el efecto que tiene el tipo de elemento de sujeción en la respuesta del número de ciclos es aquel tiene mayor importancia, es decir es el efecto de mayor significancia.

Se observa además que el efecto del tipo de rodamiento en la respuesta ciclo se acerca es también significativa, mientras que el efecto del diámetro del sistema de

transmisión de fuerza es bajo y puede ser considerado estadísticamente no significativo.

1.14.1.2 Análisis del diseño factorial

Del análisis del diseño factorial se obtienen los coeficientes de parámetros estimados los que permiten establecer los siguientes modelos matemáticos:

$$\text{Ciclos} = 3126,0625 - 15,9375(\text{TF}) - 97,1875 (\text{ES}) - 53 (\text{RD})$$

$$\text{Ciclos} = 6666 - 59(\text{TF}) - 472 (\text{ES}) - 236 (\text{RD})$$

$$\text{Ciclos} = 27677,531 + 235,5313 (\text{TF}) + 1884,594 (\text{ES}) + 942,4063 (\text{RD})$$

1.14.1.3 Análisis del factor señal/ruido

De las siguientes figuras del factor señal/ruido se puede indicar que los factores influyen en los resultados de manera independiente, y lo que se puede recomendar para obtener una mejor respuesta es la combinación diámetro del sistema de transmisión de fuerza en 31mm, tipo de rodamiento Bolas en Y y tipo de elemento de sujeción Mordazas.

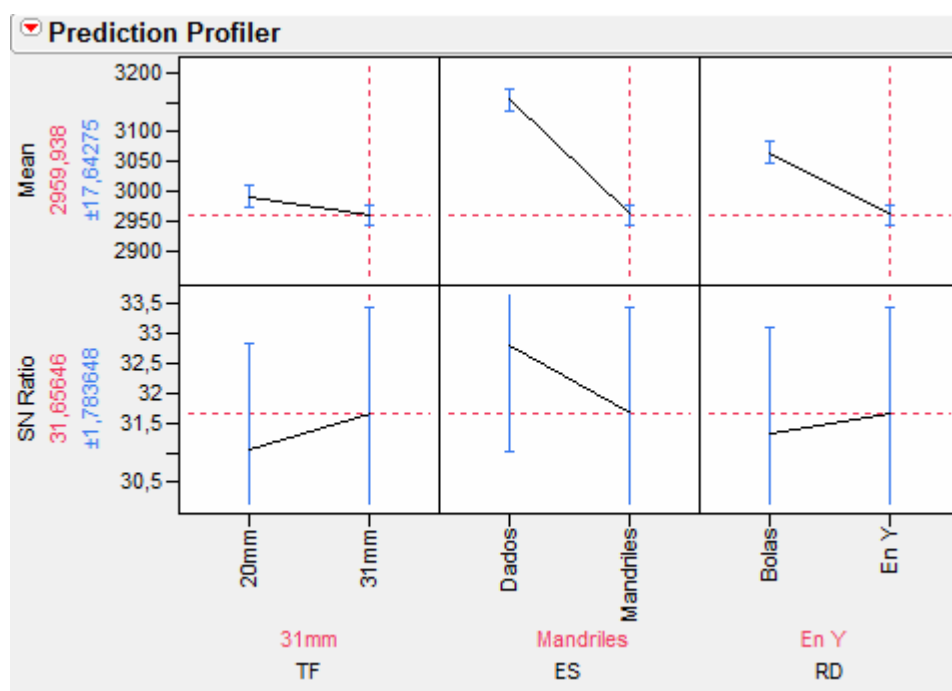


Figura 0.9 Análisis del factor señal/ruido para 21 kg.

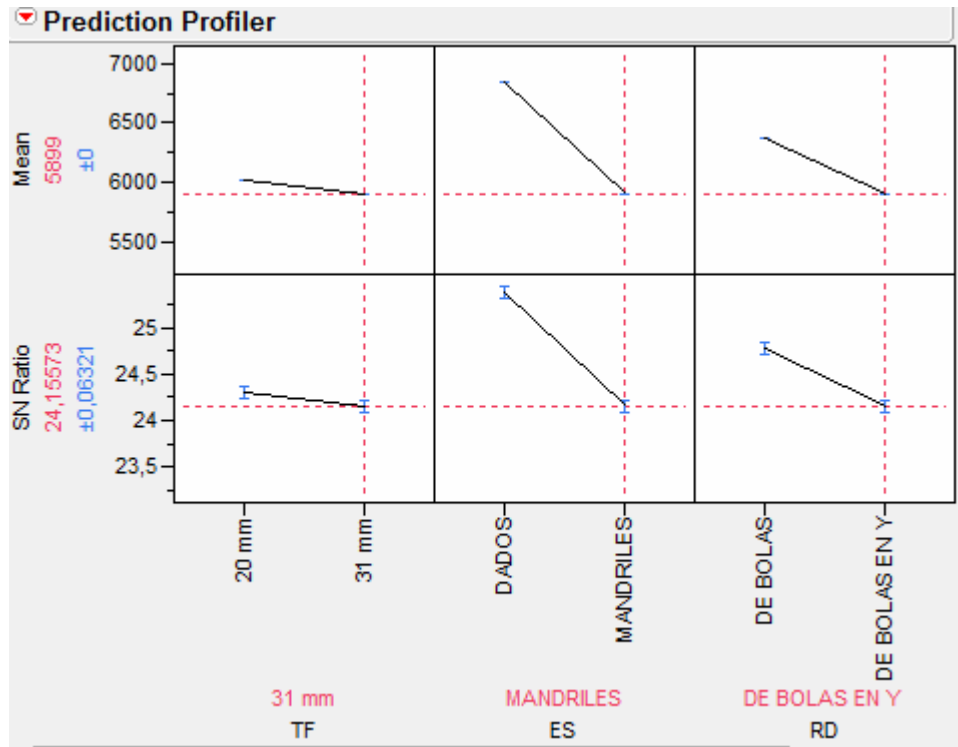


Figura 0.10 Análisis del factor señal/ruido para 18 kg.

