



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

“ANÁLISIS DEL DISEÑO MECÁNICO DE UN
TRANSFORMADOR ELÉCTRICO DE
POTENCIA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
LUIS MANUEL LUJANO CASTILLO

ASESOR:

ING. RAÚL CRUZ ARRIETA

BOSQUES DE ARAGÓN, ESTADO DE MÉXICO

2005

m. 345497



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE Luis Manuel
Lujano Castillo

FECHA: 21 Mayo 2005.

FIRMA: [Firma]

Agradecimientos:

A mi Mamá:

Por su infinito amor, por darme la vida y enseñarme a vivirla.

A mi Papá:

Por sus consejos que permitieron lograr mi más grande sueño.

A mi hijo Aketzali:

Por todos los momentos felices que pasamos juntos. Eres el motor que mueve mi vida.

A mi hija Malinalli:

La niña de mis ojos, mi princesita. Gracias por tu eterna sonrisa. Eres mi fuente de inspiración.

A mi esposa Erika:

Por su amor incondicional y por ser el amor de mi vida. Sin tu apoyo no lo hubiera logrado.

A mis Hermanos:

Por su solidaridad, por su apoyo incondicional y por seguir siempre unidos.

A mis amigos Bedolla y Yadira:

Por demostrarme que la amistad sincera todavía existe y que puedo contar con ellos, no hasta uno o hasta dos, sino hasta siempre.

A el Ing. Raúl Cruz Arrieta:

Porque además de enseñarme a ser Ingeniero, me enseñó lo más importante, ser amigo. Infinitas gracias Raúl.

Hay hombres que luchan un día y son buenos,
hay otros que luchan un año y son mejores,
hay quienes luchan muchos años y son muy buenos,
pero hay los que luchan toda la vida. Esos son los imprescindibles.

Bertold Brech.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVO	4
CAPITULO 1.	
MARCO TEORICO DE REFERENCIA	5
1.1 El proceso de diseñar	5
1.2 Una aproximación a el proceso del diseño	8
1.3 Etapas del proceso del diseño	11
1.3.1 Reconocimiento de la necesidad	12
1.3.2 Definición del problema	12
1.3.3 Reuniendo la información	14
1.3.4 Conceptualización	15
1.3.5 Evaluación	16
1.3.6 Comunicación del diseño	18
1.4 Morfología detallada del diseño	18
1.5 Consideraciones adicionales del diseño	22
1.5.1 Requisitos funcionales	23
1.5.2 Ciclo de vida	25
1.5.3 Aspectos adicionales del diseño	26
CAPITULO 2.	
EL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO Y EL DISEÑO MECÁNICO	28
2.1 El transformador en los sistemas eléctricos de potencia	28
2.2 Clasificación de los transformadores	30
2.3 Componentes de un transformador	34
2.3.1 El circuito magnético	34
2.3.2 El circuito eléctrico (devanados)	34
2.3.3 El sistema de aislamiento	37

2.3.4 Tanque y accesorios	39
2.4 Parámetros eléctricos empleados en los transformadores	40
2.5 Principios de operación del transformador monofásico	44
2.6 El diseño mecánico	45
2.7 La tecnología en el diseño mecánico	46
2.8 La economía en el diseño mecánico	48
2.8.1 Estandarización el los tamaños	48
2.8.2 Tolerancias	49
2.8.3 Búsqueda del equilibrio	50
2.8.4 Estimación de los costos	50
2.9 La seguridad y la responsabilidad legal	51
2.10 La evaluación	51
2.11 La incertidumbre	53
2.11.1 El método romano	54
2.11.2 El método de Pila del factor de seguridad	55
2.11.3 El método del esfuerzo permisible	56
2.11.4 El esfuerzo permisible por el método del factor del diseño	53
2.11.5 El método del factor de diseño estocástico	57
2.12 Factor de diseño y factor de seguridad	59
2.13 La confiabilidad	61
2.14 Esfuerzo y resistencia	63
2.15 Deflexión	68

CAPITULO 3.

DISEÑO DEL TANQUE

3.1 Desarrollo del transformador	71
3.2 Actividades del diseñador mecánico	74
3.2.1 Recepción de especificaciones de diseño	75
3.2.2 Análisis de las especificaciones de diseño	75
3.3 El diseño mecánico del transformador	76
3.3.1 Diseño mecánico de un transformador tipo acorazado	76

3.3.2 Diseño mecánico de un transformador tipo columnas	79
3.4 Selección del espesor de las paredes y la cubierta del tanque	83
3.5 Cálculo del espesor del fondo	89
3.6 Reforzamiento del tanque y la base	92
3.6.1 Selección del tamaño del refuerzo	94
3.6.2 Cálculo de la deflexión en los refuerzos	95
3.7 Ensamble de los componentes	99
3.8 Soldadura del tanque	100
3.9 Pendiente de la cubierta del tanque	105
3.10 Diseño para condiciones sísmicas	107

CAPITULO 4.

PRUEBAS Y TRANSPORTE DEL TRANSFORMADOR 111

4.1 Procedimiento de pruebas a presión para tanques de transformador	111
4.2 Preparación de la prueba	112
4.3 Prueba de deformación previa al llenado	112
4.4 Prueba de presión del tanque principal	114
4.5 Prueba de presión del tanque de expansión	116
4.6 Pruebas a los parches temporales	117
4.7 Desmantelado del transformador	118
4.7.1 Desmantelado interno	118
4.7.2 Desmantelado externo	120
4.8 Embarque en gas	122
4.9 Embarque en aceite	123
4.10 Transporte de la unidad principal	124
4.10.1 Unidades menores a 60 000 libras	125
4.10.2 Unidades mayores a 60 000 libras (excepto tipo Schnabel)	126
4.10.3 Unidades para carro tipo Schnabel	127
4.11 Registro de impactos	128
CONCLUSIONES	129
APÉNDICE	130
BIBLIOGRAFÍA	137

INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de la energía eléctrica permitió que la humanidad se abriera paso a una nueva etapa dentro de su propia evolución, sin embargo la aplicación a la vida cotidiana de este tipo de energía, mediante los procesos de generación, transportación y distribución final no podrían haberse llevado a cabo sin el desarrollo de maquinaria que permitiera cubrir este tipo de etapas en la producción de la electricidad y el propio consumo. Una de estas máquinas es el transformador, que permite obtener las condiciones necesarias para su transporte, de ahí que se este tratando de innovar en el diseño de mejores equipos.

Este trabajo nos presenta una idea global y muy cercana a la realidad que se puede observar cuando se está diseñando un transformador eléctrico de alta potencia desde el aspecto mecánico, esto quiere decir que el área mecánica interviene de manera muy importante en este tipo de equipos por lo que conviene estar muy atento a los procesos a desarrollar.

El presente trabajo esta dividido en cuatro capítulos, en el primero trataremos los aspectos básicos relacionados con el proceso del diseño, trataremos de responder cuestionamientos básicos en ese sentido el ¿cómo?, el ¿por qué?, el ¿para que?. En muchas ocasiones no se le da la importancia que merece este importante proceso en su etapa de idealización lo que permite en muchas ocasiones llegar a metas jamás planteadas.

En la segunda parte recordaremos los conceptos básicos de los transformadores como pueden ser: el funcionamiento básico, los tipos de enfriamiento, su clasificación etc. Aquella terminología básica que en ocasiones está reservada para los conocedores del tema. Además de un breve repaso de



los elementos del diseño mecánico y de sus fórmulas para su posterior aplicación a procesos de diseño reales.

Para la tercera parte nos adentraremos en el diseño real de un transformador eléctrico de alta potencia, centrándonos en los elementos mecánicos que son de nuestro interés: el tanque del transformador.

En la última etapa se describe el proceso de las pruebas correspondientes a las que se somete el tanque, y su respectiva preparación para el embarque y destino final.

Es importante mencionar que este trabajo trata de cubrir en la medida de lo posible todos aquellos aspectos que intervienen en el proceso estándar del diseño de un transformador de potencia.

La base de este trabajo de investigación es documental apoyada en manuales de diseño, normas de diseño nacionales e internacionales, así como en recomendaciones de ingenieros con experiencia en este campo ya que resulta invaluable la adquisición de conocimientos con el paso del tiempo.

Es importante señalar que el presente trabajo tratará de acercar al lector a una visión más real del diseño mecánico de la que se puede obtener en el aula.

JUSTIFICACIÓN

A lo largo de nuestra formación como profesionistas, nos hemos encontrado con la necesidad de la búsqueda de información que permita desarrollar con mayor calidad, nuestra formación profesional. Cada vez que asistimos a las bibliotecas u otros medios donde poder acceder a ella , nos enfrentamos a la carencia de información especializada.

Por tal razón en esta tesis, pretendo proporcionar a la comunidad estudiantil de la ENEP Aragón un texto que tenga un contenido consistente y acorde a los avances tanto técnicos y tecnológicos, del proceso de diseño mecánico de un transformador de potencia.

Se espera que esta investigación llegue a concluir con un texto claro y conciso que permita a las futuras generaciones contar con una referencia bibliográfica aceptable, sujeta también a posibles ampliaciones.

OBJETIVO

Pretendo analizar, los procesos que se llevan a cabo para el diseño mecánico de un transformador de potencia, abarcando todos los elementos que en el intervienen, como el análisis de las especificaciones, los procedimientos de diseño, pruebas y datos que permitirán la manufactura. Todo lo anterior, considerando las herramientas tecnológicas de mayor actualidad, sin dejar a un lado los conocimientos básicos adquiridos a través de la formación escolar.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

1.1 El proceso de diseñar

¿Qué es diseñar? Si tratamos de buscar en la literatura lo que significa diseñar, podemos encontrar una amplia variedad de definiciones acerca de lo que se entiende por diseño, pero algo de lo que podemos estar completamente seguros es que el diseñar es una actividad común para el ser humano. Algunas personas consideran que el diseño es la idea, antes de llegar a planear. Pero esencialmente el diseñar, es crear algo que no se ha inventado antes, ciertamente un ingeniero debe de practicar el diseño siguiendo de antemano algunos principios. Aunque no solo los ingenieros diseñan, también lo realizan miembros creativos de la sociedad.

Así aunque los ingenieros no son las únicas personas que diseñan cosas, algo que si es cierto es que la ingeniería está vinculada de manera estrecha con el diseño, por lo que en muchas ocasiones se dice que "el diseño es la esencia de la ingeniería". Buscando una definición aproximada de lo que es el diseño encontramos una definición más formal de lo que es diseñar: *"El diseño establece y define soluciones pertinentes a problemas no resueltos con anterioridad o crea nuevas soluciones a problemas que previamente han sido resueltos por otros métodos"*¹.

La habilidad de diseñar es una ciencia y un arte, la ciencia se aprende a través de las técnicas y procedimientos que se cubren a lo largo de la formación profesional de los educandos, pero el arte solo puede aprenderse diseñando. Es por esta razón que los alumnos en formación deberían de involucrarse con

¹ J. F. Blumrich, Science, vol. 168, pp.1551-1554,1970.



experiencias de diseño reales. El énfasis que se le da a la creación de nuevas cosas, en la discusión del diseño no debe ser causa excesiva de alarma, ser hábil en el diseño debería ser una meta alcanzable para un estudiante de ingeniería, pero su logro requiere de la experiencia guiada.

El diseño, no debe confundirse con el descubrimiento, ya que descubrir es encontrar la primera señal, la primera pista de algo totalmente desconocido, como cuando Cristóbal Colón descubrió América, se puede descubrir algo así, nada más de la nada, aunque podemos nunca encontrar lo que verdaderamente se está buscando. Sin embargo diseñar, representa el producto de un trabajo planeado, el diseño es producido para satisfacer una necesidad que alguien tiene. Es algo que no siempre ha existido, en cambio se crea expresamente para satisfacer una necesidad.

Se debe hacer notar que un diseño puede o no tener cierto grado de "invención". Por ejemplo para obtener la patente de una invención es necesario demostrar que el diseño está un paso adelante de los límites de conocimiento que existen acerca de esta invención. Algunos diseños son realmente inventos aunque la gran mayoría no lo son. Un buen diseño requiere de análisis y síntesis. Para diseñar algo debemos de considerar todos los elementos disponibles con los que contamos utilizando los conocimientos adecuados de la ciencia y la ingeniería, y de ser necesario, utilizar herramientas adicionales como las computacionales.

El análisis usualmente involucra la simplificación del entorno real a través de modelos. Se concentra en la separación del problema en partes manejables, mientras tanto la síntesis se ocupa de congrega los elementos en un entorno laborable. Regularmente en el transcurso de la formación de ingenieros en las escuelas, se está familiarizado con el análisis, ya que los cursos están encaminados a la disciplina de los conocimientos. Por ejemplo: regularmente no se espera utilizar a la termodinámica y a la mecánica de fluidos en un curso de



mecánica de materiales, ya que los problemas que ahí se plantean solo sirven para ilustrar y reforzar los principios básicos. Si se puede construir el modelo apropiado, normalmente se puede resolver los problemas, la mayoría de los datos y las propiedades son dados de tal forma que los problemas tengan una solución.

Sin embargo los problemas de un entorno real raramente están planteados de esta forma. Un problema real espera que el diseño resuelva no que solo aparente. Se pueden utilizar muchas disciplinas técnicas (mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, teoría electromagnética, etc.) para la solución y usualmente disciplinas no ingenieriles (economía, legislación, finanzas etc.).

La adquisición de información se puede dar de manera fragmentaria y mejor aún, el alcance del proyecto puede ser tan grande que un individuo solo no podrá acercarse toda la información. Si esto no es difícil, usualmente los diseños se tienen que seguir bajo rigurosos restricciones de tiempo y/o dinero, aunque puede haber otro tipo de consentimientos de tipo ambiental o de regulaciones energéticas.

Finalmente un diseño típico rara vez tiene la posibilidad de saber si es la respuesta correcta a el problema que tratamos de resolver. Esperanzadamente, el diseño trabaja, pero... ¿es el mejor diseño? , ¿el más eficiente?. Solo el tiempo y el mismo proceso del diseño lo dirá.

Ahora que se tiene una idea de lo que es el ambiente y proceso del diseño, lo que debe de quedar claro es como el diseño se extiende a lo largo del umbral de la ciencia, si parece desalentador el entorno que se describe para llevar a cabo el diseño, cabe mencionar que la ingeniería brinda la posibilidad de diseñar una serie de oportunidades para crear innumerables diseños originales y tener la satisfacción de que se vuelvan realidad.



"Un científico tendrá suerte si realiza una aportación creativa al conocimiento humano en toda su vida, y muchos nunca lo logran. Un científico puede descubrir una nueva estrella, pero no podrá hacer una, tendría que pedirle a un ingeniero que la hiciera por él"²

1.2 Una aproximación a el proceso del diseño

Frecuentemente se habla sobre que se está "diseñando un sistema". Por sistema se entiende que es una combinación entera de maquinaria, información y gente necesaria para lograr alguna misión en específico. Un sistema puede ser una red de distribución de energía eléctrica para una región en particular, un procedimiento para detectar fallas en envases a presión soldados, o una serie de pasos en la producción de partes de automotores. Un sistema grande, normalmente es dividido en subsistemas que a su vez se dividen en componentes.

No existe una sucesión de pasos universalmente establecidos para desarrollar un diseño viable, diversos escritores y diseñadores han propuesto una serie de pasos que van desde 5 hasta más de 25, para poder definir un perfil adecuado en el proceso de diseñar. Uno de los primeros escritores acerca de este tema fue Morris Asimov.³ El observó que el proceso fundamental del diseño consistía en una serie de elementos como el que se muestra en la figura 1.1.

Como Asimov planteó en este diagrama, el diseño es un proceso secuencial, que está compuesto de varias etapas. Un ejemplo de estas operaciones son:

1. Explorar sistemas alternativos, que podrían llegar a satisfacer una necesidad específica.
2. Formular un modelo matemático, que mejor describa el problema.

² G. L. Glegg, "The Design of Design", Cambridge University Press, New York, 1969.

³ M. Asimov, "Introduction to Design", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962.



3. Especificar los componentes involucrados, en la construcción de algún componente o subsistema.
4. Seleccionar el material, para la manufactura de los componentes.

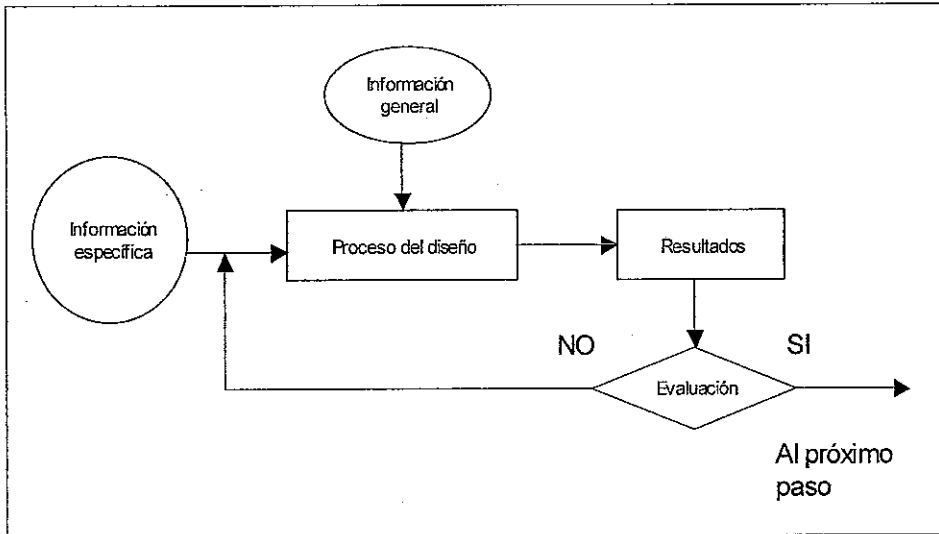


Figura 1.1 Modelo Básico en el proceso del diseño. (Según Asimov)

Cada operación requiere información técnica y comercial muy específica, que se espera obtener de personal profesional especializado, para así lograr un resultado exitoso.

Un ejemplo de donde se podrá encontrar información valiosa es en catálogos, Hojas de especificaciones técnicas, etc., aunque también se puede encontrar en la experiencia personal, en ocasiones se cuenta con personal de varios años de trayectoria, que pueden aportar una cantidad importante de dicha información.

La adquisición de información es vital y a menudo se trata del paso más difícil en el proceso del diseño, pero afortunadamente es un paso que cada vez se simplifica con el paso del tiempo. (a este proceso se le llama "*experiencia*"). Una



vez armado con la información necesaria, el ingeniero de diseño (ó equipo de diseño), lleva a cabo la operación de diseñar, usando apropiadamente los conocimientos técnicos, computacionales y/o experiencias.

En esta fase puede ser necesaria la construcción de un modelo matemático y dirigir éste a una simulación en computadora ó si es necesario a la construcción de un prototipo a tamaño natural para realizar diversas pruebas. Cualquier operación produce en el diseño un resultado que en ocasiones suele darse de diversas formas, éstas pueden ser una hoja de resultados, un boceto con las dimensiones críticas establecidas o un juego completo de dibujos listos para ser enviados al departamento de manufactura. En este paso los resultados tienen que ser evaluados por un equipo imparcial de expertos, para decidir que es lo más adecuado, en caso afirmativo el diseñador puede continuar con el paso siguiente. Si la evaluación descubre deficiencias, la operación tendrá que repetirse.

El resultado final de toda esta cadena de etapas en el proceso del diseño, como lo muestra la figura 1.1 es un nuevo objeto de trabajo o colección de objetos con los cuales trabajar para las próximas etapas. Sin embargo, muchos de los proyectos no tienen como objetivo la creación de una nueva pieza o sistema, en lugar de eso, el objetivo puede ser el desarrollo de nueva información que puede ser utilizada en otra parte de la organización del proyecto. La expansión de información en un proyecto, en un futuro es benéfico ya que permite tener una serie de recursos que ahorrarán tiempo y dinero.

El modelo mostrado en la figura 1.1 ilustra una serie de aspectos importantes en el proceso del diseño. Primero, la mayoría de los sistemas complejos pueden romper con la secuencia de los objetivos en el proceso del diseño, por lo tanto cada objetivo requiere de un proceso de evaluación y de una toma de decisiones en cada fase aunque esto implique volver a repetir los ciclos.



La acción de volver a repetir una etapa en el proceso del diseño no se debe de considerar como una falla personal o debilidad, diseñar es un proceso creativo, y todas la nuevas creaciones son resultado de algo conocido como ensayo y error, entonces si fuera posible trabajar el diseño bajo un esquema plano, sin iteraciones, el diseño se volvería demasiado rutinario. El aspecto interactivo del diseño es lo que más frecuentemente es utilizado, se debe de tener una alta tolerancia a las posibles fallas, además de una gran tenacidad y determinación en los posibles problemas que se puedan llegar a tener en el proceso de desarrollo de los proyectos.

La naturaleza interactiva del diseño provee la oportunidad de improvisar y en ocasiones modificar las bases de los procedimientos que se llevan a cabo cuando se diseña, en ocasiones a la vuelta de la esquina nos encontramos con las mejores condiciones posibles.

1.3 Etapas del proceso del diseño

Una forma de ilustrar el proceso del diseño, es definirlo en etapas, las cuales serían:

- Reconocimiento de la necesidad
- Definición del problema
- Recopilación de la información
- Conceptualización
- Evaluación
- Comunicación del diseño

Estas etapas, (algunos autores consideran más) suelen ser en la mayoría de los casos las que se repiten con mayor frecuencia en el proceso del diseño, ya que todos los diseñadores vuelven cíclicos sus procedimientos y se pueden llegar a englobar en esta serie de etapas.



1.3.1 Reconocimiento de la necesidad.

Las necesidades pueden ser definidas de diversas maneras, la mayoría de las empresas tienen recursos o proyectos relevantes que tienen que ser mejorados. Algunas otras provienen directamente de los clientes, de programas gubernamentales, asociaciones o de el público en general.

Usualmente las necesidades son producto de una insatisfacción con alguna situación existente. La mayoría de las ocasiones están encaminadas a reducir costos, incrementar la rentabilidad o el desarrollo, o simplemente cambiar, ya que el público se ha interesado por otro tipo de productos.

1.3.2 Definición de el problema

La etapa más crítica en el proceso del diseño es la definición del problema. El verdadero dilema radica en que no siempre lo que vemos define nuestro problema. Ya que esta etapa requiere tan solo una pequeña parte del tiempo que nos llevará todo el proceso, es muy importante no tomarlo a la ligera. La figura 1.2 ilustra como el diseño final puede diferir de manera considerable dependiendo de cómo fue definido el problema.

Es una ventaja importante definir el problema tan ampliamente como sea posible. Si la definición es amplia, difícilmente se pasarán por alto soluciones raras o tal vez originales que nos ayudaran a resolver nuestro problema, el tratamiento amplio de los problemas que previamente fueron atacados poco a poco al final tienen una gran recompensa, sin embargo se deberá entender que el grado en el que la formulación de un problema sea de manera amplia en ocasiones depende de decisiones que no están a nuestro alcance y están sujetas a otras personas con mayor mando, en ocasiones el considerar a un problema desde el punto de vista más amplio puede como consecuencia llevarnos a tener conflictos con el cliente o con otras áreas de responsabilidad en las empresas.



En la mayoría de los casos el concebir un problema de manera amplia, dependerá de los límites de tiempo y dinero presupuestado para solucionar dicho problema y en ocasiones de la posición, y el poder de decisión que se tenga.

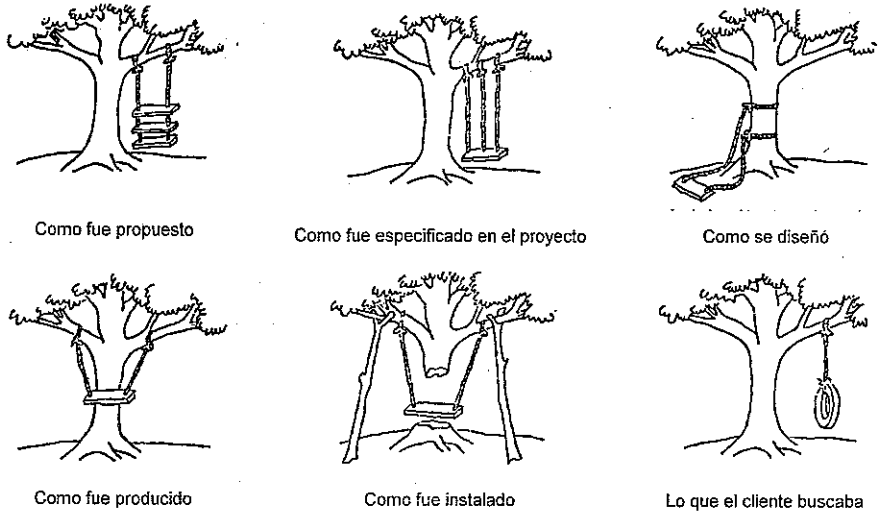


Figura 1.2 Nótese como el diseño depende del punto de vista individual de los personajes que intervienen en la definición del problema.

La definición de un problema debe incluir una propuesta de manera formal que debe de expresar lo que se espera que el diseño logre, tan específicamente como sea posible, debe de incluir los objetivos y las metas, definiciones de cualquier término técnico especial, que los diseñadores plasmaron dentro del propio plan, y el criterio que se utilizará para evaluar, dicho proyecto.

Quizás la mejor manera de proceder a plantear un problema sea como primer paso una definición inicial del problema, para después en una segunda iteración ofrecer mucha más información que se halla reunido y así desarrollar un informe del problema mucho más detallado, que normalmente se llama "*análisis del problema*". Colocando enseguida los objetivos y metas además de integrar una serie de cuestionamientos sobre que podría ser incluido o excluido del proyecto.



Una forma de acercarse a este tipo de cuestionamientos fue sugerida por Ira y Marthann Wilson⁴. Ellos sugirieron cuatro categorías para metas y objetivos:

1. **Tener que.** Una serie de requerimientos que deben de encontrarse.
2. **No tener que.** Una serie de limitaciones que definen lo que se puede o no hacer.
3. **Necesitar.** Los requisitos que valen la pena considerar, y que no deben ser modificados.
4. **No necesitar.** Los requerimientos que no deben ser considerados

1.3.3 Reuniendo la información.

Quizás la más grande frustración a la cual se puede enfrentar un ingeniero cuando se embarca en el primer proyecto de diseño sea la carencia de información, el verdadero problema puede encontrarse en que el diseño cubra áreas o aspectos técnicos que no se dominen ampliamente y que no se tenga una sola referencia básica del asunto. En otro extremo podemos encontrarnos con montañas de información en el cual la tarea fundamental, consistirá en no ahogarse en un mar de documentos y así proceder a depurar dicha información, identificando aquella que verdaderamente sirve.

Un punto importante a entender, es que la información que requiere un buen proyecto de diseño, en la mayoría de los casos difiere a la que se obtiene en los diversos semestres de la universidad, así como también en los libros de texto y los artículos publicados en revistas técnicas. La necesidad es a menudo contar con información actualizada y específica, la fuente de este tipo de información generalmente se localiza en los reportes técnicos publicados como resultado de las investigaciones conjuntas entre gobierno e iniciativa privada, catálogos, patentes, informes de empresas, manuales, y literatura publicada por vendedores o proveedores de material y equipo. Otra manera importante para obtener el

⁴ I.G. Wilson and M. E. Wilson, "From Idea to Working Model", Wiley-Interscience, New York, 1970.



pedazo perdido de información puede ser proporcionado con una llamada telefónica a un proveedor importante, en comentarios con los expertos de la casa (con frecuencia con el equipo de investigación y desarrollo) y consultores del exterior de la empresa puede ser útil.

Los siguientes cuestionamientos son algunos de los problemas que conciernen a la obtención de la información.

- a) ¿Dónde puedo encontrarla?
- b) ¿Cómo puedo conseguirla?
- c) ¿Cómo encontrar información exacta y creíble?
- d) ¿Cómo poder interpretar la información específica que necesito?
- e) ¿Cuándo saber si tengo suficiente información?
- f) ¿Qué decisiones tomar en función de la información?