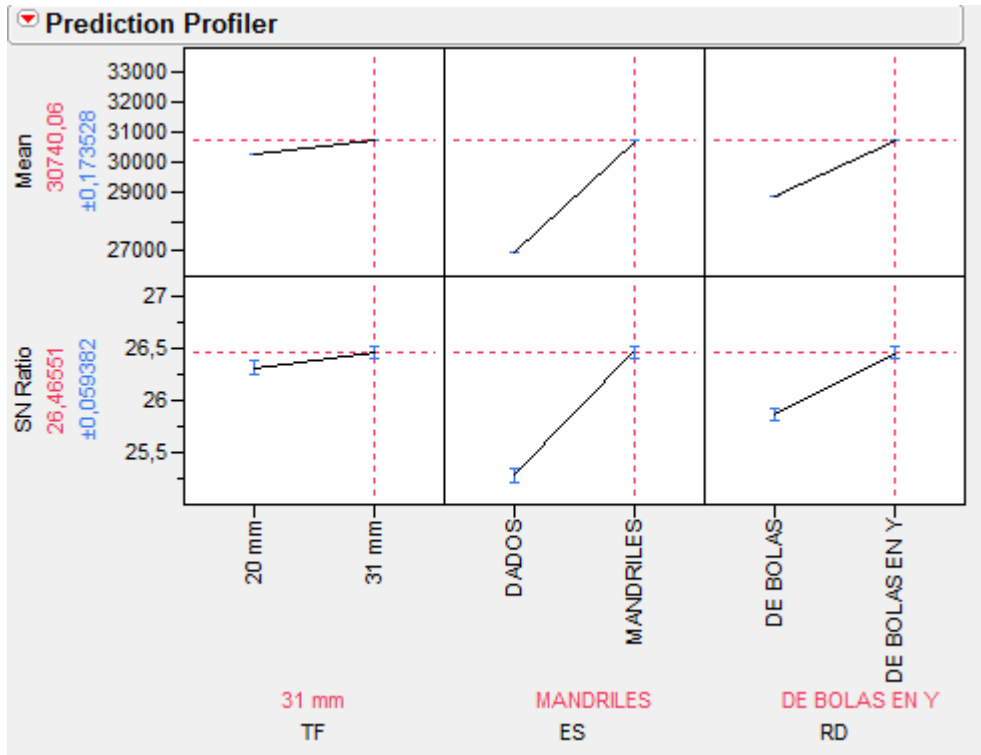


Figura 0.11 Análisis del factor señal/ruido para 14 kg.

1.15 DISEÑO DE TOLERANCIAS DE LA MÁQUINA DE FATIGA DE ENSAYOS VIGA ROTATORIA

El diseño de tolerancias es una parte crítica en todo el proceso debido a que cualquier decisión que se tome en esta fase influirá de manera directa en los costos y calidad del producto. Los resultados obtenidos del diseño de parámetros nos permite establecer cuales son los componentes críticos de la máquina a diseñar y por ende en cuales debemos establecer tolerancias más estrechas.

1.15.1 CÁLCULO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA MÁQUINA

Previo al establecimiento de las tolerancias se desarrollará los cálculos de diseño y selección de cada componente de la máquina de ensayo de fatiga de viga rotatoria.

1.15.1.1 Diseño del eje

El diseño del eje se lo realiza en condiciones de trabajo a fatiga. El material con el cual se trabaja es *ACERO DE TRANSMISION 4340* debido a que cumple con las características primordiales que debe tener un eje sometido a este tipo de esfuerzos fluctuantes.

Las propiedades del Acero 4340 son: $S_{ut} = 250kpsi$ y $S_y = 230kpsi$ ⁴¹

Para el diseño del eje se considera los diferentes factores que afectan al valor del Límite de Resistencia a la Fatiga.

$$S_e = S_e' \times k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_f \quad (\text{Ec.4.10})$$

Donde:

S_e = Límite de resistencia a la fatiga

$$S_e' = 100kpsi \quad ^{42}$$

⁴¹ Robert L Norton, Diseño de Máquinas, Prentice Hall, México, 1999, Tab C-10, pág 999.

⁴² Idem 41, Ecu 6.5a, pág. 373.

Factores de corrección	Valor
k_a = Factor de acabado superficial	$k_a = 0,74$ ⁴³
k_b = Factor de tamaño	$k_b = 0,869d^{-0,097}$ ⁴⁴
k_c = Factor de confiabilidad	$k_c = 0,753$ ⁴⁵
k_e = Factor de concentración de esfuerzos	$k_e = 1$
k_d = Factor de temperatura	$k_d = 1$
k_f = Factor de varios efectos	$k_f = 1$

Tabla 0.18 Valores de los factores que influyen en el límite a la fatiga

$$S_e = 100 \times 0,74 \times 0,869d^{-0,097} \times 0,753 \times 1 \times 1 \times 1$$

$$S_e = 48422,418d^{-0,097}$$

El diagrama de cuerpo libre, del eje de la máquina de ensayos de fatiga es el siguiente:

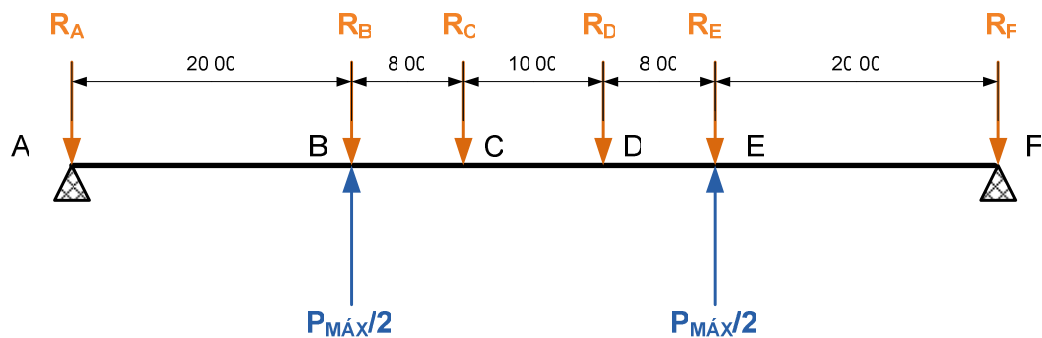


Figura 0.12 Diagrama de cuerpo libre del eje de la máquina de ensayos de fatiga.

Donde,

R_A = Reacción debido al rodamiento externa y chumacera fija

R_B = Reacción debido al rodamiento interno y chumacera flotante

⁴³ Idem 41, Fig 6-26, pág. 378.

⁴⁴ Idem 41, Ecu 6.7b, pág. 376.

⁴⁵ Idem 41, Tab 6-4, pág. 381.

R_C = Reacción debido al sistema de sujeción

R_D = Reacción debido al sistema de sujeción

R_E = Reacción debido al rodamiento interno y chumacera flotante

R_F = Reacción debido al rodamiento externa y chumacera fija

La carga máxima para la cual se diseña la máquina es $P_{MAX} = 300\text{kgf}$, este valor se obtiene del desarrollo del QFD en el cual se establece que se debe alcanzar los niveles de la competencia tal como lo es la máquina de ensayos de fatiga de la ESPE.

El total del peso del ensayo esta soportado por los rodamientos internos y chumaceras flotantes y cada uno soporta la mitad del mismo, esta carga es transmitida a los extremos de la probeta para la realización del ensayo. Los rodamientos externos soportan la misma magnitud de la carga que los rodamientos internos. El peso de las chumaceras flotantes y del sistema de sujeción son despreciables, debido a que en los ensayos son tomados como precarga.

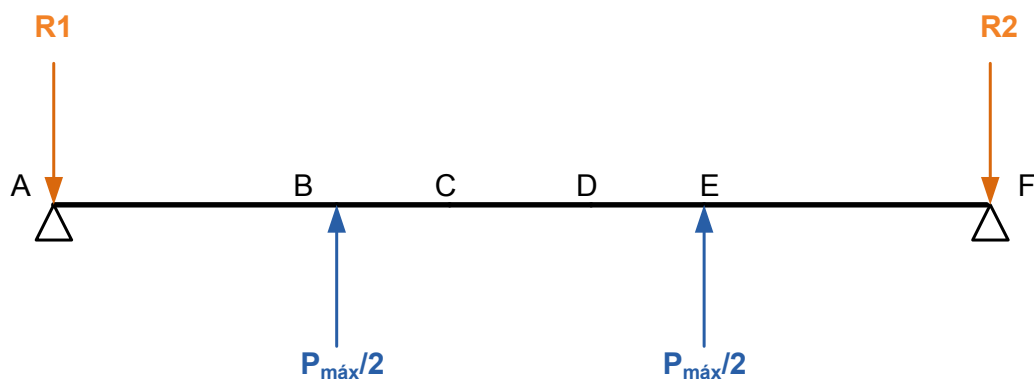


Figura 0.13 Diagrama de reacciones sobre el eje de la máquina de ensayos de fatiga.

De donde obtenemos:

$$R_1 = R_2 = \frac{P_{MÁX}}{2} \text{ (Ec.4.11)}$$

El diagrama de fuerzas cortantes de la máquina de ensayos de fatiga es el siguiente:

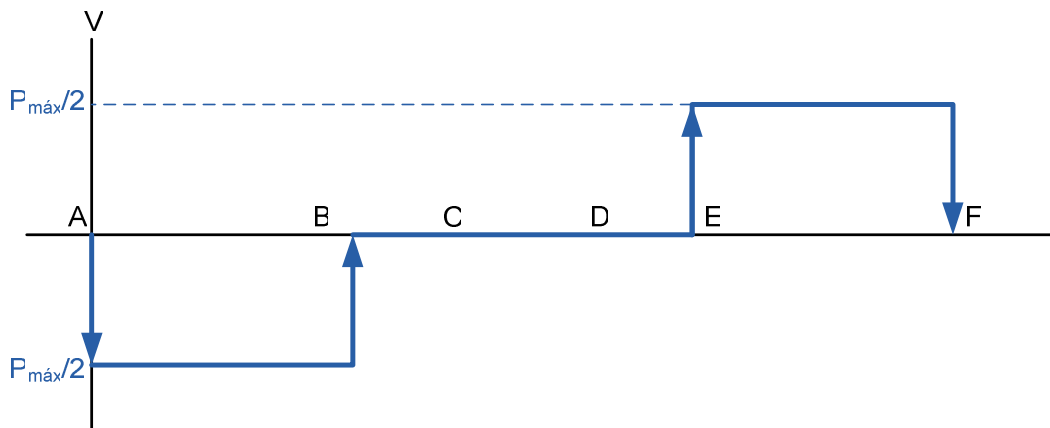


Figura 0.14 *Diagrama de fuerzas cortantes.*

El diagrama de momentos de la máquina de ensayos de fatiga es el siguiente:

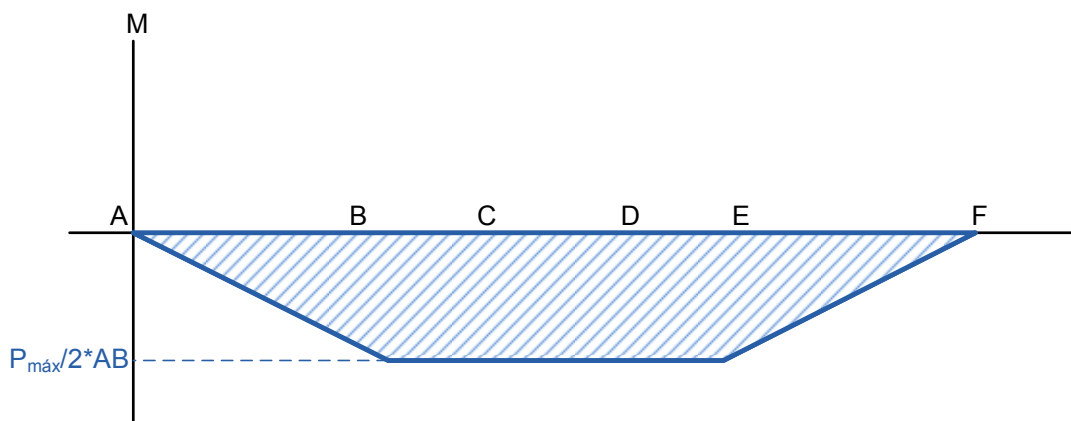


Figura 0.15 *Diagrama de momentos*

$$M_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{2} \times \overline{AB} \quad (\text{Ec.4.12})$$