1.3.4 Conceptualización

El paso de la conceptualización primordialmente se refiere a determinar los elementos, mecanismos, procesos o configuraciones que en alguna forma u otra satisfacen las necesidades del diseño. Es un paso importante para emplear la inventiva y la creatividad.

Muy a menudo este proceso involucra la formulación de un modelo que puede ser por cualquiera de los dos principales tipos: El analítico y el Experimental. En la mayoría de las asignaturas durante el proceso de formación de un ingeniero el énfasis ha estado en el desarrollo de modelos analíticos basados en principios físicos, pero los modelos experimentales no son menos importantes.



Un aspecto vital en la etapa de la conceptualización es la síntesis. *La síntesis es el proceso de toma de elementos del concepto, colocándolos en el orden apropiado, clasificarlos según tamaño y dimensionarlos de la manera apropiada.*

La síntesis es el proceso creativo y debe de estar presente en cada diseño. El diseño es muy individualizado. No existe en definitiva ninguna regla para enseñar el arte de diseñar, y desgraciadamente se ha escrito muy poco sobre el proceso de conceptualización que se encuentra en el centro del proceso del diseño. Gordon L. Glegg, en su libro el diseño del diseño, lista algunas pautas que pueden servir, para tener una carrera productiva en el área de la ingeniería⁵.

1. No seguir los procedimientos tradicionales a menos que sean examinadas otras aproximaciones y se encuentre lo que se está buscando.
2. A menudo se deberá complicar algún componente del diseño para simplificar el diseño de forma global.
3. Hacer una revisión de los materiales que se necesitarán en el diseño.
4. Cuando se enfrente un problema abrumadoramente complejo, subdividir el mismo en varios problemas más pequeños.
5. Mantenerse al tanto de los desarrollos en las ciencias y aplicarlos a la practica del diseño.
6. Recordar que la invención es la más voluble musa del diseñador, ya que en muchas ocasiones no encuentra soporte en la ciencia o el análisis.

1.3.5 Evaluación

El paso de la evaluación involucra un análisis completo del diseño, el término evaluación en ocasiones se utiliza más en el sentido de juzgar, que en términos de medir el proyecto. Típicamente el paso de la evaluación puede

⁵ G. L. Glegg, op. cit.



involucrar un cálculo detallado, que en la mayoría de los casos es la actuación que muestra el diseño en la computadora, empleando un método analítico. En otros casos la evaluación puede involucrar una extensa prueba de un prototipo o modelo experimental.

Una importante consideración que se debe de tomar en cada uno de los procesos del diseño, pero especialmente cuando el diseño está en su fase final, es precisamente la verificación. En general hay dos tipos de verificaciones: el de tipo matemático y el del punto de vista ingenieril. La verificación matemática concierne principalmente a verificar los cálculos utilizados en el modelo analítico. A propósito, la frecuencia en los errores matemáticos es una buena razón para adoptar la costumbre de utilizar un solo cuaderno de cálculos por diseño. De esta forma se podrán encontrar fácilmente los errores y podrán ser corregidos posteriormente.

La verificación desde el punto de vista ingenieril, tiene que ver con la sensación de si verdaderamente se habrá hecho lo correcto. Aunque este sentimiento se modificará con el incremento de la experiencia. Se puede desarrollar el hábito de mirar fijamente la respuesta durante un momento antes de proceder al calculo siguiente. Analizar detalladamente los cálculos con un sentido crítico en el que la duda siempre cabe y poder identificar las respuestas fuera de relación permitirán enfrentar de manera más detallada los cálculos matemáticos y observar si se comportan de manera consistente.

Las técnicas de optimización que más frecuentemente se utilizan durante el proceso de evaluación se refieren a los mejores valores que se pueden obtener como parámetros de diseño. El manejo de las decisiones de cuando detener el proceso de optimización y congelar el diseño frecuentemente vienen determinados por cuestiones de tiempo y dinero. Un importante cuestionamiento durante la evaluación es si los resultados de un diseño pueden ser generalizados para



posteriores diseños o solo es una solución específica de un problema determinado.

1.3.6 Comunicación del diseño.

Siempre debe de tenerse en cuenta que el propósito de un diseño es satisfacer las necesidades del cliente. Sin embargo el diseño ya finalizado tiene que ser propiamente mostrado, ya que puede perder mucho de su impacto o importancia por una mala presentación del mismo. La presentación usualmente es oral al patrocinador, así como un informe por escrito, donde se incluyan planos ingenieriles detallados, programas de computadora y modelos que previamente fueron trabajados, es parte de la información detallada que se le tiene que dar al consumidor. Es importante la comunicación en el proceso de desarrollo de un proyecto o diseño, y no solo cuando se ha terminado el diseño. Un proyecto bien estructurado implica una comunicación continua entre todos los elementos que constituyen el proceso del diseño.

1.4 Morfología detallada del diseño

“Un típico proyecto de diseño se podría venir abajo en un determinado momento si no se tiene cuidado en desarrollar cada una de las etapas contenidas en la morfología del diseño”⁶(según Asimov).

Fase I. Estudio de viabilidad.

El propósito del estudio de viabilidad es iniciar con el diseño y establecer una línea de pensamiento. La meta en esta fase es validar la necesidad, producir un número posible de soluciones, y evaluar las soluciones en función de la posible realización, las condiciones económicas o la factibilidad financiera. Esta fase en ocasiones es llamada “*diseño conceptual*”.

⁶ M. Asimov, op. Cit.



Fase II. Diseño preliminar.

Empezando por plantear una serie de posibles soluciones útiles que se desarrollaron en la fase I, la meta del diseño preliminar es cuantificar los parámetros para así poder establecer una solución óptima. Un diseño preliminar normalmente se preocupa por estimar el orden o la magnitud en el desarrollo del diseño y los costos.

Fase III. Diseño detallado

El propósito de la fase de un diseño detallado es desarrollar una descripción completa de la ingeniería que ha propuesto un diseño probado y que es producible. Un diseño detallado incluye dibujos de manufactura con todas las partes dimensionadas, con tolerancias y especificaciones completas.

Las fases I, II y III llevan al diseño de la probabilidad, la posibilidad, a la viabilidad, ello constituye el diseño preliminar. Sin embargo, el proceso del diseño no ha terminado con la entrega de una serie de planos ingenieriles. Muchas otras decisiones técnicas y financieras tienen que ser tomadas, que realmente tienen que influir en el proceso del diseño. Una parte importante del pensamiento en el proceso del diseño de un producto es como tiene que ser manufacturado, como tiene que ser comercializado y finalmente como tiene que ser retirado de servicio y posteriormente ser reemplazado por otro nuevo, "*diseño mejorado*".

Fase IV. Planeando la fabricación

Deberán de hacerse planificaciones detalladas para lograr llevar a la producción un diseño. El método de la manufactura tiene que establecerse en cada uno de los componentes del sistema de producción. Usualmente el primer paso, es determinado en una hoja de proceso, que contiene una lista secuencial de las operaciones de manufactura que deberá seguir la pieza o componente. También se especifica la forma y la condición de los materiales, además de las herramientas que serán utilizadas en la maquinaria de producción. La información



en las hojas de proceso hace posible la estimación del costo de la producción de cada componente. Altos costos nos pueden indicar la necesidad de cambiar un material o un pequeño cambio en el diseño. Una comunicación estrecha con manufactura, procesos industriales, materiales, e ingenieros mecánicos es muy importante en este paso.

Otros puntos importantes desarrollados en la fase IV son:

1. Diseñar herramientas especializadas
2. Especificar la planta de producción que será utilizada (o diseñar una nueva) y proponer las líneas de producción.
3. Planear los programas de trabajo y controles de inventario (control de la producción).
4. Planear los sistemas de control de calidad.
5. Establecer los tiempos y costos de labor en cada operación.
6. Establecer los sistemas de flujo de información necesarios para controlar las operaciones de manufactura.

Todos estos puntos generalmente son considerados en los diversos procesos industriales y de ingeniería de la manufactura.

Fase V. Planeando para la distribución.

Importantes decisiones técnicas y económicas deben ser tomadas para mantener una distribución efectiva a el consumidor, de los productos que han sido elaborados. En un ámbito severo del diseño, el envío de los paquetes puede ser crítico. Conceptos tales como el almacenaje, también pueden ser importantes y necesitarían ser redirigidos a las fases más tempranas en el proceso del diseño. Un sistema de almacenes para distribuir un producto puede ser diseñado sino existe.



El éxito económico en un diseño depende a menudo de la habilidad en la comercialización del producto. Si el producto está orientado a un consumidor, la comercialización se enfoca primordialmente a los anuncios y promociones del mismo, pero productos de gran relevancia técnica requieren de un mercadeo técnico que debe de ser apoyada por folletos o información muy especializada y por supuesto de datos de prueba y simulación.

Fase VI. Planeando para el uso.

La utilización de un diseño por el consumidor es muy importante, y las consideraciones de éste como consumidor puede aportar datos importantes que pueden ayudar a refinar los pasos del proceso del diseño. Los siguientes temas específicos pueden ser identificados fácilmente por el usuario como procesos que conciernen al diseño: la facilidad de mantenimiento, la confiabilidad, la seguridad del producto, conveniencia en el uso (ingeniería de factores humanos), apariencia estética, economía del funcionamiento, y vida de servicio.

Obviamente tal consumidor tiene que ser orientado de tal manera que se comprometa a aportar tales datos, y a involucrarse en el proceso de diseño en su respectivo papel, esta parte del diseño está teniendo un amplio auge debido a las nuevas leyes de protección al consumidor, de seguridad etc. Una parte importante de esta fase del diseño es sobre la adquisición de datos fiables de los fracasos, la vida de servicio de los productos, queja de los consumidores que pueden ayudar a tener otro tipo de actitudes y así mejorar el próximo diseño.

Fase VII. Planeando para el retiro del producto.

El paso final del proceso del diseño es la disposición final del producto cuando ha alcanzado el límite de su vida útil. La vida útil puede ser determinada por el deterioro actual, el punto donde el diseño no puede prolongar la funcionalidad del producto, por la obsolescencia tecnológica, o simplemente



porque la competencia está realizando diseños más baratos y con mejor desempeño.

En el pasado se ha minimizado la importancia de la disposición final de un producto, En algunos países se pueden observar vehículos abandonados, latas de productos en las orillas de las carreteras o simplemente el problema de los neumáticos de no saber que hacer con ellos después de su utilización. Las nuevas legislaciones en estos rubros han tenido un importante impacto en el proceso de diseñar un producto principalmente en la fase de el retiro del mismo. Tal filosofía de la disposición final de un producto provocará cambios significativos en la percepción de cómo se diseñará un producto, la utilización de materiales reciclables, o de equipos que pueden ser reutilizados por etapas de exigencia de un nivel mayor a uno menos exigente.

1.5 Consideraciones adicionales del diseño

Las anteriores descripciones del proceso del diseño han seguido una serie de secuencias y eventos en un proyecto usual. Sin embargo, el diseño es multifacético e involucra una amplia gama de posibles aspectos, con lo que no es posible determinarlo como un proceso de una simple visión dimensional, a través del espacio del diseño. Otra manera de ver al diseño⁷ es considerar varios factores de diseño que se agrupan en tres categorías:

- 1) Requisitos funcionales
- 2) Ciclo de vida
- 3) Aspectos adicionales del diseño.

⁷ C.O. Smith, "Engineering Design", NBS Special Publication 487, pp. 1-15, August 1977.



1.5.1 Requisitos funcionales

Es obvio que, la satisfacción del diseño en muchas ocasiones requiere de desarrollar ampliamente las especificaciones. El desarrollo de estas especificaciones es la mayor tarea en la definición del problema. Esta es una fase crítica del diseño, si se realiza de manera hábil esto provocará un diseño superior al planeado. Un fracaso común en la definición del problema es la exageración en las especificaciones en ciertos valores y parámetros. Entonces el diseño es forzado a seguir un camino predeterminado, una mejor aproximación para especificar las funciones del diseño es no intervenir en el proceso de creatividad del diseñador.

Una variedad de técnicas de análisis deben de ser empleadas para arribar a la configuración actual de la forma del diseño. La computadora ha tenido un impacto mayor en esta área, proporcionando poderosas técnicas analíticas basadas en los análisis por elementos finitos y diferencias finitas. El resultado es en ocasiones complejas geometrías y condiciones que ahora se pueden manipular, cuando las técnicas analíticas son acopladas con gráficas interactivas en la computadora, entonces podemos tener la capacidad de aplicar ciertas técnicas como lo es el diseño asistido por computadora (CAD). Debido al poder del CAD es posible analizar concentraciones completas de esfuerzos.⁸ Hay también un reconocimiento creciente en que el diseño está basado en una filosofía determinista y no realista. Una mejor aproximación consiste, en la utilización de análisis estadísticos para considerar ambos aspectos, el manejo y las propiedades de los materiales⁹.

El incremento de la competitividad en los negocios y el incremento en el énfasis de la fiabilidad de un producto dan como resultado la exagerada concepción de la confiabilidad. En un contexto técnico la confiabilidad se define

⁸ R. E. Peterson, "Stress-Concentration Design Factors," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1974.

⁹ E. B. Haugen, "Probabilistic Approaches to Design," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968.



como la probabilidad de que un dispositivo realizará adecuadamente un servicio para el determinado tiempo que fue pensado que lo haría bajo condiciones normales de operación. Estrechamente está relacionado con importantes factores que son la mantenibilidad, disponibilidad, y la reparabilidad. La mantenibilidad esta relacionada con la facilidad, la economía, y la seguridad de desempeñar funciones de mantenimiento, que permitan minimizar los tiempos en los que los equipos se mantienen en reparación y por lo tanto maximizar los tiempos en el que los sistemas se encuentran en operación. La disponibilidad se refiere primordialmente a que un elemento o equipo esté listo para ser llamado en cualquier momento. La reparabilidad se refiere a la facilidad con la que una parte o un equipo puede ser reparado y sea vuelto al servicio lo más pronto posible. Estos conceptos tan importantes están contenidos dentro de una amplia disciplina llamada ingeniería logística.¹⁰

Una parte importante en el proceso del diseño es la anticipación a las posibles fallas en el producto, por lo tanto se tendrá que incorporar al diseño defensas ante posibles fallas, existe una gran variedad de técnicas, tales como análisis de fallas, análisis de efectos, análisis de durezas etc., que pueden aplicarse según sea el caso. En relación a esto, pero distintamente separada se encuentra la metodología "*análisis del valor*"¹¹, es una técnica formalizada para la revisión de un diseño desde el punto de vista de la funcionalidad y el costo para asegurar el máximo valor.

El máximo valor es alcanzable cuando la función requerida (aunque no necesariamente la capacidad funcional) se alcanza al menor costo. Un diseño formal revisa este importante factor para mejorar el desempeño de un producto. Esto se debería de considerar en los procesos iniciales del diseño, aunque se puede llegar a aplicar después de que el diseño a sido utilizado por un

¹⁰ B. Blanchard, "Logistics Engineering and Management," Prentice-Hall, inc., Englewood Cliffs, N. J., 1974.

¹¹ C. Fallon, "Value Análisis to Improbé Productivity," John Wiley & Sons, Inc., New York 1971;
L. D. Miles, "Techniques of Value Análisis and Engineering," 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1972



considerable periodo de tiempo. El rediseño, basado en la recuperación de productos de campo, puede aportar mejoras sustanciales en los costos o la funcionalidad. La estandarización y la simplificación de los diseños son pasos importantes en la reducción de los costos del diseño. El proceso de rediseño nos ofrece la oportunidad de la sustitución funcional, donde el objetivo no solo es simplemente reemplazar, sino encontrar un nuevo y mejor camino para realizar la misma función.

1.5.2. Ciclo de vida

El ciclo total de vida de un producto se concibe de la necesidad de el retiro y la disposición final de un producto. La selección de los materiales es una parte importante del ciclo total de vida, en la selección de los materiales para una aplicación, el primer paso es la evaluación de las condiciones de servicio, el siguiente es las propiedades de los materiales que estarán más directamente involucrados con los requerimientos del servicio que deben de ser determinados, excepto en algunas condiciones triviales, esto no implica una simple relación entre el desarrollo del servicio y las propiedades de los materiales.

Los diseños pueden comenzar con las consideraciones de esfuerzos estáticos, pero las propiedades que mayor dificultad tienen para evaluarse son la fatiga, tenacidad, ductilidad y la resistencia a la corrosión que también tiene que ser considerada. Se necesita conocer también como reaccionará nuestro material a las condiciones del medioambiente, ¿cambia la microestructura con la temperatura?, ¿el material se corroe rápidamente o tiene una proporción aceptable?, estas y otras tantas preguntas surgirán en el proceso de la selección de los materiales.

La selección de los materiales no tiene porque ser separada de la productividad, esta es una íntima conexión entre el diseño, la selección de los



materiales y los procesos de producción, el objetivo en esta área es encontrar la ventaja entre los factores de oposición de costos y la máxima durabilidad. La durabilidad concierne a el número de ciclos posibles de operación, esto es la vida de uso del producto.

Los problemas sociales actuales de conservación de la energía, conservación de los materiales, y de la protección al ambiente resultan en una presión importante en la selección de los materiales y los procesos de manufactura. Los costos de la energía, provocan que se ignoren diseños y que estos se encaminen a el ahorro eficaz de la misma además de que impulsan a la utilización de materiales reciclables.

1.5.3. Aspectos adicionales del diseño.

Las especificaciones y normas tienen una influencia importante dentro de la práctica del diseño. Las normas producidas por sociedades como ASTM, ANSI, ASME, etc. , representan un acuerdo entre muchos elementos (usuarios y productores) de la industria. Cuando un buen diseño requiere de ir más allá se tendría que desarrollar una propia normatividad.

Se ha regulado ampliamente en materia de seguridad y protección al medio ambiente por las diferentes agencias encargadas de ello alrededor del mundo. En Estados Unidos: OSHA (Occupational Safety and Health Administration), CPSC (Consumer Product Safety Comisión), EPA (Environmental Protection Administration), en México, aunque se tienen agencias propias, que regulan los temas de seguridad y medio ambiente es bien sabido que tienen su referencial en las agencias de los Estados Unidos. Todo este tipo de regulaciones tienen un fuerte impacto en el diseño, ya que se tienen que considerar todos los aspectos de seguridad para los usuarios, los elementos de transportación de los productos, la elaboración de manuales detallados de la operación de los mismos, así como las



advertencias en el mal manejo de los productos, todo esto con el fin de cumplir con las regulaciones establecidas por cada una de las dependencias que lo requiera para no tener algún tipo de inconvenientes y el diseño cumpla con sus objetivos de funcionalidad, durabilidad etc. Una importante consideración en el diseño es el factor humano que involucra la ergonomía, la biomecánica, etc., para asegurar que el diseño se opere de manera adecuada por los seres humanos. Se utiliza la psicología y la antropometría a elementos como el campo visual y la distribución de los paneles de instrumentación y sistemas de mando. También involucra la utilización de los músculos y los tiempos de respuesta¹².

Otra área importante dentro del diseño involucra la estética, que trata con la forma, textura y color del producto, aunque también otros elementos como el balance, unidad y el interés. Regularmente estos elementos son analizados por el diseñador industrial, aunque no por eso deja de tener una estrecha relación con el equipo de diseño desde la concepción inicial.

Como un elemento final del diseño esta el costo, es posiblemente el factor más importante, para una estimación preliminar el mirar el costo puede ser un elemento desfavorable y en ocasiones permite que el diseño no pueda desarrollarse, el costo entra en cada uno de los procesos del diseño.

En general la mayoría de los conceptos aquí desarrollados son utilizados en el diseño de un producto, sin embargo cabe mencionar que en algunos casos estos procesos siguen secuencias diversas en función de las necesidades de cada uno de los propios diseños, en el caso específico de los transformadores de potencia estos se rigen bajo líneas circunstanciales especiales que se desarrollaran en esta tesis, por lo pronto en la siguientes secciones se describirán brevemente los conceptos fundamentales de los transformadores y de los fundamentos del diseño mecánico a los que nos referiremos en capítulos posteriores.

¹² E. J. McCormick, "Human Factors in Engineering Design, " 4th ed., Mc Graw-Hill New York, 1976

CAPITULO 2

EL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO Y EL DISEÑO MECÁNICO

2.1 El transformador en los sistemas eléctricos de potencia.

Hoy en día que se requiere transportar grandes cantidades de flujo eléctrico desde las fuentes de generación hasta los centros de consumo, no sería concebible sin el desarrollo de ciertos equipos eléctricos como es el caso característico de los transformadores de potencia.

Conforme la demanda eléctrica iba en aumento la industria eléctrica, también fue teniendo un mayor crecimiento; luego entonces, la dificultad de trasladar este tipo de energía de un lugar a otro, fue haciéndose más evidente, pues en sus principios, se generaba corriente directa a baja tensión para alimentar los circuitos de alumbrado y de fuerza motriz; esto, hacía sumamente ineficiente la transmisión de grandes bloques de energía. Se vio entonces la necesidad de elevar la tensión en los centros de generación para llevar a cabo la transmisión de energía y reducirlo al llegar a los centros de carga o de consumo.

El dispositivo ideal para llevar a cabo este proceso de transformación es el transformador, cambiándose con ello, el uso de la corriente directa a corriente alterna, dado que el transformador funciona sólo con corriente alterna. En la figura 2.1 se observa el esquema general de un sistema eléctrico donde se representa todo el proceso que sigue la corriente eléctrica desde la generación hasta la utilización de la misma.

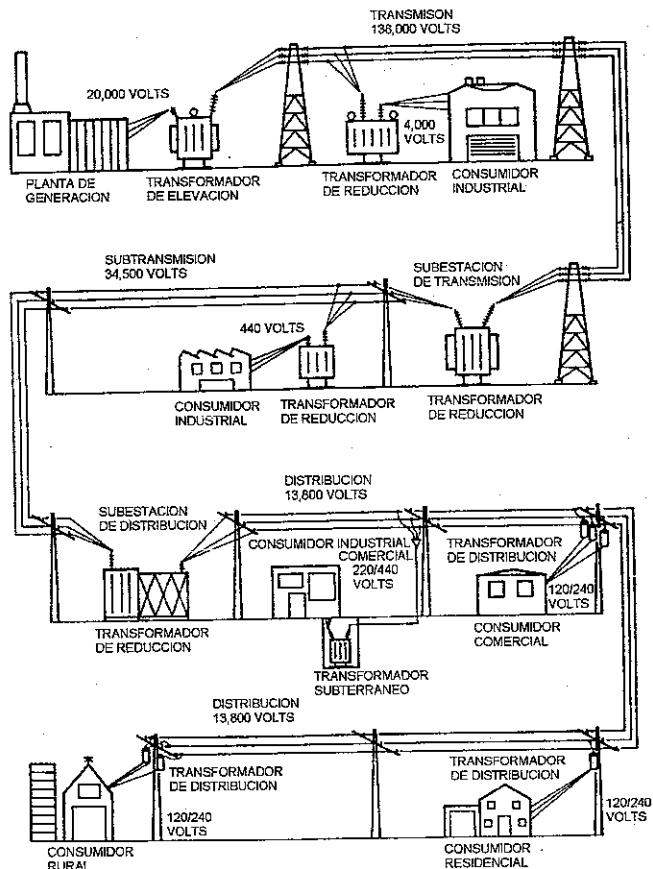


Figura 2.1 Suministro eléctrico desde los centros de generación hasta los lugares de consumo mostrando la aplicación de los transformadores y los voltajes típicos de operación.

Las grandes plantas de generación o estaciones centrales, generan energía en forma masiva, la cual es luego transmitida a subestaciones en puntos cercanos a los sitios donde será utilizada. La energía es distribuida desde dichas estaciones hasta los usuarios. Haciendo referencia a la figura 2.1 se observa que para poder llevar la energía a los centros de consumo desde las fuentes de generación, es necesaria la utilización de cuando menos cuatro transformadores, los cuales



tienen una función determinada. Como regla general se puede decir que por cada kVA generado se requieren al menos cuatro kVA de transformación. Estos transformadores se encuentran normalmente, formando subestaciones eléctricas y según el empleo que se les da, reciben el nombre de transformadores de potencia o de distribución y pueden ser elevadores, reductores o de enlace (relación 1/1). Existen además. Los transformadores especiales y los transformadores para instrumento que son empleados como auxiliares para conectar los instrumentos de medición, la protección y el control de los circuitos eléctricos de potencia. Como podemos ver, los transformadores son una parte fundamental en los sistemas eléctricos en general.

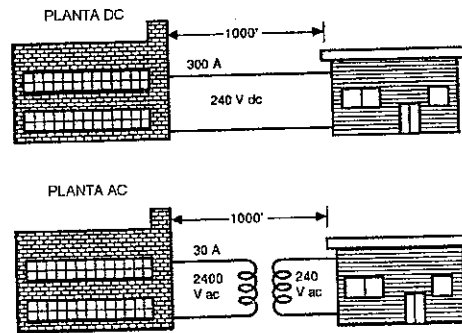


Figura 2. 2 Comparación de la transmisión de energía entre estaciones generadoras de corriente directa y alterna.

2.2 Clasificación de los transformadores

Los transformadores pueden ser clasificados de distintas maneras, según se tome como base para dicha clasificación, la operación, la construcción o la utilización.

- a) **Por la operación.** Se refiere a la energía o potencia que manejan dentro del sistema eléctrico:



- o *Transformadores de potencia.* Los que tienen capacidades mayores de 500 kVA
 - o *Transformadores de distribución.* Los que tienen una capacidad desde 5 hasta 500 kVA (monofásicos y/o trifásicos)
- b) **Por el número de fases.** De acuerdo a las características del sistema al que se conectará:
- o *Monofásico.* Transformadores de potencia o de distribución que son conectados a una línea o fase y un neutro o tierra. Tienen un solo devanado de alta tensión y uno de baja tensión. Se denota con 1ϕ .
Figura 2.3.
 - o *Trifásico.* Transformadores de potencia o de distribución que son conectados a tres líneas o fases y pueden estar o no conectados a un neutro común o tierra. Tiene tres devanados de alta tensión y tres de baja tensión. Se denota con 3ϕ . Figura 2.4.

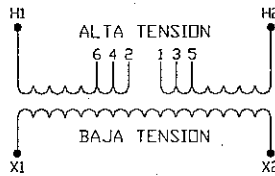


Figura 2.3 Diagrama eléctrico de un transformador monofásico.

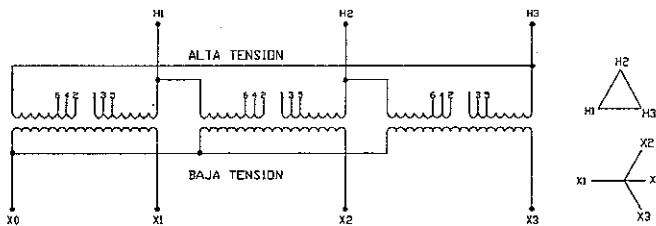


Figura 2.4 Diagrama eléctrico de un transformador trifásico.



- c) **Por su utilización.** De acuerdo a la posición que ocupan dentro del sistema:
- *Transformador para generador.* Son transformadores de potencia que van conectados a la salida del generador. Proporcionarán la energía a la línea de transmisión.
 - *Transformadores de subestación.* Los transformadores de potencia que se conectan al final de la línea de transmisión para reducir la tensión a nivel de subtransmisión.
 - *Transformadores de distribución.* Reducen la tensión de subtransmisión a tensiones aplicables en zonas de consumo.
 - *Transformadores especiales.* Son transformadores de potencia diseñados para aplicaciones no incluidas en las anteriores y que pueden ser: reguladoras de tensión, transformadores para rectificador, transformadores para horno de arco eléctrico, transformadores defasadores; autotransformadores para mina; transformadores para prueba; transformadores para fuentes de corriente directa y muchos otros.
 - *Transformadores de instrumentos.* Son los transformadores de potencial y transformadores de corriente que son usados en la medición, en la protección y el control.
- d) **Por la construcción o forma del núcleo.** De acuerdo con la posición que existe entre la colocación de las bobinas y el núcleo, se conocen dos tipos:
- *Núcleo acorazado.* También llamado "shell", es aquel en el cuál el núcleo se encuentra cubriendo los devanados de baja y alta tensión.
 - *Núcleo no acorazado.* También conocido como tipo columna o "core" y es aquel en el cual las bobinas abarcan una parte considerable del circuito magnético.