$$M_{MAX} = \frac{300\text{kgf}}{2} \times 200\text{mm}$$

$$M_{MAX} = 30\text{kgf} \cdot \text{m}$$

$$M_{MAX} = 2603,89\text{lb} \cdot \text{in}$$

$$\sigma_{MAX} = \frac{30M}{\pi d^3} \quad (\text{Ec.4.13})$$

$$\sigma_{MAX} = \sigma_a$$

$$n = \frac{S_e}{\sigma_a} \quad (\text{Ec.4.14})$$

$$n = \frac{48422,418d^{-0,097}}{\frac{32 \times 2603,89}{\pi d^3}}$$

$$n = 1,825678d^{2,903}$$

n	d (in)	d (mm)
2,00	1,032	26,211
2,25	1,075	27,296
2,50	1,114	28,305
2,75	1,152	29,249
3,00	1,187	30,139
3,25	1,220	30,982
3,50	1,251	31,783
3,75	1,281	32,548

Tabla 0.19 Diámetros calculados en función del factor de seguridad.

Debido a los resultados que se obtuvieron del diseño de parámetros el eje es un componente fundamental de la máquina de ensayos de fatiga por lo cual se trabaja con un factor de seguridad de 3.5, de lo cual se obtiene que el diámetro del eje es de **d = 1,25in**.

1.15.1.2 Selección de los rodamientos

La selección correcta de los rodamientos es esencial para obtener un diseño robusto de la máquina, por lo cual nos basaremos en un catálogo general de estos elementos.

Lo primero que se calculará será la carga radial equivalente P, que proporciona el mismo efecto sobre la vida del rodamiento que las cargas aplicadas.

$$P = XF_r + YF_a \left(\frac{F_a}{F_r} \right)^e \quad (\text{Ec.4.15})$$

$$P = F_r \left(\frac{F_a}{F_r} \right)^e \quad (\text{Ec.4.16})$$

Donde:

F_r = es la carga radial que se aplica sobre el rodamiento

F_a = es la carga axial que se aplica sobre el rodamiento

e = valor de referencia variable.

X e Y son valores adimensionales que varían para cada tipo de rodamiento

En nuestro caso el valor de la carga radial es $F_r = 1,5kN$

Según las recomendaciones del manual se estima que la $F_a = 0,2 F_r$

$$F_a = 0,3kN$$

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{0,3}{1,5} = 0,2$$

El valor de $\frac{F_a}{F_r}$ es menor al de la tabla 4.4 por lo cual utilizaremos la ecuación

$$P = F_r \left(\frac{F_a}{F_r} \right)^e$$

$$P = 1,5kN$$

Factores para el cálculo de los rodamientos en Y de bolas Juego Normal			
Fa/C0	e	X	Y
0,025	0,22	0,56	2
0,04	0,24	0,56	1,8
0,07	0,27	0,56	1,6
0,13	0,31	0,56	1,4
0,25	0,37	0,56	1,2
0,5	0,44	0,56	1

Tabla 0.20 Factores para el cálculo de los rodamientos en Y de bolas.⁴⁶

⁴⁶ www.skf.com

Las horas de servicio recomendadas para nuestra clase de máquina son

$$L_{10h} = 10000$$

Clases de máquinas	L10h horas de servicio
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, aparatos para uso médico.	300 a 3 000
Máquinas usadas intermitente o por cortos períodos: Máquinas-herramienta portátiles, aparatos elevadores para talleres, máquinas para la construcción.	3 000 a 8 000
Máquinas para trabajar con alta fiabilidad de funcionamiento por cortos períodos o intermitentemente: Ascensores, grúas para mercancías embaladas.	8 000 a 1 2000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario no totalmente utilizadas: Transmisiones por engranajes para uso general, motores eléctricos para uso industrial, machacadoras giratorias.	10 000 a 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario totalmente utilizadas: Máquinas-herramientas, máquinas para trabajar la madera, máquinas para la industria mecánica general, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipo de imprenta, separadores y centrífugas.	20 000 a 30 000
Máquinas para trabajo continuo, 24 horas al día: Cajas de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil.	40 000 a 50 000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas cableadoras, maquinaria de propulsión para transatlánticos.	60 000 a 100 000
Maquinaria eléctrica de gran tamaño, centrales eléctricas, ventiladores y bombas para minas, rodamientos para la línea de eje de transatlánticos.	100 000

Tabla 0.21 *Horas de servicio recomendadas para diferentes clases de máquinas.*

Conociendo la carga equivalente y la vida estimada en millones de revoluciones entonces calculamos la capacidad de carga dinámica con la cual seleccionamos los rodamientos.

$$n = 1725 \text{ rpm}$$

$$p = 3$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (\text{Ec.4.17})$$

Donde,

L_{10} = es la vida estimada en millones de revoluciones

C = es la capacidad de carga dinámica

P = es la carga equivalente sobre el rodamiento, se calcula en función de las cargas radiales y axiales que afectan al rodamiento. Su fórmula depende del tipo de rodamiento a utilizar

p = es 3 para los rodamientos de bolas y $10/3$ para los rodamientos de rodillos. La vida nominal puede expresarse en otras unidades más adecuadas al problema que se analiza. De esta forma se tiene:

$$\frac{C}{P} = 10^{47}$$

$$L_{10 \text{ millones de revoluciones}} = 1000^{48}$$

$$C = P \left(L_{10}^{1/p} \right)$$

$$C = 1,5 \left(1000^{1/3} \right)$$

$$C = 15 \text{ kN}$$

Por lo tanto se selecciona el rodamiento en Y de bolas tipo YAR 207-104-2RF, con una capacidad de carga dinámica de $C = 25,5 \text{ KN}$ como se puede observar en el anexo 4. La desalineación permitida de estos rodamientos es de 4° .

1.15.1.3 Selección del motor eléctrico

La selección del motor depende de los requerimientos del ensayo y como ya se indicó anteriormente se requiere una velocidad de 1725 rpm para la realización

⁴⁷ Catálogo General de la SKF; Pag 29

⁴⁸ Idem 45.

del ensayo, en base a esta característica se selecciona un motor AC de 1/3 HP, con una velocidad de 1800 rpm y un peso de 23.2lb de la marca ELECTRIM Motors cuyas especificaciones técnicas se muestran en el anexo 4.

1.15.1.4 Selección del acoplamiento flexible

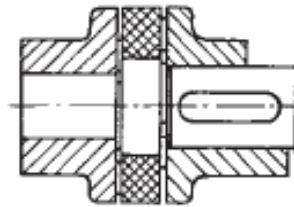


Figura 0.16 Acople flexible

Para transmitir el par del eje del motor al eje de la máquina de fatiga de viga rotatoria utilizaremos un acoplamiento flexible debido a que este absorbe y amortigua las irregularidades del par, permite una construcción más ligera, con tolerancias mayores y por tanto, con mayor economía. Además evita la transmisión de esfuerzos axiales que es una característica primordial para el funcionamiento de la máquina.

La selección de un acoplamiento flexible implica los parámetros siguientes:

- Par nominal a transmitir.
- Coeficiente de seguridad

El par nominal es el factor principal de dimensionamiento de los acoplamientos de los ejes y de las máquinas directamente conectadas a ellos.

El par nominal a transmitir es función de la potencia nominal a transmitir y de la velocidad de rotación.

$$T(m.N) = \frac{7160 \times P(hp)}{n(rpm)} \quad (\text{Ec.4.18})$$

$$T(m.N) = \frac{7160 \times 0.3(hp)}{1725(rpm)}$$

$$T(m.N) = 1.3836$$

En la determinación del par nominal del acoplamiento, hay que tener en cuenta el coeficiente de seguridad que depende de los siguientes factores:

- Las irregularidades del par debidas a los diferentes tipos de máquinas motrices y receptoras (K1),
- Las frecuencias de arranque (K2),
- El número de horas de funcionamiento por día (K3).

El producto K de estos 3 coeficientes K1, K2, K3, se denomina coeficiente de seguridad o factor de carga.

$$K = K_1 \times K_2 \times K_3 \quad (\text{Ec.4.19})$$

$$K_1 = 1,2$$

$$K_2 = 1,1$$

$$K_3 = 0,9$$

El par nominal del acoplamiento es por tanto,

$$T_n = T \times K \quad (\text{Ec.4.20})$$

$$T_n = 1,3836 \times 1,2$$

$$T_n = 1,66032 \text{ m.N}$$

Con los valores obtenidos se selecciona el acoplamiento 24/32 de aluminio de la marca de Trasco Flexing Coupling debido a sus dimensiones de montaje y a la vez cumple las especificaciones de diseño. Las características técnicas de este acoplamiento se presentan en el Anexo 4.

1.15.1.5 Diseño del eje de carga

El diseño del eje es estático. El material con el cual se trabaja es *ACERO AL CARBONO 1045* debido a que cumple con los requerimientos para su función.

Las propiedades del Acero 1045 son: $S_{ut} = 230 \text{ kpsi}$ y $S_y = 220 \text{ kpsi}$ ⁴⁹

En los siguientes diagramas se muestra las fuerzas que actúan sobre el eje de carga.

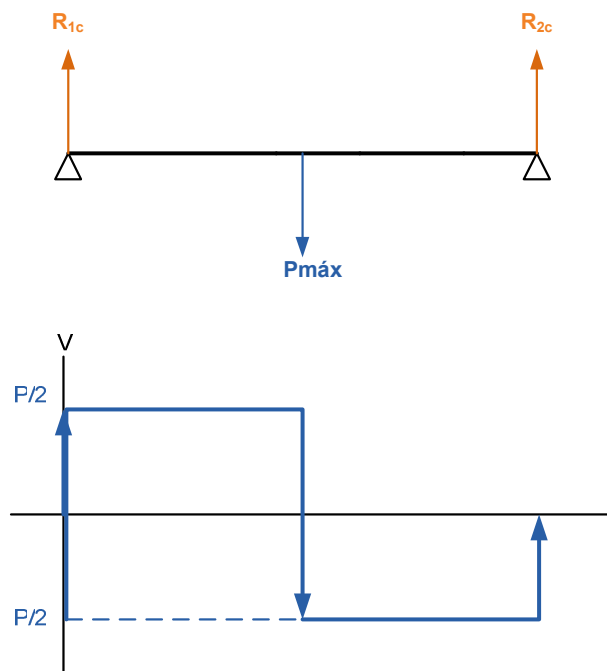


Figura 0.17 Diagrama de cuerpo libre y cortante del eje de carga.

El momento máximo que soporta el eje es:

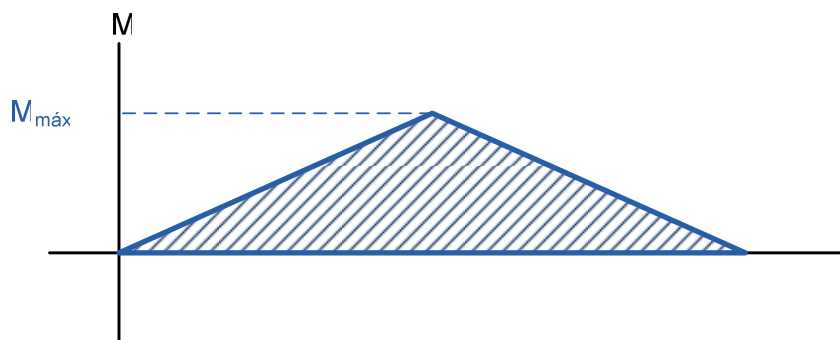


Figura 0.18 Diagrama de momentos para el eje de carga.