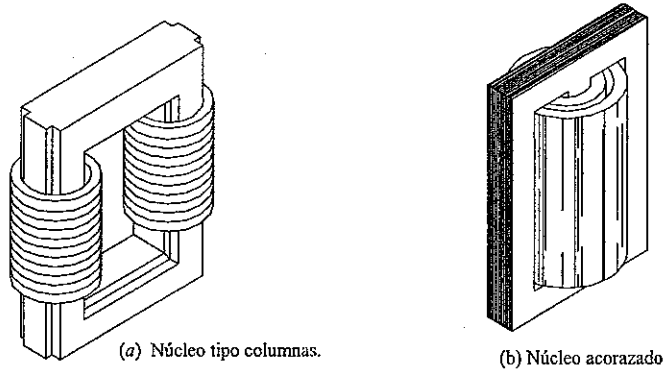


Figura 2.5 Tipos de Núcleos en los transformadores.

e) **En función de las condiciones de servicio:**

- Para uso interior.
- Para uso a la interperie.

f) **En función de los lugares de instalación:**

- Tipo poste.
- Tipo subestación
- Tipo pedestal
- Tipo bóveda o sumergible.

g) **De acuerdo al tipo de enfriamiento.** Existen los sumergidos en aceite y los tipo seco.

- Sumergidos en aceite.
 - Tipo OA. Sumergido en aceite con enfriamiento natural.
 - Tipo OA / FA. Sumergido en aceite con enfriamiento a base de aire forzado.
 - Tipo OA / FA / FOA. Sumergido en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento a base de aire forzado y a base de aceite forzado.
 - Tipo FOA. Sumergido en aceite con enfriamiento con aceite forzado con enfriadores de aire forzado.
 - Tipo OW. Sumergido en aceite, con enfriamiento por agua.



- Tipo FOW. Sumergido en aceite, con enfriamiento de aceite forzado con enfriadores de agua forzada.
- Secos:
 - Tipo AA. Secos con enfriamiento propio.
 - Tipo AFA. Seco con enfriamiento por aire forzado.
 - Tipo AA / FA. Seco con enfriamiento propio, con enfriamiento por aire forzado.

2.3 Componentes de un transformador

Los elementos que componen un transformador son clasificados en cuatro grandes grupos, los cuales comprenden:

1. Circuito magnético (núcleo)
2. Circuito eléctrico (devanados)
3. Sistema de aislamiento
4. Tanque y accesorios

2.3.1 El circuito magnético

El circuito magnético es el componente del transformador que servirá para conducir el flujo magnético generado, el cual concatenará magnéticamente los circuitos eléctricos del transformador. El circuito magnético se conoce comúnmente como núcleo. Este núcleo se encuentra formado por láminas de acero al silicio de grano orientado de bajas pérdidas y una alta permeabilidad magnética.

Todas las láminas están aisladas en ambas caras por medio de un aislante inorgánico llamado "*carlite*" que consiste de una capa especial aislante aplicada en el proceso final de planchado y recocido.



Básicamente, se tienen cuatro tipos de lámina de grano orientado, el tipo de lámina más usual en la fabricación de núcleos para transformadores es la M-4.

2.3.2 El circuito eléctrico (devanados)

Los devanados son la parte que componen los circuitos eléctricos del transformador (devanados primarios y secundarios). Los devanados se fabrican en diferentes tipos dependiendo de las necesidades del diseño, y los materiales que se utilizan, básicamente, son: el cobre y el aluminio.

La función de los devanados (primarios) es crear un flujo magnético para inducir en los devanados (secundarios) una fuerza electromotriz, y transferir potencia eléctrica del primario al secundario mediante el principio de inducción electromagnética; este proceso se desarrolla con una pérdida de energía muy pequeña.

Aún cuando el cobre tiene una baja resistencia específica su mayor costo comparado con el aluminio dio lugar al incremento del uso del aluminio (usado por primera vez en 1952). Durante la II Guerra Mundial cuando el cobre estuvo escaso, fueron usados conductores de plata en un considerable número de transformadores para plantas del gobierno de los Estados Unidos en la época de la guerra. Sin embargo, después de la guerra estos devanados fueron recobrados.

El diseñador debe considerar varias características particulares de ambos materiales.

Las ventajas de las bobinas de cobre son:

- resistencia mecánica,
- conductividad eléctrica buena (bobina más pequeña).



Las ventajas de la bobina de aluminio son:

- estabilidad en el costo por suministro,
- eficiente disipación de calor (capacidades muy pequeñas) únicamente para devanados en banda (no para devanados de alambre); uso de hoja de aluminio (foil de aluminio)
- considerable reducción en peso.

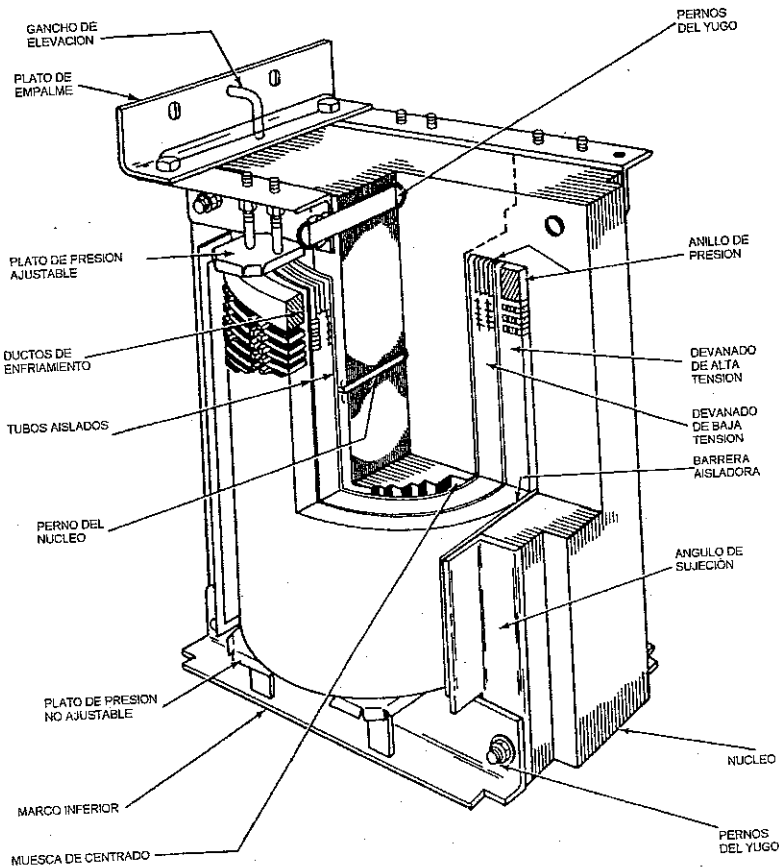


Figura 2.6 Construcción típica de un transformador del tipo acorazado



Los devanados de aluminio en la baja tensión son contruidos solamente en banda; en cambio los devanados de cobre pueden ser contruidos con solera o conductor redondo, forrados con papel o esmaltados, o la combinación de ambos aislamientos dependiendo del tipo (seco o sumergido en líquido aislante), tensión y potencia del transformador.

2.3.3 El sistema de aislamiento

Los transformadores poseen una serie de materiales aislantes, los cuales, juntos forman el sistema de aislamiento. Este sistema incluye materiales como:

- Cartón prensado (pressboard).
- Papel kraft normal o tratado (insuldur).
- Papel manila y corrugado.
- Cartón prensado de alta densidad.
- Collares de cartón prensado y aislamientos finales.
- Partes de cartón prensado laminados.
- Esmaltes y barnices.
- Recubrimientos orgánicos e inorgánicos para la laminación del núcleo.
- Porcelanas (boquillas).
- Recubrimientos de polvo epóxico.
- Madera de maple o machiche para armados.
- Fibra vulcanizada.
- Algodón (hilos, cintas).
- Plásticos y cementos, telas y cintas adhesivas, cintas de fibra de vidrio.
- Fluido líquido dieléctrico (excepto equipos aislados en aire o gas) que puede ser aceite mineral, aceite de siliconas o r-temp.

El sistema de aislamiento, aísla los devanados del transformador entre ellos y a tierra, así como las partes cercanas al núcleo y a las partes de acero que



forma la estructura. Por lo tanto, el aislamiento es mucho más que solamente un medio mecánico para conservar los alambres "apartados". Concepto que así fue visualizado en el desarrollo de los primeros equipos.

Los primeros catorce materiales forman el sistema de aislamiento sólido que debe de cumplir con cuatro importantes funciones:

1. Cualidad para soportar las tensiones relativamente altas, sucedidas en servicio normal (esfuerzos dieléctricos). Esto incluye ondas de impulso y transitorios.
2. Cualidad para soportar esfuerzos mecánicos y técnicos (calor) los cuales, generalmente acompañan a un cortocircuito.
3. Cualidad para prevenir excesivas acumulaciones de calor (transmisión de calor).
4. Cualidad para mantener las características deseadas para un período de vida de servicio aceptable dando un adecuado mantenimiento.

El último material es el sistema aislante líquido que baña las bobinas, el núcleo y los materiales aislantes sólidos. Este fluido sirve para tres propósitos primordiales:

- ❖ Provee una rigidez dieléctrica.
- ❖ Proporciona un enfriamiento eficiente.
- ❖ Protege al demás sistema aislante.

El fluido puede ser aceite mineral para transformador, silicona o r-temp, y de estos tres, el aceite mineral es usado en el llenado del 95% de los transformadores.

Es evidente que cualquier debilitamiento en el aislamiento puede conducir a una falla en el transformador. El aislamiento está deteriorado cuando ha perdido



una parte significativa de su propiedad dieléctrica original, característica mecánica o resistencia al impulso. La continuación en el proceso de deterioro terminará en lo inevitable: una falla mecánica o eléctrica.

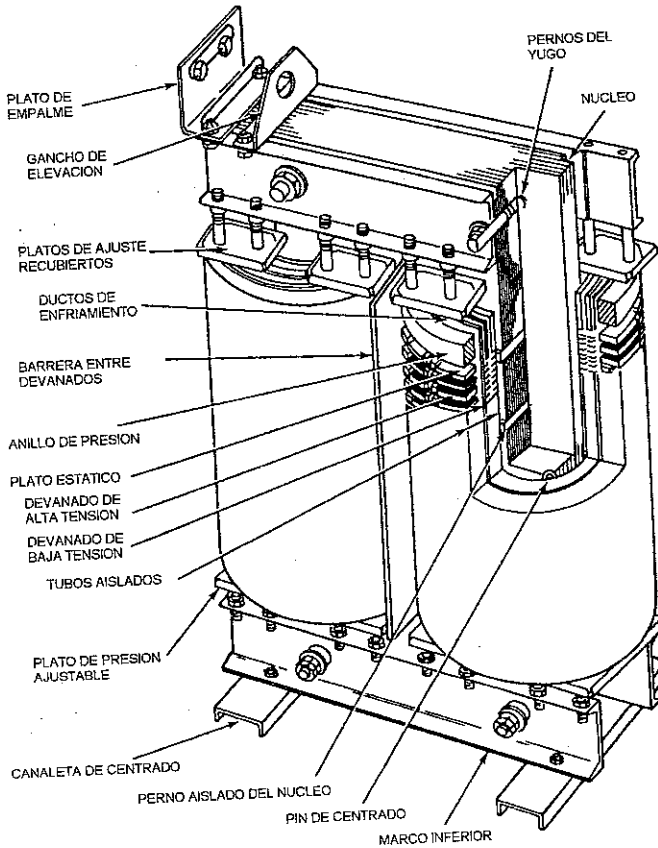


Figura 2.7 Construcción típica de un transformador tipo columnas

2.3.4 Tanque y accesorios

Los transformadores deben ser construidos con un tanque hermético, con objeto de preservar el aceite ya que éste tiene la función de dieléctrico y también de refrigerante, del conjunto núcleo-bobinas. El transformador debe permanecer



perfectamente sellado desde una temperatura de -5°C a un máximo de 105°C en la parte superior del líquido aislante.

Entre los accesorios más importantes de un transformador de distribución, están:

- Boquillas de porcelana de A.T. y B.T.
- Cambiador de derivaciones (o taps).
- Terminales de cobre para A.T. y B.T.
- Válvula de muestreo de aceite.

Para los transformadores de potencia habrá que incluir los siguientes:

- Termómetros con contacto y sin contacto de alarma.
- Niveles de aceite con contacto y sin contacto de alarma.
- Relevador Buchholz.
- Ventiladores, etc.

A todo lo anterior habrá que agregar el bastidor y los herrajes solicitados por las normas ofrecidas en las especificaciones de cada producto.

2.4. Parámetros eléctricos empleados en los transformadores

Al hablar de transformadores, nos encontramos con términos técnicos que conviene manejar adecuadamente. A continuación se mencionan algunos conceptos de los parámetros eléctricos más comúnmente empleados:

Tensión

Es la fuerza que origina el flujo de corriente y se expresa:

V : Tensión o diferencia de tensión (volts)

kV: volts x 1000 (kilovolts)



Corriente

Partículas eléctricas (electrones) libres que se mueven en un cierto sentido dentro del conductor del devanado, se expresa:

I : Corriente eléctrica (amperes)

Capacidad (Potencia)

Energía necesaria para mantener un cierto flujo de corriente demandado por una carga. Se expresa:

$$P = kV \times A = kVA = \text{kilo - volts amperes}$$

Flujo Magnético

Líneas de fuerza invisibles que viajan por el núcleo proporcionando el campo magnético necesario para realizar la inducción. Se expresa:

ϕ : Flujo magnético (webers)

Pérdidas en vacío

Energía consumida por el núcleo del transformador al estar el primario conectado a la fuente y el secundario sin carga (en vacío). Se expresa:

W_{Fe} : Pérdidas en el hierro (watts)

Corriente de excitación

Corriente que circula por el devanado primario al aplicarle su tensión nominal con el secundario sin carga. Es la corriente necesaria para producir el flujo magnético y se expresa en porciento de la corriente nominal como:

$$I_{ex} = \%I_n$$



Pérdidas con carga

Energía consumida por los devanados al tener en el secundario una carga, demandando la corriente nominal en este devanado. Se expresa como:

$$W_{Cu} : \text{Pérdidas en el cobre (watts)}$$

Impedancia (Tensión de impedancia)

Tensión aplicada al primario, capaz de producir la corriente nominal en el secundario, estando las terminales de éste último en cortocircuito. Se expresa en porciento de la tensión nominal del primario y representa la oposición del transformador a la corriente durante un cortocircuito.

$$\% \text{ Impedancia} = \% Z$$

BIL (Basic Impulse Insulation Level)

Es el Nivel Básico de Aislamiento al Impulso (NBI), y representa la capacidad en un transformador de soportar una "sobre tensión" producida por una descarga atmosférica o por apertura cierre del circuito de alimentación del transformador. Indica la tensión máxima de la sobretensión que debe soportar el equipo.

BIL : Nivel básico de aislamiento (kV)

Eficiencia

Relación entre la potencia útil de salida y potencia de entrada.

$$\% \eta = \frac{P_s}{P_e} \times 100$$

donde:

P_s : Potencia de salida útil

P_e : Potencia de entrada



Regulación

Variación de la tensión en el secundario, expresada en % de la tensión nominal del mismo, que se produce al conectar una carga y manteniendo constante la tensión aplicada al primario.

El transformador es un aparato eléctrico que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica de uno o más circuitos, a la misma frecuencia, usualmente amentando o disminuyendo los valores de tensión y corriente eléctrica. Un transformador puede recibir energía y devolverla a una tensión más elevada, en cuyo caso se le denomina transformador elevador, o puede devolverla a una tensión más baja, en cuyo caso es un transformador reductor. En el caso en que la energía suministrada tenga la misma tensión que la recibida en el transformador, se dice entonces, que este tiene una relación de transformación igual a la unidad.

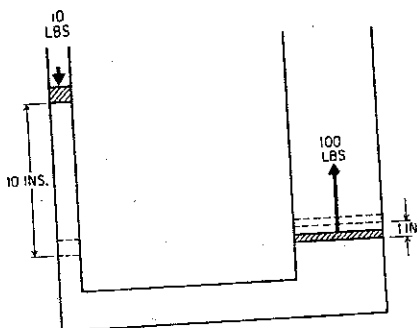


Figura 2.8 Analogía hidráulica (gato de agua o aceite) con un transformador

Los transformadores al no tener órganos giratorios, requieren poca vigilancia y escasos gastos de mantenimiento. El costo de los transformadores por kilowatts es bajo, comparado con el de otros aparatos o máquinas, y su rendimiento es mucho muy superior: Como no hay dientes, ni ranuras, ni partes giratorias, y sus arrollamientos pueden estar sumergidos en aceite, no es difícil lograr un buen aislamiento para muy altas tensiones.



2.5 Principios de operación del transformador monofásico

El transformador basa su operación en la acción mutua entre fenómenos eléctricos y magnéticos, y no contienen partes móviles o movibles (a excepción hecha de los mecanismos para cambio de derivaciones y la impulsión de ventiladores o bombas de enfriamiento utilizados en los grandes transformadores de potencia). La transferencia de la energía eléctrica por inducción electromagnética de un arrollamiento a otro, dispuestos en el mismo circuito eléctrico, se realiza con excelente rendimiento. Las fuerzas electromotrices (f.e.m.) se inducen por la variación del flujo magnético. Las espiras y el circuito magnético están en reposo uno con respecto al otro, y las f.e.m. se inducen por la variación de la magnitud del flujo con el tiempo.

El núcleo, como se representa en la figura está formado de chapas de acero (grado eléctrico) superpuestas y con aislamiento interlaminar propio, de forma rectangular. En uno de los lados del núcleo se arrolla un devanado continuo P y en el opuesto otro devanado continuo S, que puede tener el mismo número de espiras que P, o no tenerlo. Una fuente suministra corriente alterna al arrollamiento primario P, en el que, al estar montado sobre el núcleo, su f.m.m. produce un flujo alternativo ϕ en el mismo. Las espiras del arrollamiento S abrazarán este flujo que, al ser alternativo, induce en S una f.e.m. de la misma frecuencia que el flujo. Debido a esta f.e.m. inducida, el arrollamiento secundario S es capaz de suministrar corriente y energía eléctrica. La energía, por lo tanto, se transfiere del primario P al secundario S por medio del flujo magnético.

El arrollamiento P, que recibe la energía, se llama el primario. El arrollamiento S, que suministra energía, se llama el secundario. En un transformador, cualquiera de los arrollamientos puede hacer de primario, correspondiendo al otro hacer de secundario, lo que sólo depende de cual de los dos es el que recibe la energía o el que la suministra a la carga.



El diseño mecánico de un transformador requiere de análisis minuciosos en cada uno de sus componentes tanto eléctricos como mecánicos, ya que un transformador de alta potencia, debido a su alto costo de producción tiene a su vez un amplio margen de garantía, que aproximadamente es de 20 años, por lo que se hace necesario que dicho diseño sea lo más eficiente y duradero posible, en la sección siguiente se hará un recuento de los conceptos necesarios que se deberán considerar en este trabajo de tesis para abordar de una manera más conveniente el desarrollo de la misma.

2.6 El diseño mecánico

Los ingenieros mecánicos se asocian con la producción y el procesamiento de energía, proporcionando los medios de producción, las herramientas de transportación y las técnicas de automatización. Las bases de la habilidad y del conocimiento son extensas. Entre las bases disciplinarias se encuentran la mecánica de sólidos, de fluidos, la transferencia de masa y momento, los procesos de manufactura y la teoría eléctrica. El diseño en la ingeniería mecánica involucra todas las disciplinas de la ingeniería mecánica.

En ocasiones los problemas se resisten la especialización. Un simple muñón y cojinete involucra flujo de fluidos, transferencia de calor, fricción, transporte de energía, selección de materiales, tratamientos termomecánicos, descripciones estadísticas, etcétera. En forma similar, el *diseño de motores de combustión interna*, el *diseño de turbo-maquinaria* y el *diseño de motores de reacción* algunas veces se consideran entidades discretas. La serie de adjetivos que siguen a la palabra *diseño* solamente es una ayuda para la descripción del producto en la comunicación del proceso. Hay frases como "*diseño de máquinas*", "*diseño de elementos de máquinas*", "*diseño de componentes mecánicos*", "*diseño de sistemas*" y "*diseño de potencia hidráulica*". Todo lo anterior son ejemplos un poco más enfocados hacia el diseño en la ingeniería mecánica. Se basan en las



mismas fuentes de conocimiento, se organizan en forma similar y requieren habilidades semejantes.

La ciencia explica lo que es, la ingeniería crea lo que *no existía*. Las matemáticas ni son ciencia ni ingeniería. La física y la química son ciencias, pero no ingeniería. Se requiere un tipo de talento para ser un científico y otro diferente para crear lo que no existía. Los ingenieros y científicos saben algo del trabajo del otro, pero sólo en raros casos se desarrollan ambos talentos en un individuo. Se requiere talento y habilidad para crear e innovar, talento para solucionar problemas de forma consistentemente exitosa y para tomar decisiones, y talento para comunicar de manera efectiva. La preparación, es el desarrollo y el pulido del talento, cualquiera que sea la empresa. "Hay buenos ingenieros innovadores que no son grandes analistas, y analistas finos que no pueden innovar. El mundo necesita ambos y ellos trabajan juntos."¹³

2.7 La tecnología en el diseño mecánico

Actualmente hay muchas herramientas de cómputo para ayudar al diseñador a terminar las tareas. Hay información espacial (geométrica), procesadores de números y mezclas de estas funciones. Hay muchos programas: Matlab, MathCad, Excel, Quattro-Pro, EES, Maple, TKsolver, ANSYS, I-DEAS, Pro/E y AutoCAD, sólo por nombrar algunos.

Los humanos escriben programas y cometen errores en la codificación, en la lógica y en el uso de la teoría que no es del dominio de aplicación del programa. Ocurrió un caso en el cual las ecuaciones estaban correctas pero la lógica importante no estaba codificada. Se proporcionó un programa de esfuerzo plano, aceptando los esfuerzos normales y los esfuerzos cortantes sobre planos ortogonales y proporcionando los esfuerzos principales y el esfuerzo cortante

¹³ J. E. Shigley y C. R. Mischke, "Diseño en Ingeniería Mecánica", Mc Graw Hill, México, 2002.



máximo. Algunas veces en un problema de esfuerzo plano, el esfuerzo cortante máximo ocurre fuera del plano, así que, de vez en cuando, la respuesta del programa simplemente era errónea.

Quizá haya problemas que se deben resolver y que requieren que se escriba un propio programa de computo. En esta circunstancia es útil tener en mente qué es lo que una computadora hace bien:

- Recordar datos y programas.
- Calcular.
- Ramificar condicional o incondicionalmente. La ramificación con base en la verdad o falsedad es similar a la toma de decisiones.
- Hacer iteraciones, hacer una tarea repetitiva o fija, un número apropiado de veces.
- Leer y escribir información alfabética y numérica.
- Dibujar, algunas veces lo suficientemente rápido para hacer animaciones en tiempo real.
- Hacer pausas y esperar decisiones externas o una entrada cuidadosa.
- No se cansa.

También resulta útil recordar qué pueden hacer los humanos.

- Entender el problema.
- Juzgar lo que es importante y lo que no lo es.
- Planear estrategias y modificarlas a la luz de la experiencia.
- Ser escépticos, recelosos y testarudos.
- ¡Programar computadoras!

Un programa de computo es un conjunto de especificaciones para el análisis, diseño, manufactura y construcción de algo. El propósito de un programa consiste en lograr un grado específico de seguridad, eficiencia y desempeño o



calidad. Es importante observar que los programas de seguridad no implican *seguridad absoluta*. De hecho, la seguridad absoluta es imposible de obtener. Algunas veces un suceso inesperado realmente acontece. Diseñar un edificio para que resista un viento de 120 km/h no significa que el diseñador piense que un viento de 140 km/h es imposible; sólo significa que piensa que es improbable.

2.8 La economía en el diseño mecánico

La consideración del costo tiene una función tan importante en el proceso de la decisión de diseño que fácilmente podríamos emplear el mismo tiempo en estudiar el factor del costo como en el estudio de todo el tema de diseño.

Primero, no se puede decir nada en un sentido absoluto respecto a los costos. Los materiales y la mano de obra a menudo incrementan su costo de un año a otro. Pero es de esperar que los costos del procesamiento de materiales presenten una tendencia a la baja debido al empleo de máquinas herramientas automatizadas y robots industriales. El costo de fabricar un mismo producto varía de ciudad en ciudad y de una planta a otra, debido a las diferencias en los gastos generales, mano de obra, impuestos en fletes y a las ligeras variaciones en la manufactura.

2.8.1 Estandarización en los tamaños

La utilización de tamaños estándar o corrientes es el principio fundamental de la reducción del costo. Un ingeniero que especifica una barra AISI 1020 de acero laminado en caliente de sección cuadrada de 53 mm de lado, denominada cuadrado laminado en caliente, tiene un costo agregado al producto, ya que una barra estándar cuadrada de 50 o 60 mm, que tiene un tamaño preferible, funcionaría igualmente bien. La medida de 53 mm se puede obtener por medio de



pedido especial, o laminando o maquinando una barra cuadrada de 60 mm, pero estos enfoques agregan costo al producto.

Para asegurar que se especifiquen tamaños estándar o recomendables, el diseñador debe tener acceso a las listas de existencia de los materiales que emplean. Dichas listas se encuentran disponibles en bibliotecas o se pueden obtener de manera directa de los proveedores.

Aunque una mayor parte de los tamaños suelen listarse en catálogos, no se dispone de todos con facilidad. Algunos tamaños se emplean rara vez, por lo que no se almacenan. Un pedido urgente de esos tamaños puede significar más gastos y retrasos. También debe tener acceso a una lista donde se proporcionan los tamaños recomendables en pulgadas y milímetros.

Hay muchas piezas que se deben comprar (motores, bombas, cojinetes y sujetadores) porque los especifican los diseñadores. En este caso, también hay que hacer un esfuerzo especial para especificar partes que se consigan con facilidad. Las partes que se hacen y se venden en grandes cantidades por lo general cuestan menos que las de tamaños poco comunes. Por ejemplo, el costo de los cojinetes de bolas, depende más de la cantidad de producción del fabricante de cojinetes, que del tamaño del cojinete.

2.8.2 Tolerancias

Entre los efectos de las especificaciones de diseño sobre los costos, los de las tolerancias tal vez sean los más significativos. Las tolerancias en el diseño influyen de muchas maneras en la factibilidad de fabricación del producto final; las tolerancias estrictas quizá necesiten pasos adicionales en el procesamiento o incluso provocan que una parte sea económicamente impráctica para producirse. Las tolerancias cubren la variación dimensional y el intervalo de rugosidad



superficial, así como la variación en las propiedades mecánicas que resultan del tratamiento térmico y de otras operaciones de procesamiento.

Las partes que tienen tolerancias amplias a menudo se producen por medio de máquinas con velocidades de producción mayores, los costos de la mano de obra serán menores en comparación con los procedimientos que requirieren operadores expertos. Asimismo, se rechazarán menos partes en el proceso de inspección y a menudo serán más fáciles de ensamblar.

2.8.3 Búsqueda del equilibrio

Algunas veces sucede que, cuando se compara el costo de dos o más enfoques de diseño, la elección entre los dos depende de un conjunto de condiciones como la cantidad de producción, la velocidad en las líneas de ensamble o de alguna otra condición. Así, se llega a un punto que corresponde a costos iguales, el cual se llama punto *de equilibrio*.

2.8.4 Estimación de los costos

Hay muchas formas de obtener las cifras relativas de los costos, de manera que dos o más diseños se comparen aproximadamente. En algunos casos se requiere cierto criterio. Por ejemplo, se puede comparar el valor relativo de dos automóviles mediante su costo monetario por unidad de peso. Otra manera de comparar el costo de un diseño con otro es simplemente contando el número de partes. El diseño que tenga el número menor de partes tal vez cueste menos. Se utilizan muchos estimadores de costos, según sea la aplicación, como área, volumen, potencia, par de torsión, capacidad, velocidad y diversas relaciones de desempeño.



2.9 La seguridad y la responsabilidad legal

Uno de los puntos delicados que algunas veces se presenta en la práctica de la ingeniería se manifiesta en aquello que se debe hacer si se detecta algo que se considera ingeniería defectuosa. Si es posible, por supuesto, se debe tratar de corregirlo o realizar pruebas suficientes para demostrar que los temores son infundados. Si ninguno de los métodos es posible, entonces otra forma consiste en colocar un memorando en el archivo de diseño y mantener una copia del memorando en caso de que se pierda el "original".

Las mejores formas para prevenir la responsabilidad legal son la buena ingeniería en el análisis y el diseño, el control de calidad y los procedimientos exhaustivos de ensayos. Los gerentes de ventas con frecuencia hacen promesas resplandecientes en las garantías y en la documentación de venta de un producto. Tales enunciados deben analizarlos cuidadosamente el personal del departamento de ingeniería para eliminar promesas excesivas y para insertar advertencias adecuadas e instrucciones para el uso.

2.10 La evaluación

La evaluación es una idea tan útil e importante que también se le conoce como la habilidad más importante del diseñador. Una evaluación de adecuación comienza con el conjunto de especificaciones de un diseño simple, o con toda la descripción del diseño (dibujos de ensamble, dibujos de detalles y la lista de materiales) cuando el diseño es complejo.

Si se enfrenta con un diseño terminado (todas las decisiones hechas), el diseñador debe preguntar si todas las restricciones se han satisfecho en una manera que iguale o exceda las expectativas o en un grado menor que el



esperado. Una evaluación representa un criterio para ver si las restricciones se han satisfecho y realizado de manera óptima.

Una evaluación consiste en un proceso por medio del cual la información se reúne y se usa para decidir si las restricciones y la optimización recibieron una atención apropiada. Puede variar en algún o algunos detalles de caso a caso, de manera que siempre resulta familiar, pero un poco diferente. Consiste en varios pasos empíricos y teóricos, así como de modelos matemáticos; son ideas que un ingeniero emplea para decidir si un diseño existente (y sus partes) es funcional, seguro, confiable, etcétera. Una evaluación se compone de ideas simples. Uno se familiariza con el proceso realizando algunas partes de él y analizando situaciones cada vez más complejas, adquiriendo de esta manera destreza.

Al considerar cada uno de las consideraciones del diseño como la resistencia y el esfuerzo, las preguntas siguientes pueden ayudar:

- ¿Cuál resistencia (última, a la tensión, límite elástico, fatiga, fluencia, etcétera)?
- ¿Cuál esfuerzo (de tensión, cortante, principal, Von Mises, etcétera)?
- ¿Cuál par de esfuerzo y resistencia revela más sobre la integridad funcional?, y
- ¿cuál localización o localizaciones son críticas?
- ¿Cuánta disparidad entre el esfuerzo y la resistencia es "suficiente"?

Una segunda característica es la confiabilidad, que puede implicar las preguntas siguientes:

- ¿Qué clases de pérdidas de función están presentes?
- ¿Cuál es la probabilidad de falla en cada etapa?
- ¿Se cumple o se excede la meta de la confiabilidad?

Luego se tratan puntos adicionales en la lista de consideraciones.



Una evaluación identifica las preguntas que se van a hacer, obtiene estimados cuantitativos de las respuestas, incluye modelos matemáticos y considera la compatibilidad con la naturaleza y el lugar de mercado. Igual que con cualquier habilidad intelectual, la destreza es el resultado de iniciar con ejemplos simples, seguir con problemas de simulacro en aplicaciones y luego hacer ejercicios que demanden evaluaciones específicas en situaciones nuevas para el ingeniero. Resulta importante desarrollar una idea de la relación de la naturaleza y del lugar de mercado. Aquí la destreza es importante, porque la congruencia de estos factores representa la base de un algoritmo de diseño que se puede emplear después. Implica conocimiento, criterio, destreza y consistencia.

2.11 La Incertidumbre

Las incertidumbres en el diseño de maquinaria abundan. Entre éstas se encuentran las incertidumbres respecto a:

- La composición del material y el efecto de las variaciones en las propiedades.
- Las variaciones en las propiedades de lugar a lugar dentro de una barra de material.
- El efecto del procesamiento local, o cercano, en las propiedades.
- El efecto de ensambles cercanos, como soldaduras y ajustes por contracción, en las condiciones del esfuerzo.
- El efecto del tratamiento termomecánico en las propiedades.
- La intensidad y distribución de las cargas.
- La validez de los modelos matemáticos utilizados para representar la realidad.
- La intensidad de las concentraciones de esfuerzos.
- La influencia del tiempo sobre la resistencia y la geometría.
- El efecto de la corrosión.



- El efecto del desgaste.
- La incertidumbre respecto a la longitud de cualquier lista de incertidumbres.

Los ingenieros debemos acomodar la incertidumbre. Muchos elementos de máquinas ya eran conocidos por los ingenieros en tiempos antiguos (tercer siglo a.C.), pero las formas modernas quizá no las reconocerían. Las innovaciones en los materiales y las técnicas de manufactura, teorías perspicaces, las ventajas computacionales y el talento inventivo de algunos de nuestros ancestros más recientes han provocado cambios enormes.

La incertidumbre siempre acompaña a un cambio. Las propiedades de los materiales, la variabilidad de la carga, la fidelidad de la fabricación y la validez de los modelos matemáticos empleados se encuentran entre las principales preocupaciones. Los métodos usados por los ingenieros para abordar esas preocupaciones evolucionaron a medida que la ingeniería se desarrollaba. Los primeros dos métodos analizados preceden al concepto de esfuerzo, introducido por Cauchy en 1882.

2.11.1 El método romano

El primer método conocido que abordaba la incertidumbre se remonta a los tiempos macedonios, varios siglos antes de Cristo. El método se utilizaba para reproducir un diseño ya probado y durable. Con este fin se compilaron enciclopedias de obras arquitectónicas de ingeniería, como el compendio de Vitrovio (siglo 1 a.C.). En la era de Aristóteles (384-322 a.C.), los griegos sabían cómo determinar momentos y reacciones en vigas en voladizo y simplemente apoyadas, asimismo conocían la influencia del ancho y la profundidad de las vigas de sección transversal rectangular sobre la capacidad de soporte de carga.



2.11.2 El método de Pila del factor de seguridad

El segundo método, del cual el registro más antiguo es el de Pilo de Bizancio (siglo 111 a.C.), era para separar la carga de la pérdida de la función y la carga impuesta, mediante la relación n_d , definida como:

$$n_d = \frac{\text{Carga de pérdida de la función}}{\text{Carga impuesta}}$$

donde n_d es el *factor de diseño*. Una *carga permisible* se puede encontrar por medio de:

$$\text{Carga permisible} = \frac{\text{Carga de pérdida de la función}}{\text{Carga impuesta}}$$

2.11.3 El método del esfuerzo permisible

Después de que se formuló el concepto de esfuerzo, se propuso un punto de vista del esfuerzo permisible. El esfuerzo permisible se elige como una fracción de una propiedad significativa del material, la resistencia. La fracción se escoge con base en la experiencia conjunta de ingenieros que tienen diseños exitosos.

Este método tiene la ventaja de que proporciona un consejo respecto a la fracción de una propiedad simplemente medida. En tanto que el énfasis en los primeros dos métodos era sobre las cargas, aquí se ha desplazado a una propiedad del material. En el siglo XX tuvo su más rápido desarrollo.

Este método se emplea en la ingeniería civil (estructuras) y lo adoptó la AISI. También se puede ver en la tecnología de la soldadura.



2.11.4 El esfuerzo permisible por el método del factor de diseño

Las técnicas de análisis han madurado más rápido que las de síntesis en los últimos 150 años. Como resultado, gran parte de la síntesis se logró por medio del anti-análisis; es decir, se visualiza una solución y luego se analiza para ver si fue satisfactoria. Si un ingeniero comenzó con un factor de seguridad, procedió con el método de Pilo y tornó todas las decisiones necesarias, el factor de seguridad resultante se incrementaba debido al redondeo. Por ejemplo, si se necesitaban 5.3 pernos se convertían en 6 o los diámetros necesarios de 0.9 se convertían en 1 debido a la estandarización, la cual resulta en sujetadores producidos en masa en tamaños discretos nominales. Así, el factor de seguridad se incrementa durante el proceso de diseño y las mismas palabras no se deben emplear para describir cosas diferentes.

Los ingenieros comenzaron a hacer una distinción entre el objetivo (factor de diseño) y la realización (factor de seguridad). El esfuerzo permisible se define como

$$\sigma_{perm} = \frac{\text{resistencia}}{n_d^m}$$

donde m es el exponente de la carga en la ecuación carga a esfuerzo y n_d , es el factor de diseño. Aquí se sigue la práctica aceptada de utilizar la letra griega sigma (σ) para denotar el esfuerzo. Con frecuencia el exponente m es la unidad porque en las cargas simples (tensión, compresión, cortante, flexión, torsión) los esfuerzos inducidos son directa y linealmente proporcionales a la carga. Muchos ingenieros consideran a σ_{perm} como (resistencia)/ n_d . No hay nada de malo al hacer esto *siempre y cuando uno esté dispuesto a resolver ecuaciones no lineales de carga a esfuerzo*, como sucede en los esfuerzos de contacto en los cojinetes de contacto rodante y en los dientes de engranes. El factor de diseño aún se elige por medio de la experiencia conjunta de ingenieros y corporaciones.



2.11.5 El método del factor de diseño estocástico

La creciente atención que la comunidad de ingenieros del siglo XX puso sobre la aviación y el espacio, los sistemas de control y el comportamiento de conjuntos de máquinas como sistemas, condujo a cuantificar la *confiabilidad*. La atención se enfocó no sólo en la forma que se mide la confiabilidad de un sistema mediante la experiencia con el sistema, sino como un objetivo aproximado y realizable en el diseño del sistema y sus componentes. En la tabla 2.1 se ofrecen sugerencias con base en la experiencia obtenida hasta 1948. Se presenta para dar una perspectiva del análisis precedente. Se puede observar en la tabla el uso de palabras imprecisas que tienen poco significado. El intento de Visodic, quien originó las categorizaciones en la tabla, fue comunicar aproximaciones a la incertidumbre, antes de que los métodos estadísticos se hubieran desarrollado.

Conocimiento de las cargas	Conocimiento del esfuerzo	Conocimiento del entorno	Conocimiento del material	Factor de seguridad
1) Determinación precisa	Determinación precisa	Condiciones controlables	Muy conocido	1.25-1.5
2) Determinado fácilmente	Determinado fácilmente	Razonablemente constante	Muy conocido	1.5-2.0
3) Determinable	Determinable	Ordinario	Promedio	2.0-2.5
4) Promedio	Promedio	Promedio	Menos probado o frágil	2.5-3.0
5) Promedio	Promedio	Promedio	No probado	3.0-4.0
6) Incierto	Incierto	Incierto	Mejor conocido	3.0-4.0

Tabla 2.1 Factores de seguridad y circunstancias en las cuales se usan¹⁴

Fuente: La base de esta tabla se debe a J. P. Visodic, "Design Stress Factors", Proc. ASME, vol. 55, mayo de 1948.

¹⁴ Para cargas repetidas, el factor de seguridad se aplica a la resistencia a la fatiga. Para cargas de impacto, utilizar los puntos del 3 al 6, pero incluir un factor de impacto. En materiales frágiles, cuando se emplee la resistencia último, usar al doble los puntos del 1 al 6. Si se requieren factores mayores, refinar los análisis y ensayos.



Las corporaciones tienen manuales de diseño afinados por ingenieros supervisores de la planta, y reflejan la experiencia corporativa como una guía para los diseñadores.

Los ingenieros siempre tuvieron en cuenta a la incertidumbre desde el inicio de la ingeniería y se han tenido grados variables de éxito. Las ventajas que tenemos sobre nuestros predecesores es que tenemos una reserva de experiencia que se ha acumulado y codificado, así como una habilidad experimental y una teoría sagaz. Estas ventajas nos permiten conocer lo que necesitamos saber, porque todas las respuestas aún no están disponibles.

Como un ejemplo, reflexionaremos en los obstáculos encontrados por mucha gente talentosa. Consideremos la flexión, la cual confundió a Galileo (1564-1642). Hooke (1660) contribuyó correctamente con una "teoría de resortes". Mariotte (1686) lo hizo a través de las fibras de una viga comprimida y extendida. Al suponer que la mitad estaba comprimida y la otra extendida, sospechó de una superficie neutra "en medio". Bernoulli (1774) pensó que las secciones planas permanecían planas antes y después de la flexión, aunque no desarrolló más esta idea. Euler (1725) encontró la curva elástica sin comprender qué estaba sucediendo internamente.

A mediados de 1700 las máquinas de ensayo comenzaron a aparecer y el concepto de deformación se agregó. Coulomb (1773) propuso un argumento de la deformación para localizar la superficie neutra. Young (1807) no tuvo una idea clara de dónde estaba la superficie neutra, pero escribió tanto acerca de ella ("línea neutra", "eje neutro") que los términos sobreviven hasta este día. Navier (1821) escribió las ecuaciones de equilibrio y usó una "intensidad de la fuerza". Cauchy (1822) combinó las nociones de esfuerzo y deformación con el trabajo de Hooke, Young y Poisson para crear la teoría de la elasticidad de dos parámetros.



En 1827 la aplicó a problemas prácticos, tal como la flexión. La comprensión de la flexión tomó más de 200 años, con la contribución de mucha gente.

Finalmente el genio salió de la botella cuando el profesor I. P. Church, de Cornell University, inventó el *diagrama de cuerpo libre* (1887), un concepto que permitió que la gente sin genio usara el conocimiento, los conceptos y los primeros principios para construir modelos matemáticos que tuvieran una realidad embebida, lo cual a su vez crea ideas que nos ilustran más y sugiere instrucciones para un estudio adicional.

2.12 Factor de diseño y factor de seguridad

El método del AISC (*American Institute of Steel Construction*) para relacionar el esfuerzo y la resistencia también se emplea en algunas otras áreas especializadas. Sin embargo, no es un enfoque general, puesto que sólo toma en cuenta materiales y cargas específicas. En el diseño en la ingeniería mecánica hay categorías de situaciones que confrontan al ingeniero.

- El producto se hace en grandes cantidades, es valioso, o es peligroso, lo que justifica el ensayo elaborado de materiales, componentes y prototipos en el campo.
- El producto se hace en cantidades suficientes para justificar un programa modesto de ensayos del material, tal vez tan pequeño como los ensayos a la tensión última.
- El producto se hace en cantidades tan pequeñas que no se realiza un ensayo de los materiales.

Las dos últimas situaciones son las de cuidado. También existe la pregunta del producto defectuoso: ¿por qué? ¿Cómo se puede remediar?



Un enfoque general para el problema de la carga permisible, carga de pérdida de la función, es el método *del factor de diseño*, que se utiliza de una forma u otra desde Pilo, y algunas veces se llama método de diseño clásico. La ecuación fundamental es:

$$\text{Carga permisible} = \frac{\text{Carga de pérdida de la función}}{n_d}$$

donde n_d se llama *factor de diseño*. Para una carga de pérdida de la función dada, si se incrementa al doble el factor de diseño disminuye a la mitad la carga permisible. Para ser más útil, esta propiedad se hace que persista sin importar la linealidad o la falta de linealidad del esfuerzo con carga. La evaluación de adecuación en los métodos del factor de diseño consiste en parte de la estimación del *factor de seguridad* de la totalidad del diseño. El factor de seguridad n tiene la misma definición que el factor de diseño, pero difiere numéricamente debido al redondeo (por lo general hacia arriba) causado por el uso de tamaños estándar y de componentes que provienen de anaqueles.

Al evaluar el factor de seguridad en un elemento, digamos un diente de un engrane que puede fallar por fatiga, por flexión o por fatiga superficial, se nota que el diente tiene un factor de seguridad que lo protege contra la fatiga por flexión, y otro factor de seguridad que lo protege contra la fatiga superficial. Si estos factores de seguridad numéricamente son 1.5 y 1.3, entonces la fatiga superficial ocurrirá antes que la fatiga por flexión (1.3 vs. 1.5) y un incremento de 30% en la potencia (par de torsión) pondrá en riesgo este modo de falla.

Cuando Hooke descubrió el comportamiento elástico en resortes de metal, el concepto del esfuerzo aún estaba a 162 años de distancia. El concepto de esfuerzo dio la oportunidad para expresar el factor de diseño en términos del



esfuerzo. Con la invención de las máquinas de ensayo,¹⁵ donde se podían inducir modos particulares de falla, los factores de diseño llegaron a expresarse en términos de un esfuerzo y una resistencia relevante.

2.13 La confiabilidad

En estos días de mayor número de demandas por responsabilidad legal y la necesidad de cumplir con los reglamentos establecidos por las agencias gubernamentales, es muy importante que el diseñador y el fabricante conozcan la responsabilidad legal de su producto. El *método de confiabilidad de diseño* es donde se conoce o se determina la distribución de los esfuerzos y de las resistencias; después se relacionan las dos con objeto de lograr un índice de éxito aceptable.

La medida estadística de la probabilidad para que un elemento mecánico no falle en el servicio se llama *confiabilidad* de ese elemento. La confiabilidad R se expresa mediante un número que tiene un intervalo entre 0 y 1 una confiabilidad de $R = 0.90$ significa que hay una probabilidad de 90% que la parte realice una función adecuada sin falla. La falla de 6 partes, de cada 1000 fabricadas, se podría considerar un índice de falla aceptable para una cierta clase de productos. Esto representa una confiabilidad de:

$$R = 1 - \frac{6}{1000} = 0.994 \quad \text{ó} \quad 99.4 \%$$

En el *método de confiabilidad de diseño*, la tarea del diseñador consiste en hacer una selección sensata de materiales, procesos y dimensiones (tamaño) para lograr un objetivo de confiabilidad. De esta manera, si el objetivo de confiabilidad

¹⁵ Musschenbrock (1729), Perronet (1768), luego contribuyeron Gauthey, Rondelet, Girard y Williams. El primero que empleó la prensa hidráulica y la viga balanceada fue Lagerbjem en 1827. La característica importante es el control del modo de falla durante la medición y la introducción de la noción de la resistencia del material, verificada por ensayo y usando el concepto de esfuerzo debido a Cauchy (1822).



ha de ser 99.4%, como se indicó, ¿qué combinación de materiales, procesos y dimensiones se necesita para cumplir con este objetivo?

Los análisis que conducen a una evaluación de confiabilidad traducen incertidumbres, o sus estimaciones, en parámetros que describen la situación. Las variables estocásticas (como el esfuerzo, la resistencia, la carga o el tamaño) se describen en términos de sus medias, desviaciones estándar y distribuciones. Si se producen bolas de cojinetes por medio de un proceso de manufactura en el cual se crea una distribución de diámetros, se puede decir, cuando se escoge una bola, que existe incertidumbre en su tamaño. Si se desea considerar el peso o el momento de inercia en el rodamiento, dicha incertidumbre del tamaño se considera que se *propaga* a nuestro conocimiento del peso o la inercia. Hay modos de estimar los parámetros estadísticos que describen el peso y la inercia, con base en los que describen el tamaño y la densidad. Tales métodos se llaman de diversas formas: *propagación del error*, *propagación de la incertidumbre* o *propagación de la dispersión*. Estos métodos son parte integral de las tareas de análisis o síntesis cuando está implícita la probabilidad de falla.

El método del factor de diseño estocástico y el enfoque del método estocástico para el diseño son relativamente nuevos, si se considera el alcance de la historia del diseño de máquinas. Se tienen registros del comportamiento histórico de ensambles de materiales, y sus descripciones estadísticas. Si los usa el diseñador, puede lograr una meta especificada de confiabilidad. Al hacer esto, los tamaños dimensionales de las partes serán mayores que si el diseñador hubiera determinado la información estocástica sobre el material seleccionado al final.

El enfoque estadístico ofrece la oportunidad de considerar las metas de confiabilidad y otras ideas, que los métodos de la antigüedad no podían. Si las cargas que se someterán en la transmisión de un tractor en un campo son



inciertas; entonces las barras de tracción instrumentales en estudios de campo producen información que se entiende mejor en interpretaciones estocásticas, en comparación con las determinísticas. La estadística permite la cuantificación y explicación de la variación. En la naturaleza se puede presentar una variabilidad individual con regularidad a largo plazo. La estabilidad no es única en magnitud, sino en un patrón de variación: una mezcla de efectos sistemáticos y aleatorios. La estadística permite que éstos se separen; los modos en que los modelos describen la información y las formas en que los modelos critican la información tienen que ver con la variación y sus mediciones, y acerca del empleo sensible de la información, a fin de aclarar temas oscuros.

2.14 Esfuerzo y resistencia

La supervivencia de muchos productos depende de cómo el diseñador ajusta el esfuerzo inducido por la carga para que sea menor que la resistencia en un punto de interés. El diseñador debe permitir que la resistencia exceda al esfuerzo por un margen suficiente, de manera que a pesar de las incertidumbres, la falla no sea frecuente.

Al enfocar la comparación esfuerzo-resistencia en un punto crítico (controlador), a menudo se busca "resistencia en la geometría y condición de uso". Las resistencias son esfuerzos en los cuales ocurre algo de interés, como el límite de proporcionalidad, la fluencia desplazada 0.2%, o la fractura. En muchos casos, estos sucesos representan el nivel de esfuerzo en el que ocurre la pérdida de la función.

El nivel del esfuerzo permisible se establece al acordar que la fracción apropiada de la resistencia relevante sea un nivel del esfuerzo de trabajo satisfactorio. Un esfuerzo permisible se determina dividiendo la resistencia relevante entre el factor de diseño. Aunque éstos son algebraicamente similares,



la fracción quizá no incluya información de la carga, en tanto que el factor de diseño sí lo haga. Esta distinción tal vez se pierda en el lenguaje utilizado por los diseñadores. Distinciones más finas entre los términos *esfuerzo admisible*, *esfuerzo permisible* o simplemente *admisibles*, *permisibles*, con pérdida de precisión, simplemente *admisibles*, *quizá se pierdan*, y si la distinción es importante, se debe escuchar e interrogar cuidadosamente.

La *resistencia* es una *propiedad* de un material o de un elemento mecánico. La resistencia de un elemento depende de la elección, el tratamiento y el procesamiento del material. Consideremos, por ejemplo, la fabricación de 1000 resortes. Se asocia una resistencia S_i con el resorte i -ésimo. Cuando este resorte se incorpora en una máquina, se aplican fuerzas externas que provocan esfuerzos en el resorte, las magnitudes de las cuales dependen de su geometría y son independientes del material y su procesamiento. Si el resorte se quita de la máquina sin daño alguno, el esfuerzo debido a las fuerzas externas disminuirá a cero, su valor antes del ensamble. Pero la resistencia S_i permanece como una de las propiedades del resorte, recordemos, entonces, que la *resistencia es una propiedad inherente de una parte*, una propiedad construida en la parte debido al empleo de un material y un proceso particular.

Varios procesos de trabajo en metales y de tratamiento térmico, como el forjado, el laminado y el formado en frío, causan variaciones en la resistencia de punto a punto en toda la parte. El resorte arriba citado es muy probable que tenga una resistencia en el exterior de las espiras diferente a su resistencia en el interior, ya que el resorte se ha formado por un proceso de arrollado en frío y los dos lados quizá no se hayan deformado en la misma cantidad. Por lo tanto, también recordemos que un valor de la resistencia dado para una parte se aplica sólo a un punto particular o a un conjunto de puntos en la parte.



Uno de los problemas básicos, cuando se trata con el esfuerzo y la resistencia, es la forma de relacionar los dos con objeto de desarrollar un diseño seguro, económico y eficiente. Al estudiar este problema será útil examinar esta relación como se aplica en una rama particular del diseño en la ingeniería. El American Institute of Steel Construction (AISC), fundado en 1921, es una sociedad no lucrativa cuyos objetivos son mejorar y desarrollar el empleo del acero estructural fabricado. Para lograr dichos objetivos, el AISC publica manuales, libros de texto, especificaciones y folletos técnicos. El más conocido y el que más se utiliza es el "*Manual of Steel Construction*", que mantiene una posición respetada en la literatura de la ingeniería. En dicho manual se incluyen normas importantes como la "*Specification for the Design, Fabrication, and Erection of Structural Steel for Buildings*" y el "*Code of Standard Practice for Steel Buildings and Bridges*".

Antes de considerar los detalles de los esfuerzos en un punto y las relaciones entre las componentes del esfuerzo, resulta importante hacer notar la relación global entre la carga y las componentes del esfuerzo en un punto. Aquí la palabra *carga* se emplea en forma genérica y es un sinónimo para una influencia externa como una fuerza, un par de torsión o una tracción cortante.

Por medio del control de la geometría y del material, que incluye un tratamiento termomecánico, el diseñador mantiene la integridad del diseño; es decir, lo hace funcional, seguro, confiable, utilizable, fabricable y comercializable. La pérdida de función se debe anticipar; es decir, cuando las partes fluyen, se rompen, se fatigan, termofluyen, etcétera. El punto de vista más útil del problema comienza con el entendimiento de influencia de una carga externa en los esfuerzos dentro del cuerpo.

En la historia de la mecánica, el esfuerzo y la deformación se comprendieron primera vez en un momento más bien tardío. En 1660, Robert



Hooke tuvo algunas nociones respecto a los cuerpos (de acero, hierro y latón) que presentaban deformación elástica sometidos a una carga. El trabajo de Thomas Young, alrededor de 1807, y su módulo, mejoraron la comprensión de los materiales de tal forma que en 1820 ya se estaban formando las nociones del esfuerzo. Las poderosas concepciones que siguieron nos ayudan en la actualidad. En 1822 Cauchy formalizó la noción del esfuerzo y colocó la base de lo que hoy en día se llama la *teoría de elasticidad*. Otros han utilizado este concepto del esfuerzo para simplificar la descripción del esfuerzo en un punto. Se necesitan nueve enunciados cuantitativos respecto al esfuerzo para describir de manera única el esfuerzo en un punto para un cuerpo elástico homogéneo isotrópico.

El profesor Gaetano Lanza del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) usó en 1885 en *Applied Mechanics* el "método de secciones" en armaduras, pero el "diagrama de cuerpo libre", como ahora se conoce, fue postulado por el profesor Irving Church de la Universidad Cornell en 1887, en su obra *Mechanics o Engineering*. En una etapa tardía del desarrollo de la mecánica, de manera rigurosa, el profesor Church hizo posible que los ingenieros se enseñaran a sí mismos lo que necesitaban saber. "Dibuje el diagrama de cuerpo libre" es una advertencia, y es la clave para que uno se convierta en un ingeniero.

Un *principio de superposición* resulta apropiado ya que los esfuerzos (en un punto sobre un plano dado) debidos a cargas externas diferentes se calculan por separado y luego se suman algebraicamente, a condición de que los esfuerzos no sobrepasen el límite de proporcionalidad del material, y en ausencia de alabeo. Si acaso existe un patrón para analizar problemas que impliquen esfuerzos, éste se parece a lo siguiente:

- Identificar las cargas externas y verificar las ecuaciones de equilibrio y los diagramas de cuerpo libre, para asegurar que se han considerado todas las cargas y sus sentidos.