⁴⁹ Robert L Norton, Diseño de Máquinas, Prentice Hall, México, 1999, Tab C-10, pág. 999.

$$M_{MAX} = \frac{P}{2} x d \quad (\text{Ec.4.21})$$

$$M_{MAX} = 1688,976 \text{ lbf} - \text{in}$$

$$\sigma_x = \frac{32 x M}{\pi x d^3} \quad (\text{Ec.4.22})$$

$$\sigma_x = \frac{32 x 1688,976}{\pi x d^3}$$

$$\sigma_x = \frac{32 x 1688,976}{\pi x d^3}$$

$$\sigma_x = \frac{17203,77}{d^3}$$

$$\sigma_x = \sigma$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma} \quad (\text{Ec.4.23})$$

$$n = \frac{220 x d^3}{17,203}$$

$$n = 12,78 d^3$$

n	d (in)	d (mm)
1,00	0,428	10,864
1,25	0,461	11,703
1,50	0,490	12,436
1,75	0,515	13,092
2,00	0,539	13,688
2,25	0,560	14,236
2,50	0,581	14,745
2,75	0,599	15,221
3,00	0,617	15,669
3,25	0,634	16,092
3,50	0,649	16,495
3,75	0,665	16,879
4,00	0,679	17,246

Tabla 0.22 Diámetros del eje de carga calculados en función del factor de seguridad.

El eje de carga trabaja con un factor de seguridad de 2,5, de lo cual se obtiene que el diámetro del eje es de **$d = 0,581\text{in}$** .

1.15.1.6 Selección del sistema de sujeción

Uno de los puntos críticos en el diseño de la máquina de fatiga de viga rotatoria es el sistema de sujeción, este debe presentar características de autocentramiento, ya que contribuye a disminuir la presencia de fenómenos de desalineamiento, desbalanceo y excentricidad además de evitar la presencia de fuerzas axiales.

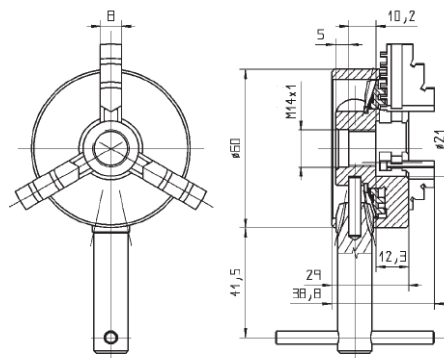


Figura 0.19 *Mordazas de sujeción.*

De acuerdo con los requerimientos que debe cumplir el sistema de sujeción se selecciono Mandriles (chucks) Autocentrantes de 3 Mordazas duras reversibles, de acero que tiene un diseño compacto marca BISON de un diámetro de 2-1/3" y tipo de montura M14 x 1, como se muestra en el catalogo del anexo 4.

1.15.1.7 Diseño de la placa soporte

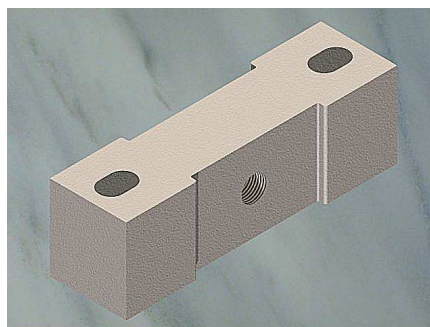


Figura 0.20 *Placa Soporte.*

La placa soporte es aquella donde se monta el eje de carga, es la unión entre el eje y las chumaceras.

$$P = 150\text{kgf} = 330\text{lb}$$

$$\sigma = \frac{P}{A_{\text{apoyo}}} \quad (\text{Ec.4.24})$$

$$\sigma = \frac{330}{0.837} = 394.26 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} = 0.394\text{kpsi}$$

$$A_{\text{apoyo}} = l * d = 36 * 15 = 540\text{mm}^2 = 0.837\text{in}^2$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{36}{0.394} = 91.37$$

(Material acero A36)

1.15.1.8 Diseño de la estructura soportante

Las cargas que soporta la estructura son de acción puntual. Para el análisis de la estructura se utilizó el programa SAP V9 y se lo hizo en el caso más extremo, es decir cuando soporta un peso de 300kgf.

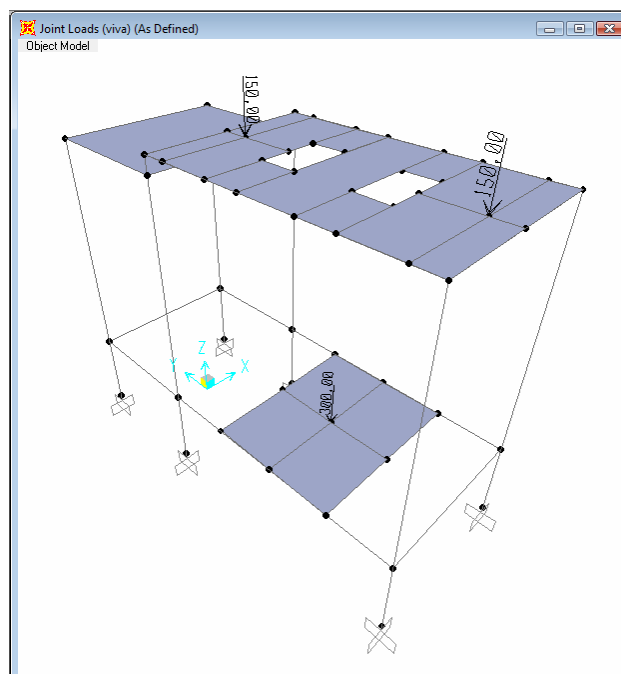


Figura 0.21 Estructura Soportante.

El SAP V9 nos proporciona toda la información sobre las reacciones que actúan sobre la plataforma en ese momento y los diagramas de momentos y fuerza cortante sobre la plataforma.

La información de de este análisis se encuentra en el anexo 5.

En el diseño de la plataforma se selecciono como elemento estructural tubos cuadrados de 50x50 mm con espesor de 3mm y rectangulares de 100x50 mm con 5 mm de espesor, todos los elementos son de acero estructural.

Para comprobar que el diseño es el adecuado y que los elementos estructurales escogidos son los correctos calculamos el factor de seguridad del elemento más crítico que para nuestro caso es el frame N° 46. y analizamos deformación en la junta N° 70.

$$\Delta_{m\acute{a}x} = 0.034763mm \text{ (Anexo5)}$$

$$\Delta_{admisible} = \frac{Luz}{360} = \frac{800}{360} = 2.222mm$$

$$\Delta_{m\acute{a}x} < \Delta_{admisible}$$

Por tanto la deformación que sufra la estructura esta dentro de los límites establecidos.