- Utilizar más diagramas de cuerpo libre para encontrar las cargas internas.
- Determinar los esfuerzos correspondientes.
- Utilizar los círculos de Mohr para identificar los tres esfuerzos principales, los tres esfuerzos cortantes máximos y los esfuerzos sobre los planos de interés.
- Comparar las clases de esfuerzos que podrían causar la falla con las resistencias correspondientes a fin de evaluar la posibilidad de falla.

La habilidad para cuantificar la condición del esfuerzo en un punto crítico para un elemento de máquina es una habilidad importante del ingeniero. ¿Por qué? Si el elemento falla o no falla, se evalúa comparando el esfuerzo (causante del daño) en un punto crítico, con la resistencia del material correspondiente en este punto.

Los esfuerzos se calculan con gran precisión cuando la geometría es lo suficientemente simple para que la teoría proporcione las relaciones cuantitativas necesarias. En otros casos, se utilizan aproximaciones. Hay aproximaciones numéricas, como el análisis del elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés) cuyos resultados tienden a converger en los valores reales. Hay mediciones experimentales (por ejemplo, la medición de la deformación) que permiten la *inferencia* de los esfuerzos a partir de las condiciones medidas de la deformación. Cualquiera que sea el método o métodos, la meta es una descripción robusta de la condición del esfuerzo en un punto crítico.

La naturaleza de los resultados de la investigación y el entendimiento en cualquier campo indican que entre más se trabaje en él, más relacionadas parecen estar las cosas; así que se buscan nuevas metodologías para ayudar a evitar las complicaciones. A medida que se introdujeron nuevos esquemas, los ingenieros, ávidos por el mejoramiento que *promete* la nueva metodología, comienzan a emplearla. A menudo, el optimismo disminuye, a medida que la experiencia va



añadiendo preocupaciones. Las tareas que prometieron expandir las capacidades del inexperto, a la larga demuestran que la experiencia no es opcional.

En el análisis del esfuerzo, la computadora quizás sea útil si las ecuaciones necesarias están disponibles. El análisis en hojas de cálculo tal vez reduzca mucho cálculos complejos para los estudios paramétricos, al responder con facilidad preguntas del tipo "qué sucedería si..." mediante la relación de compromisos (por ejemplo, menos cantidad de un material costoso o más de un material barato). Incluso se obtendría una idea de las oportunidades de optimización.

Cuando no se dispone de las ecuaciones necesarias, entonces los métodos del análisis del elemento finito son atractivos, pero se deben tomar precauciones. Aun cuando se tenga acceso a un código poderoso del análisis del elemento finito, se debe ser casi un experto, mientras uno aprende. Hay preguntas difíciles de convergencia en las discontinuidades. El análisis elástico es mucho más fácil que el análisis elástico-plástico. Los resultados no son mejores que el modelo de la realidad que se utilizó para formular el problema.

2.15 Deflexión

Se dice que un cuerpo es rígido si no presenta cambio de tamaño o de forma bajo influencias de fuerzas o pares de torsión. Todos los cuerpos reales se deforman bajo la aplicación de una carga, elástica o plásticamente. La clasificación de un cuerpo real como rígido es una idealización. Un cuerpo puede ser lo suficientemente insensible a la deformación de modo que la suposición de rigidez no afecta en grado suficiente a un análisis para asegurar un tratamiento no rígido. En vez de un tratamiento basado en una *suposición* de rigidez, la *decisión* de ignorar la deformación representa una desviación tan pequeña de la realidad que un tratamiento rígido sigue siendo robusto. Si más adelante se comprueba



que la deformación del cuerpo no era despreciable, entonces la declaración de rigidez fue una decisión errónea, no una suposición equivocada. Estrictamente, por *flexibilidad* se entiende la habilidad de un cuerpo para distorsionarse al flexionarse -no es más que una forma de distorsión- pero el término a menudo significa en forma indistinta distorsión. Si se define la elección como bilateral -rígido o flexible- deja sin responder otras posibilidades. Un cable metálico es flexible, pero en tensión puede ser robustamente rígido y se distorsiona mucho si se somete a cargas de compresión. El mismo cuerpo puede ser rígido o no rígido.

El análisis de la deflexión influye en las situaciones de diseño en muchas formas. Un anillo de sujeción o anillo de retención, debe ser suficientemente flexible para que se curve sin deformación permanente y se ensamble con otras partes; y además tiene que ser suficientemente rígido para contener las partes ensambladas. En una transmisión, los engranes han de estar soportados por un eje rígido. Si el eje se flexiona demasiado, es decir, si es demasiado flexible, los dientes no se acoplarán en forma adecuada, y el resultado será un impacto excesivo, ruido, desgaste y por último se presentará una falla prematura. Al laminar placas o tiras de acero con los espesores prescritos, los rodillos se deben coronar, es decir, curvar, de manera que el producto terminado tenga espesor uniforme. Así, para diseñar los rodillos es necesario saber con exactitud cuánto se curvarán cuando una lámina de acero pasa entre ellos. Algunas veces, los elementos mecánicos se deben diseñar para que tengan una característica particular de la relación fuerza-deflexión. Por ejemplo, el sistema de suspensión de un automóvil, se debe diseñar dentro de un intervalo estrecho para lograr una frecuencia de rebote óptima en todas las condiciones de carga del vehículo, pues el cuerpo humano sólo se siente cómodo dentro de un intervalo limitado de frecuencias.

El tamaño del componente de soporte de carga a menudo se determina de acuerdo con las deflexiones, en vez de calcularse con los límites de esfuerzo.



Por la naturaleza en la construcción de los transformadores de potencia, se necesitará de estar constantemente recuperando esta serie de conceptos teóricos, por lo que se han desarrollado de una manera que pueda ser fácilmente recordado, en los próximos capítulos se abordará los elementos de calculo y criterio que se aplica a un transformador, principalmente al aspecto del diseño del tanque.

CAPITULO 3

DISEÑO DEL TANQUE

El diseño de un transformador consta de varias etapas que involucran amplias áreas de la ingeniería, como lo puede ser el diseño eléctrico, el diseño mecánico y el control, cada una de estas etapas (sistemas) a su vez tienen diferentes subsistemas, como son el ensamble interno, aislamientos, tanques y ensamble externo.

3.1 Desarrollo del transformador.

Desde que un transformador es solicitado, se tienen que tomar en cuenta diversos aspectos, capacidad, dimensiones, restricciones, etc. El diseñador mecánico cubre una importante parte de este, ya que tiene que estar enterado de todo el desarrollo del transformador, desde la recepción del pedido, la programación de la orden, etc., hasta el embarque y en ocasiones se tiene que trasladar a su disposición final (instalación).

En la figura 3.1 se puede apreciar un diagrama de flujo, donde se muestra la forma en que se desarrolla el proceso de diseño de un transformador desde su pedido hasta que el diseño se envía a un centro de información, para su análisis y posterior manufactura. Se pueden observar ciertos elementos que en ocasiones no se toman en cuenta, como son las aclaraciones o dudas que se puedan llegar a tener y que tienen que ser consultadas con otras áreas y hasta con el mismo cliente antes de que se pueda continuar con las siguientes etapas del diseño, esto permite tener una mayor certeza de que lo que se está solicitando, corresponde efectivamente a lo que el cliente espera.

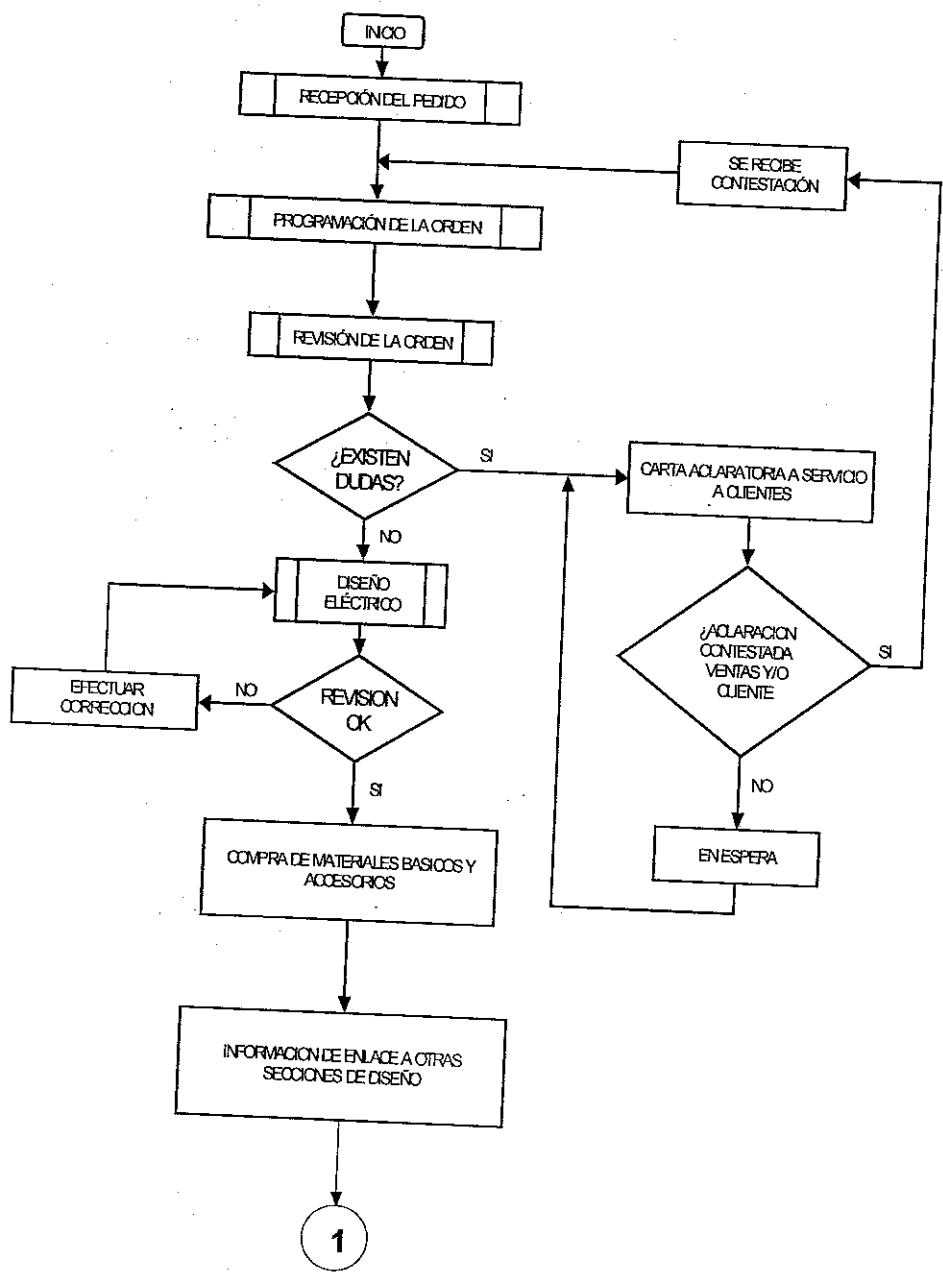


Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de diseño de un transformador de potencia en cada una de sus etapas.

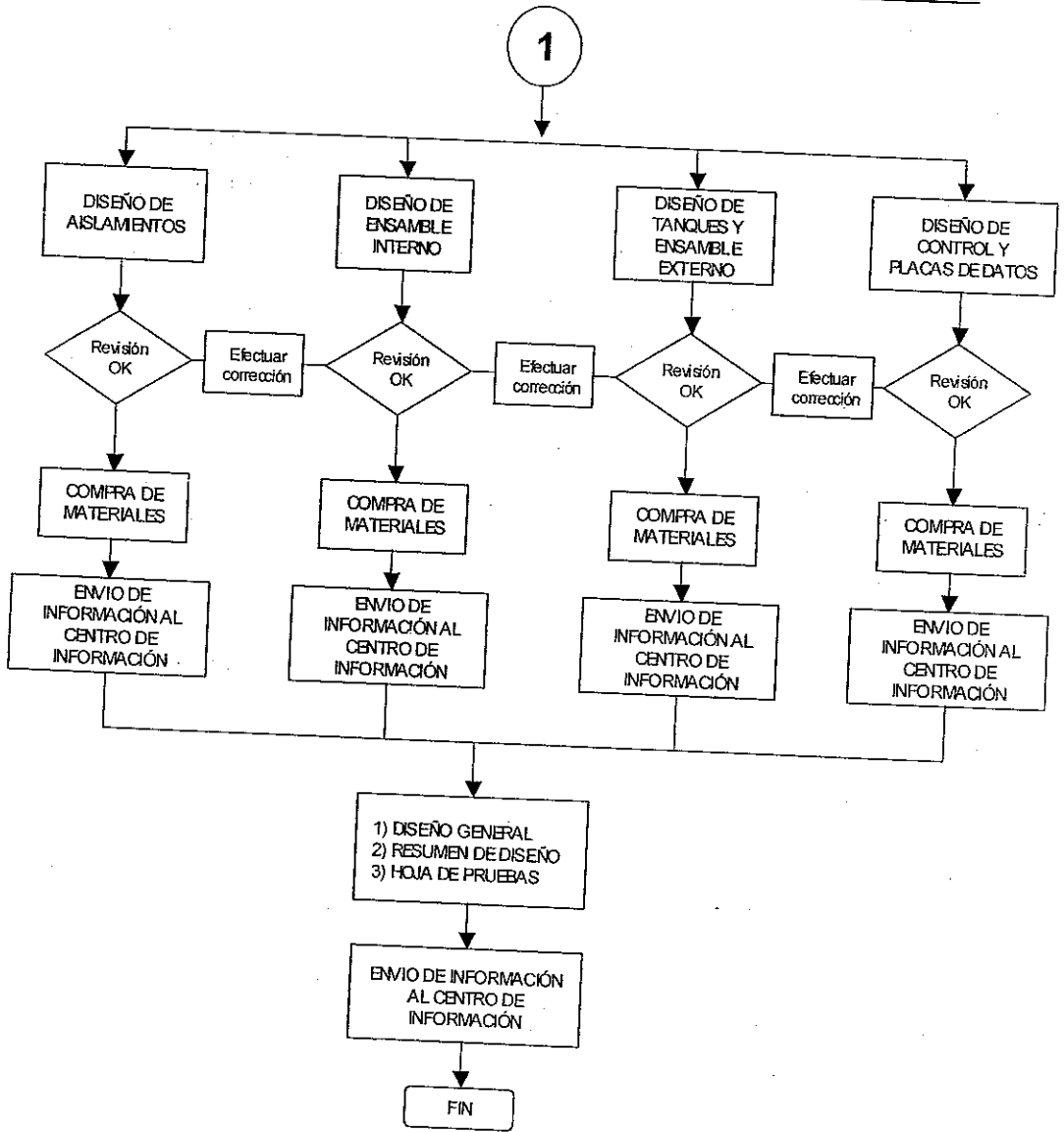


Figura 3.1 (Continuación) Diagrama de flujo del proceso de diseño de un transformador de potencia en cada una de sus etapas.



Este procedimiento cumple con la norma ISO 9001:2000, que establece la política a seguir para la revisión y aprobación de diseño e información generada por los departamentos de ingeniería, así como para coordinar y establecer las guías para el envío de los diseños a las restantes áreas (manufactura, centros de información, embarques etc.)

Cada una de las etapas del procedimiento cubre toda la información generada en ingeniería de Diseño, tanto para fabricación como desarrollo de transformadores, afectando a ingeniería de diseño de Mediana Potencia, Potencia y E.A.T (Extra Alta Tensión). Así como también a la información de manufactura y al centro de concentración de información.

3.2 Actividades del diseñador mecánico.

Después de haber superado el diseño del transformador las etapas de recepción, programación, revisión y principalmente del diseño eléctrico, la información obtenida puede ser suministrada a las restantes áreas de diseño como son la del diseño mecánico.

Como parte de las responsabilidades del ingeniero de diseño del área mecánica, está el manejo total de su diseño y el darle un total seguimiento a través de las líneas de construcción y ensamble hasta que el equipo sea embarcado, así como aclarar con el cliente y proveedores todas las dudas del mismo. Además deberá de proporcionar toda la información requerida que incluya los datos necesarios para realizar los dibujos de dimensiones generales.

Realizar la requisiciones de compras especiales que nos se tengan en existencia, por lo que es importante una buena comunicación con el área de almacén y control de calidad para así garantizar que el diseño llegue a su conclusión como estaba planeado. Además se deberá tener la habilidad para



hacer la requisición de material de reserva, si el diseño lo permite y los futuros diseños emplearan este tipo de materiales.

3.2.1 Recepción de especificaciones de diseño.

El jefe de ingeniería deberá de entregar al área mecánica, las especificaciones del transformador para diseñar, así como los accesorios, características y requerimientos especiales por parte del cliente. Previamente la sección de ensamble interno definirá detalladamente las dimensiones del tanque principal y la localización de boquillas de alta tensión, terciario y las de baja tensión, así como cambiadores de derivaciones. Además el ingeniero de diseño eléctrico entregará los resultados finales del calculo de enfriamiento, indicando la distribución de bancos de radiadores y ventiladores.

3.2.2 Análisis de las especificaciones de diseño.

El ingeniero mecánico responsable del diseño deberá de leer y analizar detalladamente tanto las especificaciones de diseño formuladas por el área eléctrica como las especificaciones particulares del cliente, para así verificar que no existan faltantes o dudas con respecto al pedido del transformador, se deberá entonces estudiar, los resultados del cálculo de enfriamiento, las dimensiones del tanque y la localización de las boquillas, para hacer las aclaraciones correspondientes en caso de existir alguna desviación o duda. De existir alguna inconsistencia en dichas especificaciones del diseño se deberán de reportar al jefe inmediato superior para que se puedan llevar a las áreas de ensamble interno o de diseño eléctrico. Es importante mencionar que las inconsistencias que se llegan a presentar en muchas ocasiones son de apreciación ya que dependiendo de el área en que se desarrolle la apreciación de los elementos puede variar, sin embargo no está de más en solucionar dichas diferencias.



3.3 El diseño mecánico del transformador

Cuando se han agotado todas las revisiones, estudios y aclaraciones de las especificaciones de diseño se procede con el diseño mecánico. Existen variaciones en el diseño mecánico de los transformadores dependiendo de su clasificación.

3.3.1 Diseño mecánico de un transformador tipo acorazado.

1.- El ingeniero de diseño mecánico procederá a formular una hoja de dimensiones del tanque, para lo que deberá efectuar las operaciones siguientes:

- a) Selección de espesor de paredes del tanque superior.
- b) Determinar dimensiones, espesor de paredes y bridas del tanque inferior: para Schnabel¹⁶ (en caso de requerirse); por condiciones de soporte en operación Y para diseño de 7 piernas.
- c) Cálculo de espesor del fondo.
- d) Cálculo de los refuerzos entre fases.
- e) Determinar las dimensiones y espesores de los marcos inferiores y Side Members, para Schnabel; para diseño 7 piernas, para 7 piernas con Schnabel.
- f) Selección de espesor de cubierta.
- g) La sección de ensamble interno proporcionará la distancia de Top Washer¹⁷ a cubierta y las dimensiones de compartimentos, proyecciones o cámaras adicionales del tanque, mediante dibujos.

¹⁶ Schnabel es un vehículo para ferrocarril diseñado para transportar grandes cargas, dichos vehículos se separan en dos, para que la carga forme parte del propio vehículo, existen diferentes tipos de vehículos tipo Schnabel, su diferencia radica en el número de ejes o grados de libertad que manejan, que van de 6 a 36 ejes, además cuentan con una serie de condicionantes para su manipulación como es la velocidad, que en la mayoría de los casos no debe de exceder de las 40 MPH (64.36 km/h). Son utilizados en transportar diversas cargas, existen carros Schnabel dedicados especialmente a transportar transformadores de alta potencia. (ver figura 3.2)

¹⁷ Top Washer es la distancia de la parte superior del devanado hasta la cubierta del transformador.



- h) Determinar según las condiciones de embarque, la altura de seccionamiento del tanque, o si se embarcara acostado y sobre que lado.
- i) Dibujar y acotar la altura de acoplamiento a algún ducto de conexión y ajustar la altura del aparato si se requiere.

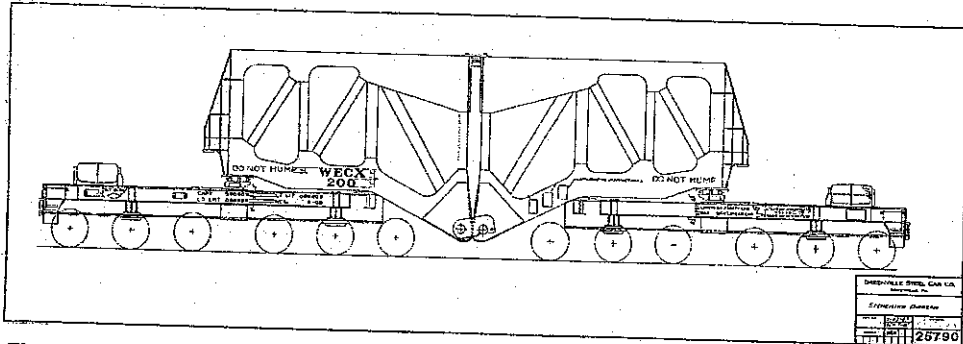


Figura 3.2 Diagrama de un carro de ferrocarril tipo Schnabel, nótese que el centro del carro se divide en dos para que el transformador sea parte de la estructura principal.¹⁸

2.- El Ingeniero de Diseño mecánico procederá a dibujar el layout (diseño maestro) del transformador en mínimo 3 vistas ortogonales: 1 planta y 2 elevaciones. Efectuando las siguientes operaciones:

- a) Dibujar el croquis del tanque con las dimensiones determinadas en el punto 2.3.1.
- b) Reforzar las paredes del tanque inferior por corto circuito, para 7 piernas.
- c) Reforzar las paredes del tanque inferior por presión, condiciones de soporte de operación y condiciones de embarque y transporte.
- d) Colocar los ductos del sistema de enfriamiento o colectores, según requiera el diseño, calculando las entradas de aceite al tanque y su disposición.

¹⁸ Diagrama cortesía de Greenville Steel Car Co.



- e) Colocar refuerzos especiales para embarque, según se requiera.
- f) Colocar accesorios ordenados en la especificación de diseño, según las instrucciones de aplicación.

3.- Dar forma al tanque superior, según las guías de diseño, colocando cámaras si se requieren.

4.- Reforzar las paredes del tanque superior o medio.

5.- Colocar accesorios ordenados en la especificación de diseño.

6.- Colocar las boquillas Alta Tensión, Baja Tensión y Terciaria Tensión, respetando las localizaciones de las partes vivas interiores de las boquillas proporcionadas por el ingeniero de ensamble interno, separando las partes vivas externas de las boquillas a la distancia dieléctrica requerida en aire entre partes vivas y de parte viva a tierra, de acuerdo al lugar, altitud de operación, tipos de pruebas y normas especificadas por el cliente, diseñar sus asientos.

7.- Diseñar la cubierta.

8.- Colocar registros hombre y accesorios ordenados en la especificación de diseño.

9.- Colocar el equipo de enfriamiento especificado, según las guías de diseño: para radiadores, para bombas; para enfriadores FOA; para enfriadores FOW y para 3 capacidades de enfriamiento.

10.- Cuando se especifiquen condiciones sísmicas seguir las instrucciones dadas en manual de diseño dedicado a este aspecto.



11.- Cálculo del sistema conservador de aceite para tanque COPS¹⁹, para espacio de gas y para tanque expansión. Cuando se especifiquen condiciones sísmicas seguir las instrucciones dadas en manual de diseño dedicado a este aspecto.

12.- Cálculo de pesos para operación y embarque, así como centros de gravedad para completar dibujo de dimensiones generales.

3.3.2 Diseño mecánico de un transformador del tipo columnas.

La sección de ensamble interno proporcionara las dimensiones interiores del tanque, la localización del transformador dentro del tanque, la localización de las partes vivas interiores de las boquillas y las dimensiones de compartimentos, proyecciones o cámaras adicionales del tanque, mediante dibujos.

1.- El Ingeniero de Diseño Mecánico procederá a dibujar el plano del transformador en mínimo 3 vistas ortogonales: 1 planta y 2 elevaciones, efectuando las siguientes operaciones:

- a) Selección del espesor de paredes y cubierta del tanque.
- b) Dimensionar y calcular el fondo y base; y por estabilidad.
- c) Reforzar las paredes del tanque.

¹⁹ COPS (Sistema de Preservación de Aceite a Presión Constante), Es aquel en el cual el líquido aislante contenido en el tanque del transformador está sellado con respecto a la atmósfera a través de un tanque de expansión; la variación volumétrica del líquido en el tanque principal es absorbida por el tanque de expansión (COPS); conectado al tanque principal y parcialmente lleno de líquido aislante; el volumen del tanque de expansión debe ser tal que mantenga el nivel de aceite satisfactorio para el intervalo de variación de temperatura del transformador en operación.

El tanque de expansión puede estar aislado de la atmósfera, por medio de los siguientes dispositivos:

- a) Respiración a través de un desecador.
- b) Sellado con gas inerte.
- c) Aislado de la atmósfera mediante una bolsa de neopreno o un diafragma.



- d) Colocar ganchos de izaje, ganchos de sujeción y apoyos para gatos, por estabilidad y por condiciones de embarque.
- e) Colocar los accesorios ordenados en la especificación de diseño.
- f) Colocar los mecanismos de operación externos para cambiadores desenergizados, así como los registros necesarios para su ensamble y conexión.
- g) Colocar cámaras de terminales, si se requieren.

2.- Colocar las boquillas Alta Tensión, Baja Tensión y Terciaria Tensión respetando las localizaciones de las partes vivas interiores de las boquillas proporcionadas por el ingeniero de ensamble interno, y separando las partes vivas externas de las boquillas a la distancia dieléctrica requerida en aire, entre partes vivas y de parte viva a tierra, de acuerdo al lugar, altitud de operación, tipos de pruebas y normas especificadas por el cliente. Diseñar sus asientos.

3.- Diseñar la cubierta.

4.- Colocar registros de hombre y accesorios ordenados en la especificación de diseño, según instrucciones de aplicación.

5.- Colocar el equipo de enfriamiento especificado, según las reglas de diseño para FOA / FA; para FOA; para RADIADORES; para bombas; para enfriadores FOA; para enfriadores FOW y para 3 capacidades de enfriamiento. Cuando se especifiquen condiciones sísmicas seguir las instrucciones dadas en manual de diseño.

6.- Cálculo sistema conservador de aceite para tanque COPS, para espacio gas, para tanque de expansión. Cuando se especifiquen condiciones sísmicas seguir las instrucciones dadas en manual de diseño.



7.- Cálculo de pesos para operación y embarque, así como centros de gravedad para completar dibujos de dimensiones generales.

8.- Cuando al cumplir con los requisitos propios de un diseño, las condiciones de realización del mismo se salgan de lo previsto en los manuales de diseño, esto es, condiciones especiales, se deberá:

- a) Consultar al ingeniero mecánico de desarrollo, como se indica en el manual de diseño.
- b) Emplear directamente las teorías de resistencia de materiales, elasticidad y estructuras, en su caso, para encontrar la mejor solución al problema de diseño.
- c) Emplear códigos de diseño, ampliamente validados y aceptados, que comprendan casos análogos al problema de diseño que se debe solucionar, tales como AISC, EL USN, Y EL ASME, etc.
- d) Emplear análisis por MEF (Método de Elementos Finitos), ejecutado por un analista capacitado y experimentado, como herramienta de diseño y optimización.

9.- Durante el diseño se deberá mantener una comunicación continua con el ingeniero responsable de ensamble interno, con el objeto de que los problemas que se presenten e involucren al ensamble interno y al tanque sean resueltos siempre de acuerdo entre ambas secciones.

10.- Comparar el plano de tanque con el ensamble interno durante la definición geométrica detallada del tanque y cada vez que se efectúe una redefinición o modificación en la superficie interna del tanque. En el caso de que existieran discrepancias o dudas como consecuencia de esa operación, realizar una junta con el supervisor de diseño mecánico, con el ingeniero de diseño y supervisor de



ensamble interno y con el ingeniero de diseño eléctrico responsable, para resolver el problema y acordar una solución.

11.- Efectuar los cálculos y los cambios necesarios en el plano.

12.- Terminado el trazo de planos el Ingeniero responsable inicia a formular la información de diseño utilizando los dibujos estandarizados y formas para las hojas de especificaciones adecuadas para cada parte a desglosar. En caso de no encontrarse dibujos estándar para alguna de las partes se procederá a realizar un dibujo especial para el caso. Para asignar número a cada dibujo o especificación se aplicará la nomenclatura apropiada.

La información de diseño realizada por el Ingeniero de Diseño deberá contener todos los datos necesarios y lo más claro posible para la construcción del tanque y partes del mismo. Deberá proporcionar todos los datos necesarios para el dibujo de dimensiones generales del transformador, como son:

- Dimensiones generales del transformador.
- Pesos y centros de gravedad.
- Detalles de dibujo requeridos por el cliente.
- Partes a identificar.

13.- Es responsabilidad del Ingeniero de Diseño Mecánico el comprar todos los accesorios y materiales, que haya usado para su transformador y que no estén contemplados en las listas de materiales de reserva. Una vez revisada y aprobada la información, el Ingeniero de Diseño deberá enviarlas al centro de información para su reproducción y distribución de copias. Además deberá enviar notificación a la Gerencia de Administrativo y Precios, que los dibujos de dimensiones generales y detalles, se encuentran en el Centro de Información.



3.4 Selección del espesor de las paredes y la cubierta del tanque.

Para la selección de los espesores de las paredes y la cubierta se necesitará considerar si hay alguna limitante o característica especial que se haya estipulado en la recepción del pedido, si esta es la condición se necesitará adecuarse a dicha limitación, sin embargo este es el menor de los casos, la mayoría de los clientes dejan a los ingenieros diseñadores que utilicen los materiales más usuales, esto permite que la experiencia salga a sobresalir y se proceda con un diseño habitual, para los transformadores de potencia el material frecuentemente utilizado es el acero estructural al carbono A36, que es un "acero de propósitos generales con calidad estructural para su uso en diversas aplicaciones: puentes, edificios etc., se puede remachar, atornillar o soldar"²⁰.

Producto	Forma ^A	Placas ^B					Barras			
		hasta ¾ (20)	Desde ¾ ¾ hasta 1 ½ (20 a 40)	Desde 1 ½ hasta 2 ½ (40 a 65)	Desde 2 ¾ hasta 4 (65 a 100)	Desde 4 ¾ hasta 8 (100)	hasta ¾ (20)	Desde ¾ ¾ hasta 1 ½ (20 a 40)	Desde 1 ½ hasta 4 (100)	Mayor a 4 (100)
Carbono, % máx.	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29	0.26	0.27	0.28	0.29
Manganeso, %	.....	.....	0.80-1.20	0.80-1.20	0.85-1.20	0.85-1.20	.....	0.60-0.90	0.60-0.90	0.60-0.90
Fósforo, % máx	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Azufre, % máx	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicio, % máx	0.40	0.40	0.40	0.15-0.40	0.15-0.40	0.15-0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Cobre, %min cuando se especifica.	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

^A Un contenido de Manganeso 0.85 – 1.35 % y Silicio 0.15 – 0.40 % es necesario para formas con aristas y espesores superiores a 3 pulg. (75 mm).

^B Para cada 0.01 punto de reducción en la especificación máxima de carbono se permitirá un incremento del 0.06 por ciento de manganeso, del máximo especificado hasta un máximo e 1.35 %.

Tabla 3.1 Composición química del acero A36 bajo norma de la ASTM. Nota: Donde aparece "...." en esta tabla indica que es un componente no requerido.

²⁰ Según clasificación de ASTM (American Society of Testing and Materials) bajo la designación A 36/A 36M - 04



Las propiedades del acero A36 se pueden ver en la tabla 3.1 y 3.2. Este tipo de acero es comercial, implica que se consigue con facilidad por lo que su precio no resulta tan elevado como un acero de propiedades especiales que aumentaría su costo, el espesor de la placa que se utilizará también es un espesor de común denominación que se puede encontrar fácilmente en el mercado.

Propiedades mecánicas del acero A36 (ASTM)

Placas, formas y barras:

Resistencia a la tracción, ksi (MPa) 58 – 80 (400 – 550)

Límite de fluencia, ksi (MPa) 36 (250)

Placas y barras:

Elongación en 8 pulg. (200 mm), min. % 20

Elongación en 2 pulg. (50 mm), min. % 23

Formas:

Elongación en 8 pulg. (200 mm), min. % 20

Elongación en 2 pulg. (50 mm), min. % 21

Tabla 3.2 Propiedades mecánicas del acero A36 Nota: para obtener la referencia de la orientación del material en las pruebas de tensión referirse a la especificación A 6/A 6M de la ASTM.

Fuente: El origen de las tablas 2.1 y 2.2 forman parte de "Standard Specification for Carbon Structural Steel" de ASTM bajo la designación: A 36/A 36M – 04.

Para un diseño general de un transformador se utilizará un criterio fundamental, el peso total del transformador este permite determinar el espesor mínimo recomendado que se puede determinar mediante criterios ya preestablecidos con el tiempo como lo ilustra la tabla 3.3.



Peso total del transformador	Espesor mínimo (pulg/mm)	Medida comercial de la placa	Calibre
Menor a 150,000 lbs (68,100 Kg)	0.313 / 7.96	5/16	0
Mayor a 150,000 lbs (68,100 Kg)	0.375 / 9.53	3/8	3/0

Tabla 3.3 Espesores de placa empleados en la construcción de tanques de transformador en función del peso

La mayoría de los transformadores de potencia y de Extra Alta Tensión superan con facilidad las 70 Ton. de peso por lo que generalmente se utiliza la placa de 3/8 de espesor, sin embargo se pueden realizar cálculos más precisos y seguros utilizando las siguientes fórmulas:

$$S = \frac{0.30PA^2B^2}{T^2(A^2 + B^2)} \quad (\text{Para las paredes del tanque}) \quad (3.1)$$

$$S = \frac{0.36PA^2B^2}{T^2(A^2 + B^2)} \quad (\text{Para las cubiertas}) \quad (3.2)$$

Donde:

S: Esfuerzo = 36,000 psi. Máximas²¹

P: Presión o vacío = 15 psi

T: Espesor de la placa (pulg.)

A: Ancho de la placa sin refuerzos (pulg.)

B: Largo de la placa sin refuerzos (pulg.)

²¹ Debido al tipo de material acero estructural A36, Límite de fluencia de 36 ksi de la tabla 3.2



El hecho de que se considere una presión de vacío de 15 psi. Depende fundamentalmente de la presión hidrostática ejercida por el aceite aislante en el entorno del tanque y a la presión de vacío que se somete el transformador al momento de la extracción de humedad que se realiza cuando se a llenado del propio aceite, para después sellar y realizar las correspondientes pruebas eléctricas. La presión ejercida en el fondo y las paredes del transformador debido al aceite se pueden calcular por separado tomando en consideración la diferencia de volumen entre el tanque y el que ocupa el ensamble interno del propio transformador considerando los valores típicos del aceite para transformador utilizado.

Valores típicos de aceite para transformador inhibido

Código de producto	21310
Color ASTM	L 0.5
Apariencia	Brillante
Gravedad específica a 15/15 °C	0.872
Punto de inflamación, °C	152
Punto de escurrimiento, °C	-40
Viscosidad cSt, 40 °C	9.2
Viscosidad cSt, 100 °C	2.4
Punto de anilina, °C	68
Número de neutralización, mg KOH/g	0.02
Inhibidor de oxidación, % peso	0.2
Tensión interfacial, Dinas/cm	48
Tensión de ruptura, KV	60
Factor de potencia, % a 100 °C	0.5
Factor de potencia, % a 25 °C	0.05
Ensayo de oxidación	
Barros a 72 hs., %	0.01
Número de neutralización, mg KOH/g	0.055
Barros a 164 hs., %	0.020
Número de neutralización, mg KOH/gr	0.084
Bomba rotativa, mínimo	280

Tabla 3.4 Valores típicos de un aceite de clase ASTM D-3457 tipo II.²²

Fuente: Texaco Oil Co. para su producto "TRANSFORMER OIL INHIBITED".

²² Clasificación específica para aceites aislantes conteniendo inhibidores de oxidación, para otorgar una mayor vida al aceite y así prolongar la vida útil del transformador, este tipo de aceite se destaca por ser un aceite del tipo naftenico.



Específicamente, las dos funciones principales del aceite para transformador son:

- Mantener eléctricamente aislados los dispositivos eléctricos del transformador.
- Absorber el calor generado durante la operación del componente eléctrico.

A pesar de sus buenas propiedades físicas y eléctricas, los aceites dieléctricos experimentan un proceso de envejecimiento vinculado con la oxidación de los mismos, formando compuestos ácidos los cuales llegan a formar barros que dificultan una buena disipación del calor y una adecuada capacidad aislante.

Las fórmulas 3.1 y 3.2 son muy útiles para determinar el espesor de la placa requerida en el diseño de un transformador ya que se puede despejar T . Sin embargo existen otros métodos como el que se muestra en la figura 3.3, en esta se observan los espesores que se deberán considerar en función de el ancho y el largo de la placa libre (sin refuerzos), esto es, localizando la intersección con la curva de acuerdo con las dimensiones de la placa.

Cabe mencionar que las curvas sólidas corresponden a las paredes y las punteadas se deberán considerar para la selección de las cubiertas, un menor espesor en las cubiertas se debe a que estas no soportan grandes esfuerzos como si lo hacen las paredes y el fondo del tanque.

Otra manera de aplicar las fórmulas es de forma directa, lo que nos permite determinar el esfuerzo máximo al que será sometida la parte de pared o cubierta del tanque del transformador. En el caso (que la mayoría de veces así sucede) de que este esfuerzo máximo sobrepase la el límite de fluencia de las 36 ksi



(250Mpa) para este tipo de acero, este dato nos será de bastante ayuda, ya que permitirá conocer las zonas donde el transformador tenga que ser reforzado.

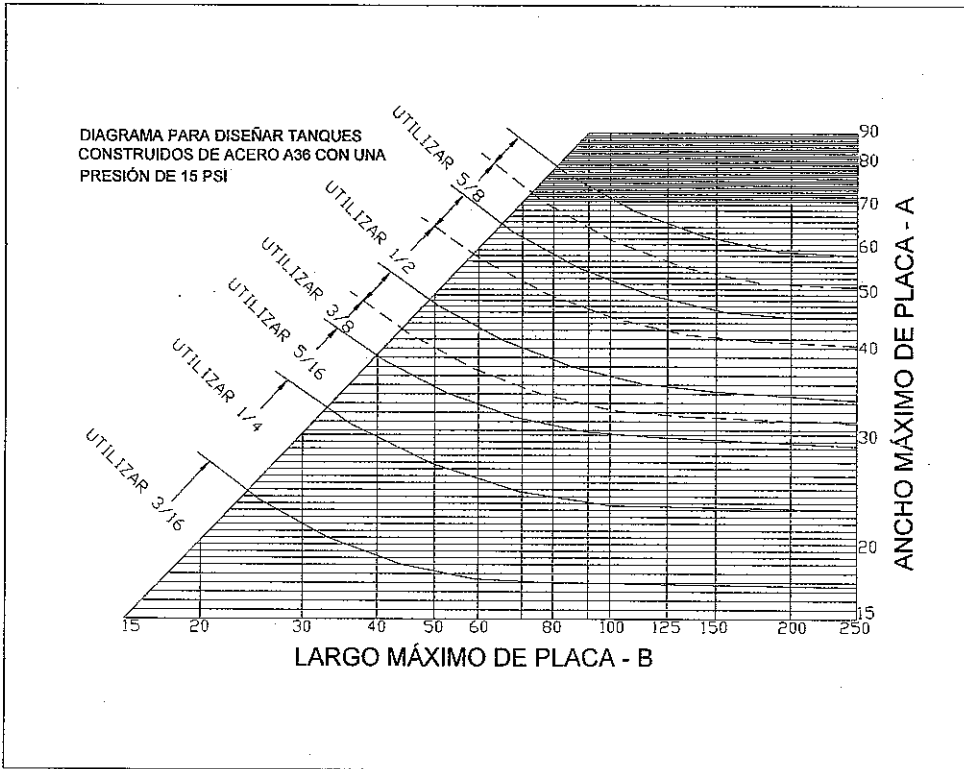


Figura 3.3 Grafica para determinar el espesor de la placa de acero A36 a utilizarse en el diseño de un tanque a una presión de vacío de 15 psi.(103.35 kPa).

Cuando la distancia desde la cubierta del tanque al centro de uno de los costados excede las 150 pulgadas, el ancho máximo "A" de la figura 3.3 puede ser reducida de la siguiente manera:

Altura máxima segura:
$$\frac{\text{Ancho del panel "A"}}{\sqrt{Q}} \quad (3.3)$$



Donde:

$$Q = \frac{W + 10}{15} \quad (3.4)$$

$$W = \frac{\text{Distancia desde la cubierta al fondo del tanque}}{30} \quad (3.5)$$

Para la selección del espesor de la cubierta se recomienda que ésta tenga un espesor de 0.5 pulg. Debido a la colocación de los accesorios, boquillas de A.T., B.T. y T.T., además del tanque COPS, etc. Aunque se pueden aplicar las fórmulas y gráficas antes mencionadas.

3.5 Calculo del espesor del fondo.

El calculo del fondo del tanque requiere de un análisis importante y cuidadoso ya que esta sección será sometida a esfuerzos considerables. Se utilizará el mismo acero A36 aunque se determinarán los espesores de manera similar se deberán tener algunas consideraciones especiales. En este sentido se deberá utilizar la figura 3.4 donde se podrá determinar el espesor del fondo en función de las dimensiones del mismo tomando como base una presión de vacío de 15 psi. De manera analítica se utiliza el siguiente procedimiento para calcular el espesor de la placa del fondo bajo las siguientes consideraciones:

- Las medidas del ancho y del largo del fondo del tanque deberán ser interiores.
- El tamaño de la placa del fondo esta basada en:

$$S = \frac{0.30PA^2B^2}{T^2(A^2 + B^2)} \quad (3.6)$$

- a) P = PSI de prueba + 5 PSI del volumen de aceite
- b) S = 36,000 PSI



- Reforzar la base con al menos 15 veces el espesor de la placa del fondo
- Dejar una saliente de entre 1.5 a 2 pulg. como se muestra en la figura 3.5
- Si el espesor del fondo sobrepasa las 15/16 de pulgada de espesor, utilizar como refuerzos las vigas " I " .

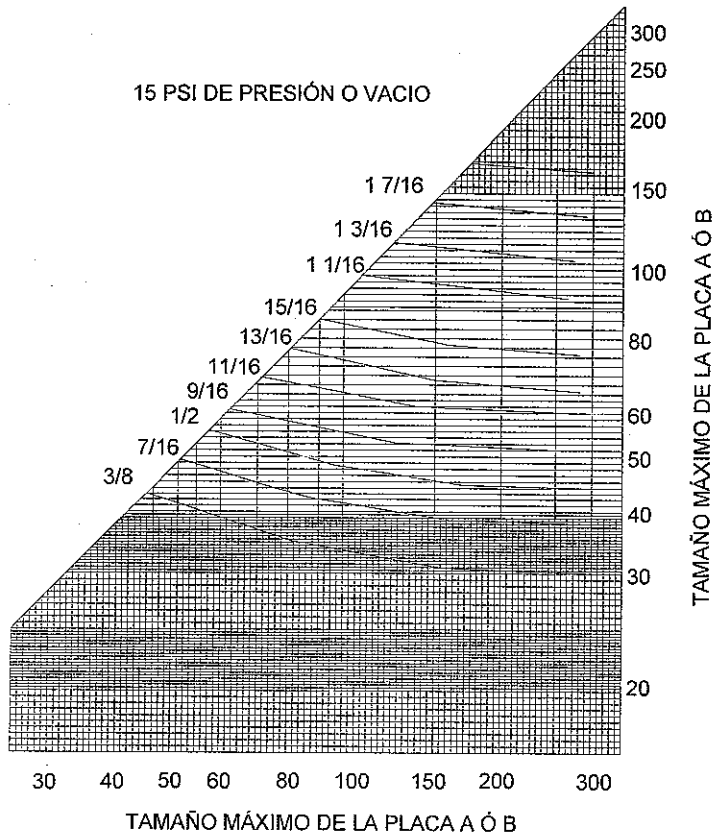


Figura 3.4 Grafica para determinar el espesor de la placa de acero A36 a utilizarse en el diseño de un tanque a una presión de vacío de 15 psi.(103.35 kPa).



En el desarrollo de la fórmula 3.6 cabe mencionar que el valor de P está dimensionado en dos partes, la primera se determina en base a la presión que se somete el transformador en la etapa de pruebas y cuando se hace la extracción de humedad al momento de llenarse del aceite dieléctrico, la segunda corresponde a la presión hidrostática ejercida por la cantidad de aceite con la que será llenado el tanque, esta presión en promedio es de 5 PSI aunque en la mayoría de los casos es importante hacer el análisis correspondiente para verificar dicho valor. Esto se puede analizar aplicando la fórmula para la distribución de la presión en un líquido.

$$P_1 = P_0 + g\rho h \quad (3.7)$$

Puede resultar redundante pero la presión total también está definida bajo esta misma fórmula donde P_0 es la presión de prueba.

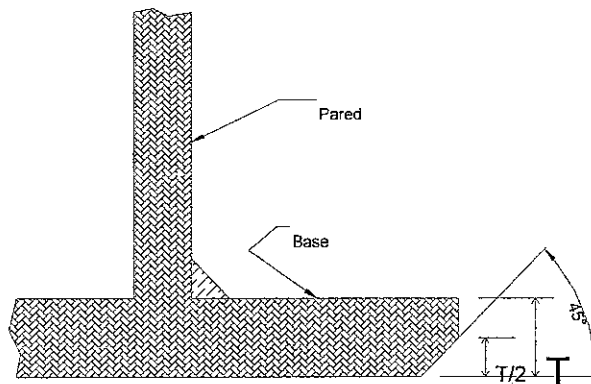


Figura 3.5 Extensión de la base y chaflán

Nota: La extensión de la base estará entre 1.5 y 2.0 pulgadas.



3.6 Reforzamiento del tanque y la base.

El reforzamiento de las paredes del tanque consiste en colocar vigas de diversas geometrías alrededor de aquellas secciones del tanque que después de un análisis a conciencia se determine que excede el esfuerzo máximo permitido de las 36,000 psi.

Nombre de modelo: Part1
Nombre de estudio: COSMOSXpressStudy
Tipo de trazado: Stático Esfuerzo nodal-Trazado1
Escala de deformación: 96.0322

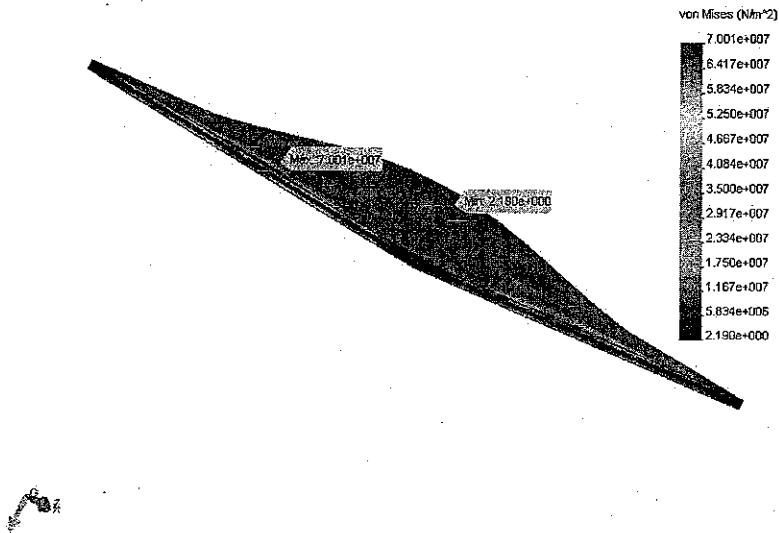


Figura 3.6 Sección de una pared de transformador sin reforzamiento sometida a un análisis de esfuerzos ²³.

²³ Los resultados del análisis de diseño están basados en un análisis estático lineal y se asume que el material es isotrópico. El análisis estático lineal presupone que:

- 1) El comportamiento del material es lineal, en consonancia con la ley de Hooke,
- 2) Los desplazamientos inducidos son lo suficientemente pequeños como para pasar por alto los cambios en la rigidez debidos a las cargas, y
- 3) Las cargas se aplican lentamente para pasar por alto los efectos dinámicos.



Aunque esto se debió de haber considerado al momento del cálculo del espesor de las paredes, pero la realidad nos muestra que no sería posible manufacturar paredes de 20 o más pulgadas de espesor, que serían los espesores que se calcularían sin tener que reforzar, esto con sus elevados costos de material. Se utilizarán refuerzos en forma de canales colocados de forma horizontal, con una terminación especial en las esquinas, estos refuerzos se colocarán a través de las paredes del tanque, principalmente en los paneles "W"; "X"; "Y"; y "Z". (ver figura 3.7).

Cuando se utilicen refuerzos con una profundidad mayor a 6 pulgadas las terminaciones en las esquinas se deberán de tapar para evitar acumulación de polvo y como consecuencia corrosión, sin embargo estéticamente conviene hacerlo ya que dará mayor presentación al producto. Al considerar en el diseño refuerzos con una profundidad considerable dejar aproximadamente 0.625 pulg. (5/8) de saliente para efectos de terminación por soldadura en las uniones de las esquinas al momento de colocar los refuerzos en el tanque.

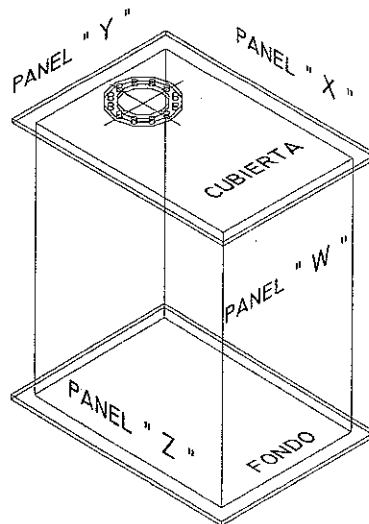


Figura 3.7 Distribución de los componentes del tanque de un transformador.



3.6.1 Selección del tamaño del refuerzo.

Cuando se realice la selección del tamaño ideal del refuerzo se requiere del cálculo de el módulo de sección del refuerzo mediante:

$$Z_R = C^2 K N L^2 \quad (3.8)$$

Donde:

N = Ancho del panel que soportará el refuerzo. Ver figura 3.8

L = Distancia entre refuerzos

K = Coeficiente dependiente de las condiciones de terminado. Ver figura 3.8

C = Coeficiente en función de la longitud del refuerzo, 1.0 para refuerzos mayores a 100 pulgadas. Con un incremento del 1% por cada 10 pulgadas adicionales a las 100 pulgadas anteriores.

Ejemplo: Si L = 180 pulgadas, entonces, C = 1.08

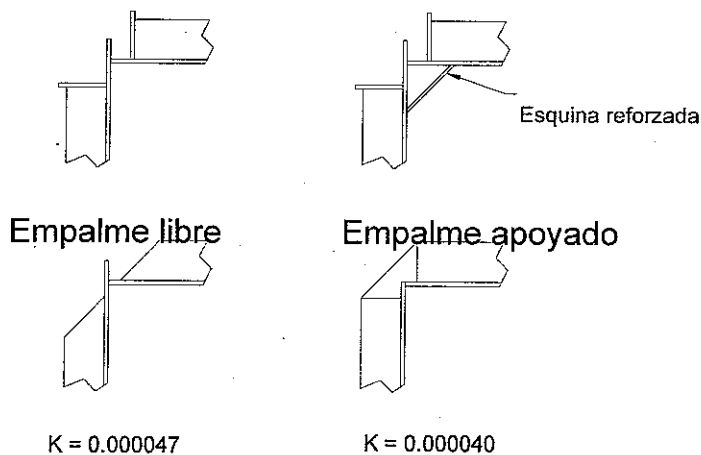


Figura 3.8 Valores del coeficiente K dependiendo de cómo son rematadas las esquinas del tanque.



Otra manera de poder determinar el módulo de sección del refuerzo es mediante la utilización de las tablas que se agregan en el apéndice, al final de este trabajo, sin embargo existen hoy en día métodos más rápidos e igual de precisos, por lo que se pueden llegar a elaborar programas de cómputo que facilitarían dicho cálculo, se recomiendan programas simples de manipular, tales como Visual Basic o simplemente los lenguajes de programación que tienen algunas calculadoras como las HP o Texas Instruments.

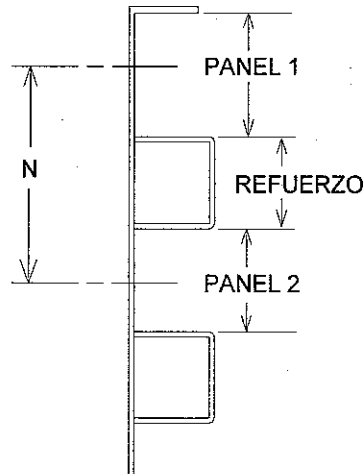


Figura 3.9 Distribución de las distancias en un panel reforzado.

Nota: $N = \text{Refuerzo} + \frac{\text{Panel 1}}{2} + \frac{\text{Panel 2}}{2}$ (3.9)

3.6.2 Cálculo de la deflexión en los refuerzos

La deflexión en los refuerzos se calcula mediante:

$$\text{Deflexión} = \frac{NL^4}{I} \times 6.5 \times 10^{-9} \quad (3.10)$$

Donde:



N = Ancho del panel que soportará el refuerzo. Ver figura 3.9

L = Distancia entre refuerzos

I = Momento de inercia del refuerzo (ver el apéndice)

El máximo valor de la deflexión permitida será de $\frac{L}{200}$ ó $\frac{5}{8}$ de pulgada.

Para refuerzos donde no sea posible determinar el momento de inercia de tablas, dicho valor puede ser calculado mediante:

$$I = Z \left(\frac{D+T}{2} \right) \tag{3.11}$$

- Donde:
- Z = Es el módulo de sección del refuerzo
 - D = profundidad del refuerzo
 - T = Espesor de la pared del tanque

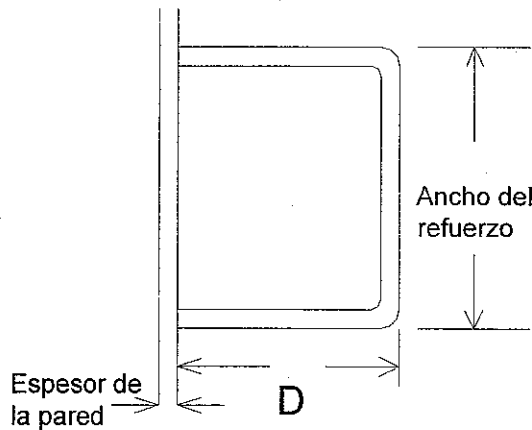


Figura 3.10 Sección de un refuerzo típico

El máximo posible que puede llegar a tener de ancho un refuerzo estará determinada mediante la siguiente relación:



- a) Para 1/4, 5/16, y 3/8 de espesor en el acero empleado en la construcción de un refuerzo, el máximo ancho del refuerzo = 42 x el espesor del acero.
- b) Para espesores mayores a 3/8 el ancho máximo = 48 x el espesor del acero.