DATOS: (Anexo5)

$$M_{m\acute{a}x} = 15645,44 \text{ kgf-mm} = 1357,96 \text{ lb-in}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 4694,82 \text{ kgf-mm} = 407,49 \text{ lb-in}$$

$$I = 2,69 \text{ in}^4 \quad c = 1,418 \text{ in}$$

$$J = 2,08 \text{ in}^4$$

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad (\text{Ec.4.24})$$

$$\sigma = \frac{1357,96 * 1,418}{2,69} = 715,83 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} = 0,7158 \text{ kpsi}$$

$$\tau = \frac{T * r}{J} \quad (\text{Ec.4.25})$$

$$\tau = \frac{407,49 * 1,418}{2,08} = 277,79 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} = 0,2778 \text{kpsi}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (\text{Ec.4.26})$$

$$\sigma_T = \sqrt{0,7158^2 + 3 * 0,2778^2} = 0,8624 \text{kpsi}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{32,34}{0,8624} = 37,38$$

1.15.1.9 Selección del sistema de carga

El sistema de carga consta de una barra de carga en la cual dependiendo del caso se coloca los pesos que son de 5 y 10 kg, o se acopla a la gata hidráulica, cuando se desee realizar ensayos para cargas mayores a 30kg.

Los pesos de 5 y 10 kg son fabricados en fundición. Y la gata hidráulica es de capacidad máxima de 1Ton, debido a que este valor sobrepasa nuestros requerimientos es adecuado, consta de un manómetro para poder regular la carga en el ensayo.

1.15.2 TOLERANCIAS DE LA MÁQUINA

Seleccionados y diseñados todos los componentes de la máquina de ensayo de fatiga de viga rotatoria, se procede a establecer las tolerancias, teniendo en cuenta los procesos de fabricación y montaje.

1.15.2.1 Tolerancias del eje 1 y eje 2

Se establece el número del grado de rugosidad en N6 debido a que el proceso que se utiliza para la fabricación de este eje, es por medio de un torneado con herramienta de acero rápido y fresado para el chavetero teniendo un valor promedio de rugosidad de 0,8µm.

La tolerancia dimensional general se establece en ±0,1mm y para ciertas dimensiones comprometidas en el ensamblaje se determina ajustes.

El eje 2 difiere del eje 1 en que no tiene chavetero ya que no se une al acople flexible pero mantiene las mismas tolerancias.

1.15.2.2 Tolerancias del eje de carga

Al no ser un componente crítico de la máquina se establece el número del grado de rugosidad en N8 debido a que este componente no requiere de un mayor acabado superficial por la función que cumple, teniendo un valor promedio de rugosidad de $3,2 \mu\text{m}$.

La tolerancia dimensional general se establece en un valor de $\pm 0,5\text{mm}$ porque una variación en las dimensiones no afecta al cumplimiento de su función.

1.15.2.3 Tolerancias de la placa - carga

La placa carga es el elemento de conexión entre las chumaceras de los rodamientos flotantes y el eje de carga, se fabrica por medio de fundición, pero se llega a obtener las dimensiones de diseño por medio de un proceso de fresado por lo que se obtiene un número del grado de rugosidad en N7, teniendo un valor promedio de rugosidad de $1,6\mu\text{m}$ en la superficie.

La tolerancia dimensional general se establece en un valor de $\pm 0,5\text{mm}$ ya que no representa un elemento de precisión.

1.15.2.4 Tolerancias de las placas de la estructura

El proceso de fabricación de las placas es por oxicorte pero a la vez se mantiene el proceso de manufactura precedente obteniendo un número del grado de rugosidad de N9, con un valor promedio de rugosidad de $6,3\mu\text{m}$.

La tolerancia dimensional general de las placas es de $\pm 1\text{mm}$ porque no se requiere de exactitud en sus dimensiones de diseño.

1.15.2.5 Tolerancias del soporte

El soporte es el elemento en cual se coloca la carga y la transmite, cualquier variación en sus dimensiones no afecta al cumplimiento de la función designada, lo cual no implica exactitud en sus dimensiones, ni acabados superficiales de alta calidad por lo que se establece un grado de rugosidad basto y N9.

En el anexo 7 se presentan los planos de diseño de la máquina, en los que se especifica las tolerancias a utilizar.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo de este capítulo es presentar las conclusiones obtenidas luego de finalizado la implantación de la Ingeniería Concurrente, así como también señalar algunas recomendaciones a considerar en la implementación de esta filosofía.

1.16 CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

1. La Ingeniería Concurrente es una metodología integrada para la manufactura de productos que involucra al mismo tiempo varias unidades funcionales de una organización logrando de esta manera mejores resultados en costo, tiempo y satisfacción de los clientes, en relación al Diseño Tradicional.
2. La Ingeniería Concurrente es una metodología que es aplicada en todo el ciclo de vida de un producto y está apoyada de manera intensa en tecnologías de información y sistemas informáticos.
3. La implantación de la Ingeniería Concurrente, como todo cambio organizacional, tiene limitaciones.
4. La Ingeniería Concurrente utiliza un conjunto de herramientas de distinto tipo, que tienen su aplicación específica en cada una de las etapas de implantación.
5. El Diseño Robusto es una herramienta de la Ingeniería Concurrente que permite obtener productos que mantienen sus características funcionales ante la presencia de factores externos que pueden afectarlo. La aplicación de esta herramienta se ve limitado en este caso en particular debido a los costos de la etapa de experimentación, por lo cual fue necesario realizar análisis de los productos desarrollados por la competencia para tener una estimación de los resultados.