Nombre de modelo: Part2
Nombre de estudio: COSMOSXpressStudy
Tipo de trazado : Static Esfuerzo nodal-Trazado1
Escala de deformación: 1.11425e+007

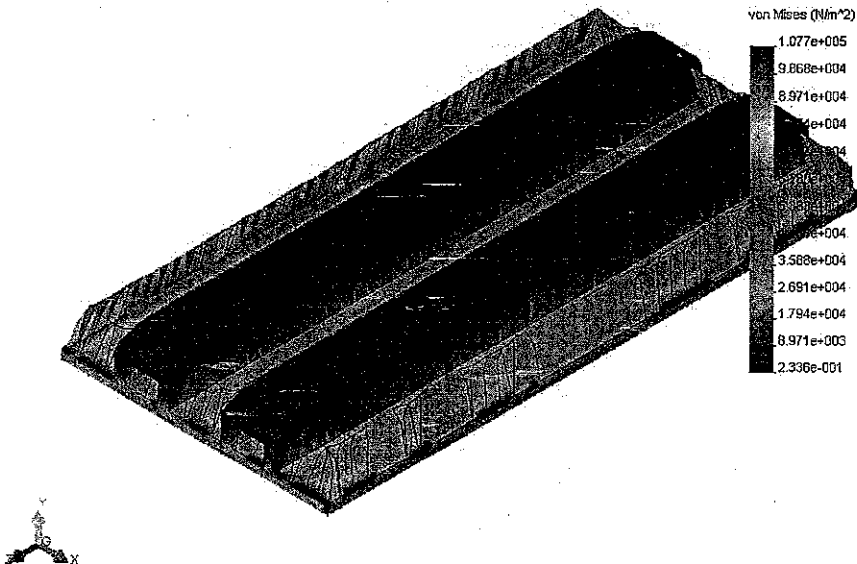


Figura 3.11 Reforzamiento especial de los tanques.

En ocasiones especiales los tanques de los transformadores requieren de algún tipo de consideración especial para su diseño, dependiendo de las condiciones de trabajo, volumen que ocupen o hasta de la misma zona en la cual serán instalados por lo tanto es común tener este tipo de cuidados en el propio diseño.

- a) Cuando los refuerzos internos (side member & end frame, ver figura 3.12) del transformador se han ampliado más de lo común, esto con el



propósito de aumentar la resistencia a los esfuerzos, la protección de tipo estándar en plano deberá ser revisada para determinar cual de los anchos disponibles de refuerzos podrían ser empleados así podemos pasar de un ancho de mayor soporte que el inicialmente se utilizó.

- b) Algunas unidades requerirán de revisar en dos sentidos la presión (tanto interna como al vacío) a la cual será sometido el transformador por lo que se tendrá que revisar las uniones y las deflexiones que se pudieran presentar con el fin de evitar filtraciones y si se requiriera el mismo reforzamiento de la zona, para lograr que los paneles puedan considerarse como seguros. Tales reforzamientos se pueden salir de lo habitual por lo que es necesario que se oculten en la parte interior del tanque o en la parte exterior aumentando el espesor del elemento.

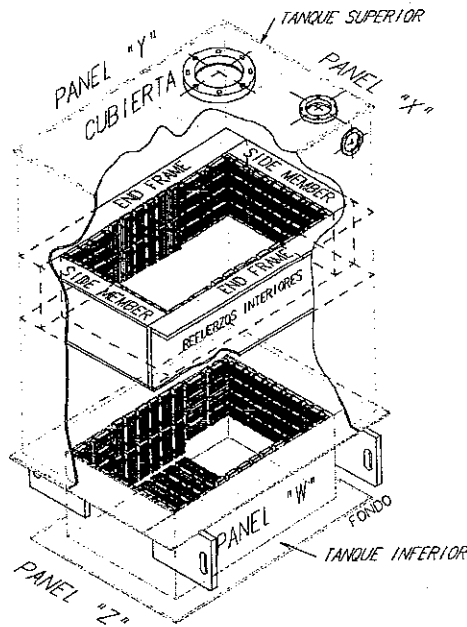


Figura 3.12 Refuerzos interiores de un tanque tipo acorazado.



- c) Los registros-hombre²⁴ de forma rectangular tienden a debilitar las paredes y reducen significativamente, el espectro de seguridad de las paredes. Por lo tanto, cuando se incluyan dentro del diseño, registros-hombre de forma rectangular, se deberán de ubicar en las zonas más amplias de la cubierta, sin embargo esto no deberá ser una limitante para que no se coloquen los refuerzos adecuados, así que estos pueden ser colocados en la parte interna de la cubierta, a unas 4 pulgadas del borde del registro con los siguientes criterios: Si el recorte del registro llegara a las 400 pulgadas cuadradas un menor número de refuerzos pueden ser adicionados alrededor del registro, por ejemplo bastará con reforzar solamente dos lados, sin embargo cuando el área que se tenga que recortar sea mayor a las 400 pulgadas cuadradas, se tendrá que reforzar en los cuatro lados del registro.
- d) Cuando se traten de registros hombre de forma circular mayores a 24 pulgadas de diámetro, el reforzamiento se deberá localizar al menos a 5 pulgadas de la periferia del registro, reforzando los cuatro cuadrantes.

3.7 Ensamble de los componentes

Para el ensamble de los componentes se deberán de tener en cuenta las consideraciones según la información de diseño, auxiliándose de los trazos, previamente hechos, cuando estos existan, ya que en muchas ocasiones el ensamble de los componentes requiere en gran medida de la experiencia y la

²⁴ En base a la capacidad nominal, deberán de proveerse registros de mano o de hombre, ya sea en la cubierta o en las paredes del tanque: para equipos de hasta 10 MVA deben de tener como mínimo un registro, y para capacidades mayores dos registros. La construcción de estos registros deben ser en tal forma, que aseguren el sellado correcto del transformador, con tapa atornillada, que ofrezca un fácil acceso a el extremo inferior de las boquillas, las terminales y las conexiones, además debe permitir reemplazar los transformadores de corriente o cualquier otro tipo de equipo auxiliar, sin necesidad de quitar la cubierta del tanque. Los registros de mano, si son circulares, deben tener un diámetro mínimo de 25 cm; si son rectangulares, el ancho mínimo debe ser de 20 cm y cumplir con un área mínima de 600 cm². Los registros de hombre, si son circulares, deben de tener un diámetro mínimo de 45 cm; si son ovalados o rectangulares; sus dimensiones mínimas deben ser de 40 cm de ancho por 60 de largo.



habilidad que tengan las personas encargadas de el propio ensamble. El jefe de grupo o supervisor proporciona dicha información al personal encargado de realizar los ensambles.

Para la fase inicial del ensamble se necesitará de unir las piezas con puntos de soldadura, si es necesario se colocarán refuerzos ó apuntalamientos provisionales para mantener las piezas en su lugar y evitar deformaciones por calentamiento, durante la aplicación de la soldadura.

3.8 Soldadura del tanque

Una estructura como el tanque de un transformador de potencia se fabrica soldando en conjunto un grupo de formas de metal, cortadas con configuraciones particulares. Durante la soldadura, las diversas partes se mantienen con firmeza en contacto. Las soldaduras se deberán de especificar con precisión en los dibujos de trabajo, lo cual se hace mediante los símbolos para la soldadura que la *American Welding Society (AWS)* ha estandarizado. La flecha de este símbolo deberá de apuntar hacia la unión por soldar. El cuerpo del símbolo contiene todos los elementos que se consideran necesarios:

- ❖ Línea de referencia
- ❖ Flecha
- ❖ Símbolos básicos de soldadura
- ❖ Dimensiones y otros datos
- ❖ Símbolos complementarios
- ❖ Símbolos de acabado
- ❖ Cola de la flecha
- ❖ Especificación o proceso



Para elementos generales de máquinas, la mayoría de las soldaduras son de filete, aunque las soldaduras a tope se emplean mucho en el diseño de recipientes a presión, en este caso se incluyen los tanques de transformadores de potencia.

Por su puesto que las partes por unir deben colocarse de manera que haya un espacio libre suficiente para la operación de soldadura, si se requieren de uniones inusuales debido a un espacio libre insuficiente, o por la forma de la sección, el diseño quizá sea deficiente y el ingeniero de diseño deberá comenzar de nuevo y tratar de establecer otra solución adecuada.

Puesto que en la operación de soldadura se emplea calor, se experimentan cambios metalúrgicos en el metal de base, cerca de la soldadura. Asimismo, se introducen esfuerzos residuales a causa de la sujeción o unión de las piezas, o algunas veces, por orden de la soldadura.

A menudo dichos esfuerzos residuales no son tan severos para que sean motivos de preocupación, en algunos casos se ha determinado que un tratamiento térmico, ligero después de la soldadura, es útil para liberarlos, sin embargo en recipientes como son los tanques de transformadores de potencia no suele suceder así ya que los volúmenes son muy grandes, aunque no es motivo de que se pudiera realizar.

Cuando las partes a soldar son gruesas, resulta favorable someterlas a un precalentamiento. Si la confiabilidad del componente deba ser muy alta, hay que establecer un programa de pruebas o simulación por computadora para que se logren hacer los cambios necesarios para que estos niveles de confiabilidad puedan darse en el proceso del diseño.

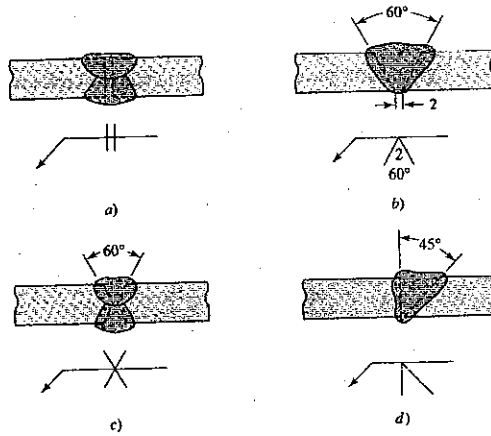


Figura 3.13 Soldaduras a tope o en ranura: a) Cuadrada soldada a tope a ambos lados; b) V simple con bisel a 60° y abertura de la raíz de 2 mm; c) V doble; d) bisel sencillo.

Cabe recordar que para las soldaduras a tope cuando están sometidas a cargas de tensión o de compresión, el esfuerzo normal viene dado por:

$$\sigma = \frac{F}{hl} \quad (3.12)$$

Donde: h es la garganta de la soldadura y l la longitud de la soldadura como en la figura 3.12.

De manera similar el esfuerzo promedio de una soldadura a tope debido a carga cortante está dado por:

$$\tau = \frac{F}{hl} \quad (3.13)$$

Para el proceso de la construcción del tanque en el área de manufactura se deberá verificar que los soldadores se encuentren calificados para realizar el tipo de soldadura, (arco eléctrico, oxiacetileno, etc.) mediante las relaciones de soldadores calificados que determine cada empresa.

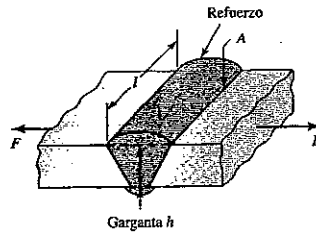


Figura 3.12 Junta típica a tope.²⁵

Para el acero estructural A36 se recomienda seleccionar la soldadura por arco eléctrico, utilizando un electrodo recubierto del tipo E7018, que por sus propiedades se adapta de manera eficiente a este tipo de aceros. Los electrodos del tipo E7018 son de bajo hidrógeno con altos porcentajes de polvo de hierro en el revestimiento. Pueden usarse con corriente alterna y con CDPI (Corriente Directa Polaridad Invertida). Sirven de manera eficiente para las soldaduras de tipo de filete en aceros de alto carbono y acero de aleación. Su trabajo se caracteriza por un arco silencioso y suave, muy poca salpicadura, baja penetración y altas velocidades lineales²⁶.

Número de electrodo AWS ²⁷	E6010 E6011	E6012 E6013	E6020 E6027	E7014 E7024	E7018 E7028
Resistencia de tracción, min. (lb/pulg ²)	62 000	67 000	62 000	72 000	72 000
Punto de cedencia, min. (lb/pulg ²)	50 000	55 000	50 000	60 000	60 000
Elongación en 2 pulg., min. %	22	17	25	17	22

Tabla 3.5 Propiedades mecánicas típicas de electrodos de acero dulce

²⁵ Nótese que el valor de h no incluye el refuerzo, que quizá sea deseable, pero varía un poco y produce concentración de esfuerzo en el punto A de la figura. Si existen cargas de fatiga, una buena práctica consiste en esmerilar o maquinar el refuerzo.

²⁶ Metals and how weld them (Cleveland, Ohio: Janes F. Lincoln Arc Welding Foundation), p. 94

²⁷ Sistema de numeración del código de especificaciones de la American Welding Society (AWS) para electrodos. En este sistema se usa como prefijo la letra E, en un sistema de numeración de cuatro a cinco dígitos en el cual los primeros dos o tres números designan la resistencia mínima a la tensión. El último incluye variables en la técnica de soldado, como la fuente de corriente. El penúltimo dígito indica la posición de soldado, como por ejemplo, plana, vertical o sobre la cabeza.



La aplicación de la soldadura a cada uno de los componentes que previamente se diseñaron entorno al tanque del transformador, requiere de soldadores capacitados en la realización de la misma por lo que es importante que este tipo de personal esté calificado por el WPS (Welding Procedure Specification) que cada empresa deberá determinar según sus grados y normas de calidad²⁸.

Para la utilización de los electrodos E7018, una vez que es abierto el empaque original, deberán ser almacenados en hornos de soldadura estacionarios a una temperatura de 66 °C a 140 °C. Trasladando a los lugares de trabajo en hornos portátiles solo la soldadura para 4 horas de trabajo, al término regresar los sobrantes y así lograr que la soldadura se encuentre en una temperatura óptima de aplicación. Por consiguiente todas las juntas a soldar deberán de estar libres de escoria, rebaba, aceite, oxido e impurezas.

Al término de las soldaduras estas deben de ser marcadas con el número o letra de golpe que se le haya asignado y así tener un control más amplio de quien y en que momento fue realizada dicha soldadura, estas marcas no deberán de estar a más de 2" del cordón de soldadura, cuando sean soldaduras longitudinales, espaciadas entre ellas a no más de 30". Cuando sean bridas, piezas ensambladas al tanque y accesorios estampar solo con una marca.

El criterio de aceptación de la soldadura puede darse de diversas maneras, la más importante: la visual. Se consideran defectos los poros, cráteres y fracturas. Los socavados serán defectos cuando tengan una profundidad mayor de 1/16" con longitud de 2", en un cordón de longitud 12". Para evaluaciones de soldaduras con Pruebas No destructivas, los criterios serán conforme al Código ASME. La mayoría de las ocasiones se realizan solo si el cliente así lo requiera y se

²⁸ Para obtener la cualificación de uno o varios soldadores respecto a un proceso de soldadura, es necesario en primer lugar, realizar o escribir dicho proceso o procedimiento. Dicho procedimiento debe ser validado mediante una serie de ensayos mecánicos, destructivos y no destructivos, realizados en un laboratorio a fin de corroborar que el procedimiento es el correcto.



realizarán y coordinarán en el correspondiente departamento de aseguramiento de calidad.

3.9 Pendiente de la cubierta del tanque

El diseño de un transformador, requiere de una amplia consideración de elementos que en ocasiones parecerían irrelevantes, sin embargo muchos de estos mínimos detalles cuando no son considerados pueden de alguna forma influir en el desempeño óptimo del transformador. La cubierta principal del tanque debe diseñarse de tal manera, que evite la acumulación de agua en su superficie²⁹.

Por tanto una cubierta con pendiente tiene que ser considerada en todos los transformadores que sean diseñados con un sistema de tanque COPS aunque esta pendiente no sea especificada por el cliente, como ya se mencionó antes esta pendiente evitará la acumulación de agua en la cubierta y evitará en la parte interna del transformador la acumulación de gases que son generados por la descomposición del aceite, debido al calentamiento del mismo. Es muy importante que se considere ya que los transformadores en la actualidad están incluyendo detectores de gases para estudios previos de falla en el mismo. Por lo tanto se deberán de tener las siguientes consideraciones para el diseño de las cubiertas con su correspondiente pendiente.

- 1) La cubierta deberá ser diseñada con una pendiente de 3°. El diseño de una sola pendiente es el preferente (ver figura 3.13), si no es posible el diseño de una sola pendiente se podrá optar por el diseño de dos pendientes (ver figura 3.13).

²⁹ NORMA NMX-J-284-1998-ANCE



- 2) El colector de gases deberá tener una pendiente de 1° y deberá ser ubicado en la parte superior de la cubierta (dependiendo del tipo de cubierta: dos o una pendiente). Considerando las espacios correspondientes para las conexiones que el o los analizadores de gases requieran.
- 3) Para los diseños que incluyan una sola pendiente se deberá dejar una prolongación de la cubierta de 2 pulgadas, tratando de rematar de manera adecuada la cubierta cuando esta contenga refuerzos en la parte exterior (la mayoría de los casos) de tal forma que estos no permitan la acumulación de agua en el exterior y si se encuentran en el interior que eviten la retención de los gases.
- 4) En cuanto a los diseños con dos pendientes, las prolongaciones podrán ser de $1 \frac{1}{2}$ pulgadas en cada extremo y de igual manera tener un cuidado especial con los refuerzos y algunos otros elementos que pudieran acumular material que ponga en riesgo el funcionamiento del transformador (boquillas, registros hombre, tanque COPS, etc.).

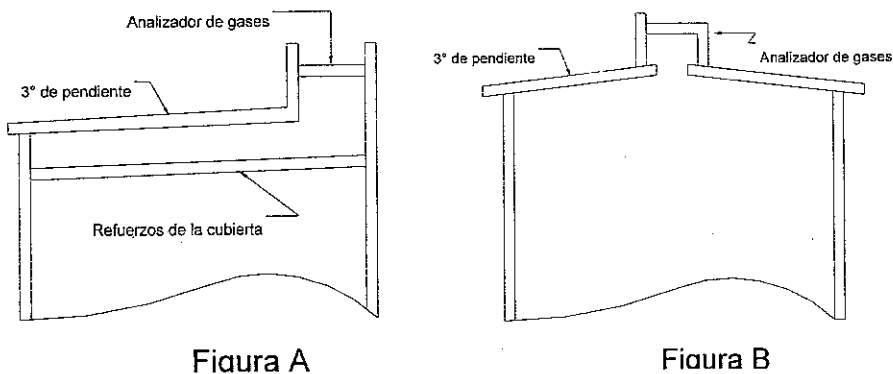


Figura 3.13. Diferentes configuraciones de pendiente en la cubierta de un tanque de transformador.



3.10 Diseño para condiciones sísmicas.

Cuando un cliente especifica dentro de las consideraciones técnicas que el transformador sea mecánicamente adecuado para soportar cargas potencialmente generadas por un sismo, se tendrán que considerar mas aspectos de los antes mencionados en el proceso del diseño.

Principalmente para asegurar la integridad del transformador durante y después de un evento sísmico los transformadores tienen que mantenerse firmemente sujetos a la base que los aloja (monolítica). Para mantener esta posición basta con soldar la periferia de la base del transformador a una plataforma empotrada fielmente a la cimentación donde será colocado dicho transformador (el proceso de soldadura, debe de estar de acuerdo con las especificaciones AWS aplicables)³⁰, aunque también con la utilización de un buen número de pernos alrededor de la base antes mencionada tendrá un buen efecto de sujeción³¹. Sin embargo el proceso de soldar la base es mucho mejor que otros, siempre y cuando el cliente así lo considere.

En la mayoría de los casos a la fecha, las fuerzas que se generan y que el transformador tiene que resistir durante el transporte exceden en mucho a las cargas de esfuerzos que se pueden aplicar a un transformador durante un evento sísmico. Este tipo de consideraciones no aplican a los refuerzos que habrá que considerar en el núcleo, devanados y tanque para eventos sísmicos.

Los mayores elementos a considerar en un diseño que incluya restricciones sísmicas se refieren principalmente a los elementos externos al tanque, sometidos a cargas excesivas y deflexiones que pongan en riesgo a dicho elemento y

³⁰ No debe permitirse el incremento en un tercio de esfuerzos permisibles en la parte soldada, debido a las cargas de un sismo.

³¹ El tamaño y fuerza de los pernos de fijación, deben ser seleccionados entre los pernos de un material que soporten los esfuerzos necesarios. Se recomienda se utilice acero templado dúctil (A36 ó A307).



consigo a el buen funcionamiento del mismo transformador. Estos elementos incluyen al tanque COPS, los radiadores, enfriadores, boquillas, los gabinetes de control, y cualquier otro equipo externo. Cualquiera de estos elementos tiene que ser probado (o calculado) para prever la capacidad del equipo durante este tipo de fenómenos naturales.

La mayoría de estos elementos ya están previamente diseñados y catalogados dependiendo de los esfuerzos a los que serán sometidos en dos niveles de magnitud, dependiendo de las especificaciones que el cliente desee que resista:

1. Un categoría de baja intensidad puede considerarse hasta aceleraciones mayores a 1.0 gravedades.
2. Una categoría de alta intensidad puede considerarse hasta aceleraciones mayores a 2.0 gravedades.

Se deberá tener cuidado en la determinación de la aceleración que llegará a tener cada elemento ya que en ocasiones la cantidad de datos que nos aporte el cliente no es la suficiente y solo se limita a la zona en donde será colocado el transformador y algunos datos comunes, como códigos y normas, por lo que será necesario hacer una exhaustiva investigación para encontrar los métodos de definición de cargas en combinación simultanea de las aceleraciones. Estos métodos deberán de proporcionar la información necesaria para determinar la máxima respuesta a la aceleración que deberá soportar nuestro diseño en función de las normas y estandarizaciones internacionales.

El objetivo de este punto no es simplemente diseñar la estructura para que sea capaz de resistir un conjunto de fuerzas laterales, aunque esto es parte esencial del proceso. Mas bien, se debe dar a la estructura la capacidad de disipar



de la manera más eficiente la energía introducida por el movimiento del terreno. En caso de sismos severos, es aceptable que buena parte de esta disipación de energía se realice con deformaciones inelásticas que implican daño, siempre que no se alcancen condiciones cercanas al colapso.

El cumplimiento de los objetivos, implica que la estructura posea una rigidez adecuada para limitar sus desplazamientos laterales y para proporcionarles características dinámicas que eviten amplificaciones excesivas de la vibración: que posea resistencia a carga lateral suficiente para absorber las fuerzas de inercia inducidas por la vibración; y que tengan alta capacidad de disipación de energía mediante deformaciones inelásticas, lo que se logra proporcionándole ductilidad.

A grandes rasgos el diseño de una estructura que sea capaz de resistir los efectos sísmicos, implica las siguientes etapas:

- 1. La selección de un sistema estructural adecuado.** El sistema estructural debe ser capaz de absorber y disipar la energía introducida por el sismo sin que se generen efectos particularmente desfavorables, como concentraciones o amplificaciones dinámicas.
- 2. El análisis sísmico.** Los reglamentos definen las acciones sísmicas para las cuales debe calcularse la respuesta de la estructura y proporcionan métodos de análisis de distinto grado de refinamiento. La estructura debe prestarse más a la determinación del método analítico más representativo de la estructura real, que al refinamiento del análisis para el cual se cuenta actualmente con programas de computadora poderosos y fáciles de usar, que simplifican notablemente el problema.



3. El dimensionamiento de las secciones. Los métodos de dimensionamiento de las secciones y elementos estructurales no difieren sustancialmente de los que se especifican para otro tipo de acciones, excepto para los métodos de diseño por capacidad.

4. Detallado de la estructura. Para que las estructuras tengan un comportamiento dúctil es necesario detallar sus elementos y conexiones para proporcionarles gran capacidad de deformación antes del colapso. Los requisitos al respecto son particularmente severos en estructuras de concreto.

Existen una infinidad de elementos a considerar en el diseño de un transformador de potencia, desde el diseño mínimo de un simple perno a un cordón de soldadura hasta elementos de mayor magnitud como son los tanques que servirán para recibir a los propios elementos de transformación, cada uno con una importancia tan importante que no podría ser posible la transformación eléctrica a grandes potencias, en este capítulo se ha pretendido dar una idea al lector lo más cercana posible al diseño de cada uno de los elementos mecánicos que intervienen en la construcción de un transformador, sin embargo existen muchos más elementos que se encuentran fuera de nuestro alcance, porque serían temas muy interesantes para desarrollar en otros trabajos de tesis. Aquí se ha pretendido analizar el diseño del tanque y de algunos elementos que en el mismo diseño se involucran en el próximo capítulo se tratarán los temas del manejo y las pruebas que se realizan a los transformadores de potencia.

Capítulo 4

Pruebas y transporte del transformador

Una vez que el transformador ha sido construido en su totalidad, se requiere hacer una serie de pruebas para saber a ciencia cierta si el diseño cumple con los requerimientos de calidad y seguridad que han sido especificados en los planes maestros y así garantizar que el producto va a funcionar eficientemente durante su vida de operación³². De igual manera después de haber acreditado las pruebas antes mencionadas se deberán de considerar el transporte y manejo del transformador hasta el lugar de final ubicación, por lo tanto, recordando los pasos a seguir en el proceso del diseño visto en el primer capítulo, por lo tanto el presente, trata de dar una visión cercana a este tipo de conceptos.

4.1 procedimiento de pruebas a presión para tanques de transformador.

La unidad al ser ensamblada en el departamento de manufactura es enviada al centro de pruebas donde se procederá a realizar una serie de pruebas a el transformador en su totalidad. Todo el equipo auxiliar que se utilizará durante las pruebas (bombas, boquillas, enfriadores, indicadores, etc.) deberá ser colocado antes de hacer las pruebas de presión. Las únicas excepciones serán de aquel equipo que no soporte las presiones de prueba a las cuales será sometido el transformador, por lo que deberán de ser removidas ya que se les puede causar daño permanente y deberán de ser reparadas, o en su defecto cambiar por un componente nuevo lo que implicará pérdidas económicas y de tiempo.

³² La mayoría de estos equipos al ser muy costosos y requieren de un tiempo considerable de diseño y manufactura, tienen grandes periodos de garantía por parte de los fabricantes que en algunas ocasiones llegan a los treinta años por lo cual tienen que ser exhaustivamente probados y así evitar posibles reclamaciones futuras.



Este tipo de pruebas incluye todos los compartimentos adicionales tales como transformadores auxiliares y componentes que se encuentren en el interior del mismo, los radiadores del transformador deberán entonces también ser parte de la prueba, siempre y cuando no se indique lo contrario en los procedimientos de diseño.

4.2 Preparación de la prueba.

Los transformadores pueden ser probados completos o en secciones. Cuando se prueben seccionados se pueden usar cubiertas de embarque o cubiertas provisionales (parches), Si existen refuerzos ó cámaras selladas en el interior del tanque se tiene que realizar la prueba comunicando el refuerzo o cámara hacia el exterior del tanque por medio de la utilización de un cople. Existen dos tipos de pruebas de presión, con aire o con aceite, la prueba con aire se refiere a inyectar aire al transformador vacío de aceite hasta alcanzar una presión de 15 psi, verificando si existen fugas en el interior del tanque, utilizando como método de verificación agua con jabón, y por supuesto si existen fugas repararlas.

4.3 Prueba de deformación previa al llenado.

Para realizar esta prueba de deberán colocar dos manómetros comunicando al interior del tanque a una altura mayor que cualquier parte ensamblada del tanque, para verificar la presión del mismo, por consiguiente los manómetros deberán de estar perfectamente calibrados, en esta prueba solo se verificará la deformación que sufre el tanque del transformador sin la inserción del núcleo y los demás componentes internos ya que será llenado con agua y así se evitara los daños ocasionados al núcleo por la humedad (deterioro del papel, madera y demás componentes sensibles al agua).



a) Colocación de hilos.

Para los tanques tipo columna los hilos se colocarán de la siguiente manera:

- Para tanques con refuerzos externos colocados en posición vertical, con alturas mayores a 160", que no se unan en las esquinas con los otros refuerzos, colocar tres hilos. Uno en la parte superior y otro en la parte inferior a 40" aproximadamente de los extremos y uno más, aproximadamente a la mitad de la pared.
- Para tanques con alturas de pared menor a 160" colocar un solo hilo, localizándolo aproximadamente a una tercera parte de la altura de la pared.

Después de haber colocado los hilos, separarlos de la pared para que sobresalgan de los refuerzos que se encuentren en el paso de los hilos. Marcar con crayón ó gis sobre cada pared 3 puntos de referencia con respecto al hilo, si el ancho de esta es menor ó igual a 125", 4 puntos si es mayor a 125" pero menor ó igual a 190" y 5 puntos si es mayor a 190". Los puntos extremos deberán estar a 10" aproximadamente de las orillas de la pared y los otros igualmente repartidos. Estos puntos de referencia siempre deben ser ubicados en claros entre refuerzos, nunca encima de estos; por lo que la colocación de hilos debe de ajustarse a este criterio.

Antes de llenar con agua el tanque, comprobar que en las paredes no existen deformaciones, midiendo en milímetros la distancia de la pared al hilo en cada punto de referencia y registrar la medición sobre la pared, en cada etapa de la prueba. Para poder continuar con la siguiente etapa, la variación entre mediciones de un mismo hilo no debe ser mayor a 2%, de la separación entre puntos de referencia. Como ejemplo, si entre A y B existe un metro de separación, la variación máxima permitida entre la medición en A y la medición en B será de



20 milímetros. Si la medición excede el límite permitido, se tendrá que detener la prueba y se tendrá que revisar el diseño del mismo para encontrar una solución adecuada al problema.

4.4 Prueba de presión del tanque principal.

Para la prueba con aceite, se deberá de colocar una tubería de alivio de presión en la parte superior del transformador para así evitar sobrepasar los límites de diseño.

La prueba se realizará con el transformador completamente lleno del aceite dieléctrico que contienen los mismos, como lo indiquen los procedimientos indicados en las ordenes de trabajo³³. Se tiene que mantener limpia el área de trabajo y los excesos deberán de ser retirados para que se puedan aplicar polvos reveladores en las áreas soldadas a fin de verificar posible fallas en la estructura que deriven en goteras.

Recordemos que la presión cambia con la temperatura por lo que se deberá de estar revisando frecuentemente que la presión no descienda en más de 1 psi ya que se tendrá que repetir desde el principio para continuar con la prueba. En contraste la presión tampoco excederá de 1 psi la presión determinada en la orden de prueba para dicho equipo.

Recurrentes caídas de la presión es un indicativo de fugas en el tanque, y se tendrán que realizar más pruebas para determinar dichas fallas. Las terminaciones en los ensambles de las placas deberán de ser verificadas por simple observación utilizando patrones de ensamble previamente provistos, las pruebas de presión varían en el tiempo dependiendo de cada de ellas, si al cabo

³³ Un ejemplo de esto es sellar todas las aberturas mediante bridas ciegas y tapones, colocando empaques entre las bridas ciegas y los registros soldados al tanque, colocando también empaques entre el tanque y la cubierta ó la base y posteriormente fijar con prensas "C" según se requiera.



de las mismas no se presentan fugas, esto quiere decir que efectivamente no existe ningún problema con las uniones que se realizaron.

Si llegaron a existir fugas estas tienen que ser reparadas y el equipo tendrá que volverse a probar mediante la siguiente tabla:

Tiempo en el que se detectó la fuga después de iniciada la prueba	Después de la reparación, tiempo adicional para certificar la prueba
0 – 1 horas	6 horas
1 – 2 horas	5 horas
2 – 3 horas	4 horas
3 – 4 horas	3 horas
4 – 5 horas	2 horas

Tabla 4.1 relación de tiempos de prueba tras la detección y reparación de una fuga en un tanque de transformador.

PRECAUCIÓN: PARA PREVENIR POSIBLES DAÑOS O RIEGO DE INCENDIO, NO PERMITA SE REALICEN TRABAJOS DE SOLDADURA MIENTRAS EL TANQUE DEL TRANSFORMADOR SE ENCUENTRA SOMETIDO A PRESIÓN. AL MISMO TIEMPO ES NECESARIO DESALOJAR EL ACEITE CONTENIDO EN EL TRANSFORMADOR AL MOMENTO DE REALIZAR GRANDES REPARACIONES DEBIDO A FUGAS.

Regularmente los tiempos de exposición a presión de los tanques deberá de ser dividido en segmentos parciales de tiempo, para ir cambiando de nivel gradualmente y así, no someter de un solo golpe al tanque y evitar fenómenos como el golpe de ariete que puede ocasionar daños considerables al equipo. Sin embargo los periodos de tiempo no deberán de ser menores a 2 horas, ya que es tiempo suficiente para que el equipo entre en equilibrio estático y pueda ser elevada su presión interna. Cuando se lleven a cabo las pruebas de presión se deberá observar el comportamiento de las juntas y válvulas, la presencia de aceite es un indicativo de reparación o sustitución de dicho componente, que también es



una muestra de que la selección de equipo en el diseño del mismo deberá por tanto ser modificado.

4.5 Prueba de presión del tanque de expansión.

La prueba de presión del tanque de expansión de un transformador deberá de llevarse a cabo de forma separada del tanque principal. El tanque de expansión deberá ser probado a una presión de 10 psi durante 2 horas. Los tanques que contienen una bolsa de neopreno en su interior (tanque COPS) requieren de una prueba especial de presión. este procedimiento se refiere a pruebas de presión y del nivel del líquido contenido dentro del tanque así como a la membrana de neopreno que contiene el mismo tanque COPS.

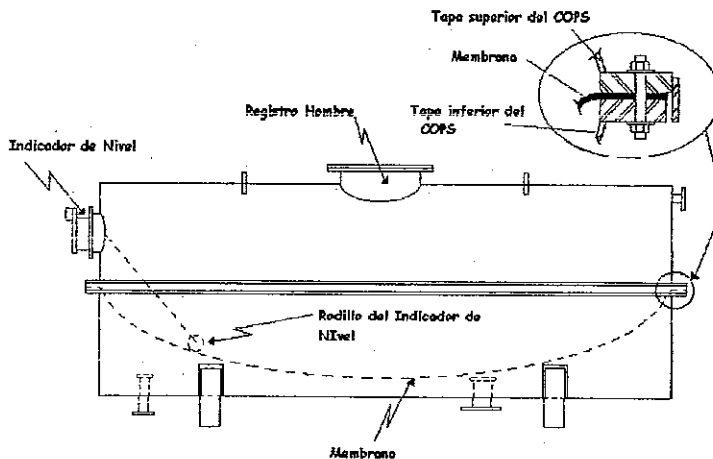


Figura 4.1 Configuración típica de un tanque COPS con membrana interna.

Antes de realizar la prueba deberá de vaciarse por completo el tanque de cualquier residuo de líquido, que se encuentre en su interior.

Prueba de presión para la bolsa de neopreno. Con el tanque COPS totalmente vacío, aplicar 4 psi de presión a la bolsa durante aproximadamente 6



horas, si la presión disminuye en al menos 0.25 psi, la bolsa deberá de ser revisada para verificar algún tipo de fuga y volver a realizar la prueba.

Prueba de presión para el tanque COPS. Después de verificar la bolsa de neopreno que se encuentra dentro del tanque de expansión, este tendrá que ser llenado hasta la merca máxima de capacidad del mismo, para someterse a una presión de 10 psi durante dos horas y así observar que no existan fugas en el tanque, si existen, reparar y volver a realizar la prueba.

4.6 Pruebas a los parches temporales.

En algunas ocasiones durante el proceso de desmantelamiento para su embarque el transformador sufre una serie de modificaciones, esto se refiere a la remoción de componentes externos al tanque, como pueden ser los radiadores, válvulas, tanque de expansión, etc., y todos aquellos elementos que en un momento dado tengan que ser removidos, por cuestiones de transporte, y que entren en esta categoría. El espacio que estos componentes dejan (huecos) en ocasiones son cubiertos con tapas soldadas o con bridas, estos elementos deberán de ser probados para verificar que puedan soportar algún tipo de presión (menor a la presión normal de trabajo) que permita el transporte a el lugar de destino último de un transformador, claro que la presión ejercida dentro del transformador será considerable , ya que el fluido interno se moverá y generará algún tipo de esfuerzo interno.

Después de haber colocado todos los parches, la unidad deberá de nueva cuenta ser llenada con el nivel óptimo de aceite (como en la prueba con todos los accesorios), como una primera prueba se realiza una inspección durante 30 minutos para visualizar si existe fuga de aceite, sin aumentar la presión, solo la ejercida por el aceite. Una prueba posterior consiste en llenar el domo del tanque con nitrógeno o aire seco (para evitar el incremento de la humedad), para alcanzar una presión en la parte superior del tanque de 5 psi, o alguna otra presión



dependiendo del tipo de transformador que se haya diseñado. Continuar con este procedimiento por dos horas para verificar las posibles fugas de aceite, como en ocasiones anteriores, si es localizada una fuga habrá que reparar y volver a realizar la prueba³⁴.

4.7 Desmantelado del transformador

Existen dos etapas de desmantelamiento del transformador para su posterior envío al lugar de final ubicación, el desmantelamiento interno y el externo. Se deberá de poner atención en todos aquellos componentes, que con el movimiento natural del transporte puedan resultar dañados, así que habrá que removerlos teniendo ciertos cuidados y previsiones, para permitir que el transformador llegue a su destino en las condiciones óptimas para su funcionamiento.

4.7.1 Desmantelamiento interno

Para realizar este tipo de trabajo se deberá de poner atención en solo abrir los registro-hombre necesarios para la labor, sin embargo se recomienda que sea solo uno, este registro hombre deberá de ser vuelto a cerrar en el momento en que no se este realizando ninguna maniobra de desensamble, ya que se debe evitar al máximo la presencia de humedad dentro del ambiente interno del transformador. Se tendrá que vaciar el aceite contenido en el transformador hasta un nivel en el que se permita hacer las maniobras del retiro de componentes, procurando no llegar por debajo de los devanados del núcleo, que traería como consecuencia un incremento en la humedad del núcleo. Colocar una manta sobre el núcleo y la parte superior del nivel de aceite para evitar la contaminación del

³⁴ Si un registro hombre es abierto por alguna condición de reparación, verificación o desmantelado, después de la prueba de los parches, este deberá de ser cerrado y se deberá de volver a realizar la prueba a presión con al menos 3.5 psi de presión de gas durante una hora.

Si es necesario remover radiadores u otro accesorio para reparar fugas, estos pueden no ser colocados para pruebas finales ya que se considerarán elementos libres de fugas.



líquido y la posible caída de material ó herramienta, realizar las conexiones que serán permanentes y las que no lo son deberán de desconectarse y etiquetarse con una etiqueta de color rojo para la gente de instalación en campo, además especificar en los dibujos el tipo de conexión de que se trata, si es permanente o que falta conectar, cuando se retiren las boquillas, inmediatamente habrá que colocar los tapones bridas ciegas correspondientes a cada caso.

Si se requiere de enrollar cable, habrá de hacerse un círculo de un diámetro lo bastante grande para evitar daños a el aislamiento del mismo, atando en tres lugares separados alrededor de la circunferencia que se ha formado. Es conveniente atar dicho rollo a una pared o refuerzo interno de tal manera que se evite el movimiento durante el traslado, si el transformador se envía totalmente lleno con el aceite respectivo, colocar el rollo en un lugar cercano al registro hombre de la cubierta cerca de la bridas que sujetan las boquillas, para así evitar vaciar el transformador cuando se ponga en marcha. Si se trata de cables que sean más pequeños y flexibles estos pueden ser sujetados cerca de las bridas que soportan las boquillas y sujetarlas con abrazaderas provisionales, así se evitará tener que abrir algún registro-hombre adicional, cabe mencionar que si se agrega algún elemento que tenga que ser removido este tendrá que ser pintado de color amarillo para que pueda ser identificado como elemento externo.

Cuando el transformador este condiciones del envío y todos los sujetadores colocados se deberá de dar aviso a control de calidad para una revisión final de los componentes removidos del interior. Estos a su vez deberán de considerar los movimientos máximos (también los esfuerzos máximos permisibles) verticales y horizontales a los que será sometido el transformador. Verificar que todas las partes interiores se encuentren firmemente sujetas, todas los componentes como tornillos, tuercas, terminales, deben de apretarse apropiadamente para que no lleguen a caer sobre las bobinas del núcleo durante la transportación.



Los componentes que tengan que ser retirados del interior del transformador para su embarque, y las posibles refacciones del interior trabajan en un ambiente aceitoso, tales como abrazaderas, postes interiores, puentes de conexión deberán de ser sumergidas en aceite, en un ambiente de aire seco, sin embargo estos componentes solo podrán permanecer no más de 24 horas, si se requiere de un embarque en el que los componentes tengan que viajar o estar fuera de este ambiente aceitoso, conviene sacarlos y envolverlos en plásticos para su traslado. El aceite en el que los componentes tengan que ser sumergidos para su adecuación o su retención temporal, deberá de cumplir con las siguientes características:

Esfuerzo dieléctrico, KV min.	35
Contenido de agua, ppm. máx.	30
Factor de poder, % máx.	0.07

Los soportes y las abrazaderas que se utilicen de forma temporal no deberán permanecer sumergidas en aceite, sin embargo deberán de cubrirse con polietileno para mantenerlas libre de polvos y contaminantes.

4.7.2 Desmantelamiento externo

El desmantelamiento externo se puede realizar al mismo tiempo que el interno y así ahorrar tiempo en el proceso de embarque, antes de proceder a desmontar algún elemento externo se deberá marcar en el dibujo cada uno de los componentes a ser removidos y solo quitar aquellos que estén contemplados en el plan de embarque, señalar a los trabajadores que cuando se requiera de hacer algún tipo de maniobra adicional a lo estipulado en el plan original, se notifique para poder darle un seguimiento a cada uno de estos procedimientos, los radiadores no tienen que marcarse para ser retirados, sin embargo los



ventiladores si, y algún otro componente que se especifique por necesidades del propio cliente.



Figura 4.2 Maniobras de levantamiento para embarque de la unidad principal de un transformador.

Las aberturas provocadas por el retiro de los componentes externos deberán de ser inmediatamente tapadas con bridas ciegas, tapones soldados (parches) o cualquier otro elemento que evite la introducción de humedad o agua, así como polvo, los cables de interconexión que queden sueltos deberán de sujetarse firme y adecuadamente, para evitar que se puedan dañar al momento de realizar la maniobras de levantamiento.

Respecto a este tema, se podrían enlistar una serie de pasos a seguir, pero la lógica del desmantelamiento externo nos dice que habrá que retirar, la cantidad de equipo externo que por peso, exceso de dimensiones, o simplemente la posible afectación del mismo debido a su fragilidad, respecto al equipo en su totalidad, cabe mencionar que existen sus excepciones como en el caso de los



transformadores de alta potencia móviles, estos están diseñados para que sean transportados sin la necesidad de desmantelarlos, debido a su particular diseño logran ser utilizados en campo tan pronto se ubiquen en el mismo.

Además de los elementos que tendrán que ser retirados se deberá de poner énfasis en aspectos que también representan un grado de calidad y presentación respecto al embarque, la limpieza del transformador, y la eliminación de cualquier objeto extraño, estopa, cintas adhesivas, etc.

4.8 Embarque en gas

Existen dos tipos de embarque al momento de la entrega de un transformador, en gas (nitrógeno o aire seco) o en aceite, dependiendo de las necesidades del cliente y de las factibilidades del transporte mismo. Después de las pruebas de parches (cuando ya se han hecho los desmantelamientos internos y externos). Se procederá a realizar el vaciado del aceite y al mismo tiempo la carga del aire seco para mantener una presión positiva, al termino del vaciado del aceite habrá que mantener una presión positiva, por arriba de las 3 psi. Al termino del proceso de llenado con aire seco, se tendrá que mantener en observación el transformador por última ocasión para verificar si no existe una caída en la presión para descartar posibles fugas. La utilización del aire seco se manejará bajo las siguientes condiciones:

1. Antes de comenzar el llenado del transformador se deberá de verificar el punto de rocío del aire seco que deberá ser de $-58\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) ó menor.
2. Las verificaciones del punto de rocío del aire seco se deberán de realizar cada treinta minutos, durante el llenado del transformador, para así garantizar los valores definidos.



3. Si en algún momento se visualiza que el punto de rocío sobrepasa los límites definidos, se tendrá que detener el flujo de aire hacia el interior del transformador, y se procederá a realizar una extracción, con bomba de vacío a 1 mm de hg o menos durante cuatro horas para retirar el exceso de humedad, y de nueva cuenta volver a presurizar el tanque.

Un aspecto que no se deberá de olvidar es la generación de un reporte en el que se incluyan datos importantes de este proceso como son la presión a la cual se encuentra el interior del transformador, el punto de rocío del aire seco. Que permitirá a la gente de campo tomar las precauciones debidas, para evitar posibles accidentes y lesiones.

4.9 Embarque en aceite

Otro tipo de embarque de los transformadores es en su propio medio de trabajo, en aceite, con lo cual se tomarán otro tipo de consideraciones al respecto. Habrá que ajustar el nivel de aceite como sigue:

1. **Tanques de expansión.** Cuando se embarque por separado el tanque de expansión del tanque principal, se tendrá que compensar esta disminución en los niveles con aire seco hasta que el aire ocupe un 5% de la altura total del tanque principal, se tendrá que hacer un reporte al cliente sobre la cantidad de galones o litros que hacen falta para compensar esta baja en los niveles.
2. **Radiadores o intercambiadores.** De igual manera que en caso anterior cuando este tipo de dispositivos tengan que ser enviados de forma separada, del tanque principal, se compensará este espacio con el 5% de aire seco.



Cabe mencionar que la nota aclaratoria en las especificaciones del producto tendrán que contener mensajes como el siguiente:

“Llenar el transformador con aceite hasta _____ pulgadas por debajo de la tapa. Esto significa _____ galones para los radiadores e intercambiadores. Agregar aceite adicional para los radiadores si este número de galones no es suficiente”

4.10 Transporte de la unidad principal

El envío de un transformador de alta potencia por las diferentes vías de comunicación existentes y posibles en algún país determinado requiere de una planeación exhaustiva, pero además son parte de las consideraciones que se deberán de tomar en cuenta, en el proceso de diseño de un transformador, en la medida de lo posible se siguen una serie de procedimientos establecidos, sin embargo por la naturaleza de los variados equipos en algunas ocasiones éstos tienen que adaptarse a las diferentes situaciones que se llegan a presentar, lo que en algunas ocasiones llega a representar un reto muy importante, tanto como el diseño del propio equipo, en algunas industrias, se cuenta con una división especializada para la planeación y el embarque de las unidades de alta potencia, más sin embargo no siempre las condiciones son las apropiadas para que se tengan este tipo de equipos de trabajo y las personas que asumen esta responsabilidad, son los propios ingenieros mecánicos que diseñaron el transformador los que tienen en sus manos las responsabilidades de la logística y de la supervisión de las maniobras de embarque, que sin duda son una interesante área de investigación.

El transporte de este tipo de equipos está dividido principalmente en cuatro partes. La primera se refiere a el embarque de unidades menores a 60 000 libras. La segunda a equipos con un peso mayor a las 60 000 libras exceptuando los equipos que serán transportados en vehículos tipo Schnabel, la tercera para



transformadores diseñados especialmente para movilizarse en carros de ferrocarril tipo Schnabel y la cuarta para las partes internas y externas producto del desmantelamiento desarrollado en secciones anteriores.

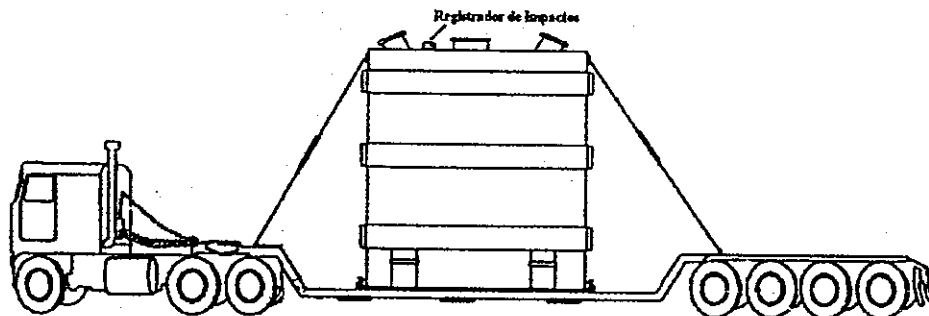


Figura 4.3 Embarque en tractocamión de la unidad principal de un transformador.

4.10.1 Unidades menores a 60 000 libras

Este tipo de transformadores tendrán que ser bloqueados en los extremos de la base con ángulos de acero, preferentemente soldados sobre la cama del vehículo para evitar su deslizamiento, en algunas ocasiones se trata de bloquear este desplazamiento con madera que puede resultar insuficiente, debido a los pesos, se recomienda colocar trozos de cartón entre la cama del vehículo y el transformador para afianzar mejor aún la unidad. Este tipo de bloqueos también tienen que realizarse en forma longitudinal para evitar deslizamientos tanto en el incremento de la aceleración, frenado, como en los movimientos giratorios.

Cuando este primer procedimiento se ha cubierto se recomienda la sujeción con cables de acero de 1 pulgada de diámetro de la parte superior del transformador (ganchos de izamiento superiores) a la plataforma del vehículo,



tratando de cruzar dichos anclajes hacia las esquinas opuestas en la manera de lo posible.

4.10.2 Unidades mayores a 60 000 libras (excepto tipo Schnabel)

Para este tipo de embarques tendrá que ser obligatorio el uso de vehículos de plataforma completamente de acero (no combinación acero y madera) de no reunirse esta característica, se tendrá que rechazar el vehículo por uno que si cumpla con este concepto, debido al gran peso de la unidad. Preferentemente se optará por utilizar carros plataforma de ferrocarril siempre y cuando cumplan este mismo principio, por lo que si no es posible conseguir otro tipo de vehículo, este tendrá que ser adaptado a este tipo de necesidad.

Para tener un nivel de seguridad optimo en el proceso de embarque habrá adicionalmente que reforzar las cubiertas de los vehículos colocando placas de acero de $\frac{3}{4}$ de pulgada de espesor para cuando se embarquen unidades con pesos correspondientes a las 600 000 libras, y con placas de 1 pulgada de espesor para unidades con pesos entre las 800 000 libras de peso. Estas placas deberán ser lo suficientemente grandes para cubrir toda la plataforma del vehículo y no solo la zona del transformador, ya que podría repercutir en la debilitación de la estructura del transporte, estas placas deberán de soldarse a la plataforma base del vehículo con cordones de soldadura de cómo mínimo $\frac{1}{2}$ pulgada de ancho y si es posible con más, esto se logra aplicando consecuentemente 2 o más cordones de soldadura, esto implica que por lo menos uno o más cordones de soldadura irán sobre la base principal del vehículo.

Para evitar deslizamientos debido a las irregularidades que pueda llegar a tener el piso del transporte, se podrá utilizar madera suave para "calzar" dichos espacios, esta madera tendrá que ir sujeta a la base del carro, para evitar que pueda salir disparada debido al movimiento, si esta se encuentra totalmente debajo del transformador no será necesario sujetarla.



Siempre habrá que tratar de evitar calzar en demasía la unidad prescindiendo de madera, se tiene que tratar de que el transformador se mantenga estable en la plataforma del vehículo, por ningún motivo se permitirá soldar la parte baja del transformador y la plataforma del vehículo, para lograr un ligero movimiento del transformador respecto de su transporte, ya que así se evitaría que el transformador formara parte del vehículo y no llegue a reaccionar como tal. En alguna circunstancia los planes originales pueden llegar a cambiar, sin embargo habrá que hacer un reporte especial sobre las modificaciones que se lleguen a dar en el momento del embarque, sin embargo existen condiciones mínimas dentro de los planes de embarque, que no tienen que ser modificados por seguridad, y que por consiguiente implican una serie de responsabilidades legales si no son tomadas en cuenta³⁵.

4.10.3 Unidades para carros tipo Schnabel

Este tipo de unidades se tienen que embarcar conforme a las especificaciones del tipo de vehículo que se trate y no necesita ningún otro tipo de sujeción especial, solo el interior pero será igual que los demás.



Figura 4.4 Embarque en carro de ferrocarril tipo Schnabel de la unidad principal de un transformador.

³⁵ Un ejemplo de esto puede ser cuando el embarque se hace en ferrocarril y los operadores de este consideran que estorban o pueden afectar a la mecánica del transporte los cables de izado, por lo que se tendrá que realizar una valoración pertinente del caso.



4.11 Registro de impactos

Cada unidad que sale embarcada deberá de contener uno o varios registradores de impacto (vibrómetros) esto podrá permitir hacer análisis de cómo se comportan las unidades y sus estructuras durante su viaje, y los posibles esfuerzos a los que son sometidos, esto permitirá obtener información útil a los diseñadores mecánicos sobre futuros proyectos. Existen diferentes tipos de medidores de impactos y según las especificaciones y propuestas de diseño así como características de los propios clientes se realizará el montaje de uno o varios instrumentos, y la posición que ocupe en el propio transformador.

Tal información puede ser analizada en programas de computo como ANSYS (análisis de esfuerzos por método finito) para verificar o comprobar que los esfuerzos que se presentan durante el viaje no alteren el diseño original que se produjo en la fábrica y que el transformador llegue en buenas condiciones, así como analizar, casos especiales que se lleguen a presentar por las propias condiciones del transporte.

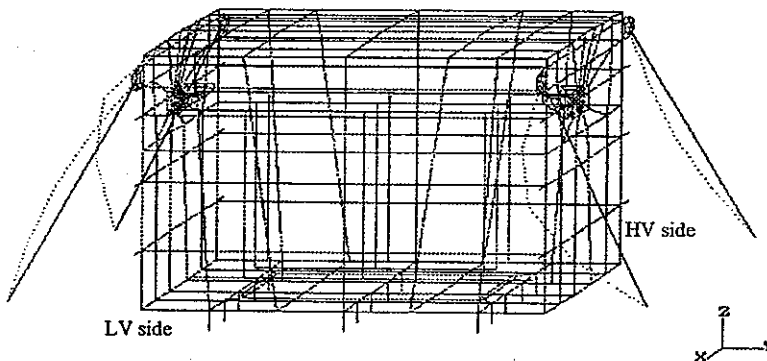


Figura 4.5 Análisis de la deformación que sufre el tanque de un transformador cuando es transportado en un tractocamión.

CONCLUSIONES

La investigación presentada en este trabajo concluye que el proceso de diseño de un transformador de alta potencia requiere de una serie de etapas demasiado grande como para abarcarla en un trabajo de tesis, sin embargo las más importantes, son las que precisamente se ven reflejadas en el presente.

El diseño mecánico en el ámbito de los transformadores, es muy amplio sin embargo en este trabajo se logró contar con información privilegiada que en muchas de las empresas es difícil de conseguir ya que es parte de su propia experiencia y desarrollo de tecnología, y por tanto es restringida, aún así la mayoría de la información que se ha utilizado proviene de plantas de producción y diseño de los Estados Unidos de Norteamérica, principalmente de White Westinghouse, esto permitió tener información importante y de una fuente de prestigio a nivel mundial.

Existen diferentes temas que pudieron haberse tratado en este trabajo, pero por la escasa y restrictiva información, pudieran ser objeto de futuros trabajos de tesis, tales como los embarques en carros de ferrocarril tipo Schnabel, o los análisis de calor que se presentan en la cubierta a causa de los grandes flujos de campos electromagnéticos y como afecta a los componentes en su vida útil. Sin embargo este puede ser un buen principio para que futuros estudiantes puedan adentrarse en estos temas faltantes para complementar el presente trabajo o investigar aquellos que pudieran ser novedosos en un futuro próximo. El diseño mecánico en el campo de los transformadores de alta potencia es un área en la que todavía faltan por investigar diversos temas de gran interés para la comunidad estudiantil y público en general.

APENDICE