6. Las técnicas de Taguchi son herramientas estadísticas que permiten visualizar lo que un producto puede estar causando en pérdidas tanto para la organización como para la sociedad, como efecto de la variabilidad que presentan.
7. La reducción o eliminación de los factores de ruido facilitan la obtención de un producto de mejor calidad, esto en el presente proyecto posibilita generar ensayos de fatiga de alta confiabilidad, lo que permite prestar servicios tecnológicos de calidad a la industria.
8. El diseño de experimentos es una herramienta estadística que ayuda a determinar y/o confirmar la influencia de las variables en el resultado de un proceso. En el presente proyecto se observa la influencia de variables como: tipos de rodamientos, sistema de transmisión de fuerzas, sistema de sujeción de la probeta, forma de construcción de probeta, operario, etc. en los resultados de los ensayos de fatiga.
9. La selección del número de experimentos que se debe realizar, depende de del número de factores controlables que se consideren en la experimentación y los niveles de cada factor y está relacionada con la disponibilidad financiera y la capacidad de invertir.
10. Mediante el Despliegue de la Función de Calidad (QFD) se traduce las necesidades de los clientes en parámetros de diseño, se analiza la criticidad de los elementos y, se genera información global de las especificaciones del producto.
11. El Análisis de Modos de Fallos y Efectos (AMFE) permite valorar el grado de confiabilidad de los componentes de la máquina, a través del número de prioridad de riesgo (NPR).
12. Esta metodología puede ser aplicada en la generación de cualquier tipo de producto, sea este un bien tangible o servicio, como se demuestra en este caso aplicado al servicio de ensayos de fatiga.

1.17 RECOMENDACIONES

1. La inclusión de la Ingeniería Concurrente como asignatura de la malla curricular en la formación de Ingeniería Mecánica debe ser considerada como un proyecto prioritario para el mejoramiento profesional.
2. Se recomienda la difusión del Diseño Robusto y otras herramientas estadísticas aplicadas de tal manera que no exista aislamiento entre la Estadística y la Ingeniería.
3. Para la comprobación de los resultados de la implantación del Diseño Robusto se recomienda promover la construcción de la máquina de ensayos de fatiga según el diseño que se presenta en este trabajo de investigación.
4. Se recomienda la capacitación del recurso humano involucrado en la prestación de este servicio en el uso de metodologías y herramientas de mejoramiento de la calidad.
5. Se debe propender el uso de programas informáticos que ayuden a realizar los análisis estadísticos de los datos obtenidos en la experimentación. Esto ayudará a tomar decisiones oportunas a partir de los resultados obtenidos, sean éstos numéricos o gráficos.
6. El diseño de experimentos es recomendable para el diseño de productos en serie y para organizaciones que cuenten con los recursos económicos necesarios donde sea factible probar las diferentes combinaciones experimentales.
7. El desarrollo de todas las herramientas de la Ingeniería Concurrente es un tema que está fuera del alcance del presente proyecto y queda todavía por investigar, por lo cual se recomienda la difusión del tema en la Facultad de Ingeniería Mecánica, además de impulsar la realización de trabajos de investigación sobre el tema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS

- 1) RIBA ROMEVA C., *Diseño Concurrente*, Ediciones UPC, España, 2002.
- 2) PÉREZ R., *Caracterización y Reproducción de los requerimientos Funcionales y las Tolerancias en el diseño Conceptual*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2002.
- 3) SALVADOR CAPUZ RIZO, *Introducción al Proyecto de Producción*, Alfaomega, México, 2001.
- 4) MONDELO P. Y GREGORI E., *Ergonomía 3 Puestos de Trabajo*, Ediciones UPC, España, 1999.
- 5) JOHNSON, R., P. KUBY, *Estadística elemental*, Segunda edición, Internacional Thompson Editores, México, 1999.
- 6) SANZ Félix y LAFARGUE José, *Diseño Industrial*, Thompson Editores, España, 2002.
- 7) HODSON K. William, *Manual del Ingeniero Industrial*, Mc. Graw Hill, Tomo II, México, 1996.
- 8) MONDELO P. Y GREGORI E., *Ergonomía 1 Fundamentos*, Ediciones UPC, España, 1999; pág.22
- 9) PRAT, TORT, GRIMA, POZUETA, *Métodos Estadísticos Control y Mejora de la Calidad*, Ediciones UPC, España, 1999.
- 10) ARMBRUSTER Bernd, *Manual de Tolerancias Dimensionales y Ajustes*, EPN, Quito, 2004.
- 11) SHIGLEY Joseph E., *Diseño en Ingeniería Mecánica*, McGraw-Hill, México, 2002.

12) NORTON Robert L, *Diseño de Máquinas*, Prentice Hall, México, 1999.

13) *Catálogo General de la SKF*.

DIRECCIONES INTERNET

- 1) www.hull.ac.uk/MAPP/sandpit/content/publications/Publications.htm
- 2) www.itch.edu.mx
- 3) www.plastunivers.com
- 4) www.skf.com
- 5) www.qfdlat.com
- 6) www.enerpac.com
- 7) www.bison-bial.com
- 8) www.toolmex.com
- 9) www.dipacmanta.com
- 10) www.trasco.com
- 11) www.mini-lathe.com
- 12) www.elektrimotors.com

ANEXOS

ANEXO N°1

**PLANOS DE LAS PROBETAS PARA EL ENSAYO DE FATIGA
Y RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA**

ANEXO N° 2

QFD (DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE LA CALIDAD)

- ✓ **Anexo 2.A:** Matriz de la Casa de la Calidad
- ✓ **Anexo 2.B:** Matriz de Desarrollo del Producto
- ✓ **Anexo 2.C:** Matriz de Control de Proceso de Fabricación
- ✓ **Anexo 2.C:** Matriz de la Gama de Fabricación

ANEXO N°3

AMFE (ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS)

- ✓ **Anexo 3.A:** AMFE de Diseño de la Máquina de Ensayos de Fatiga de Viga Rotatoria
- ✓ **Anexo 3.B:** AMFE de Proceso para Ensayos de Fatiga de Viga Rotatoria

ANEXO N° 4
CATALOGOS DE ELEMENTOS MECÁNICOS

ANEXO N°5
RESULTADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL EN SAP

ANEXO N°6
ROTATING BENDING BEAM FATIGUE TESTING (BOEING)

ANEXO N°7
PLANOS DE DISEÑO DE LA MÀQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA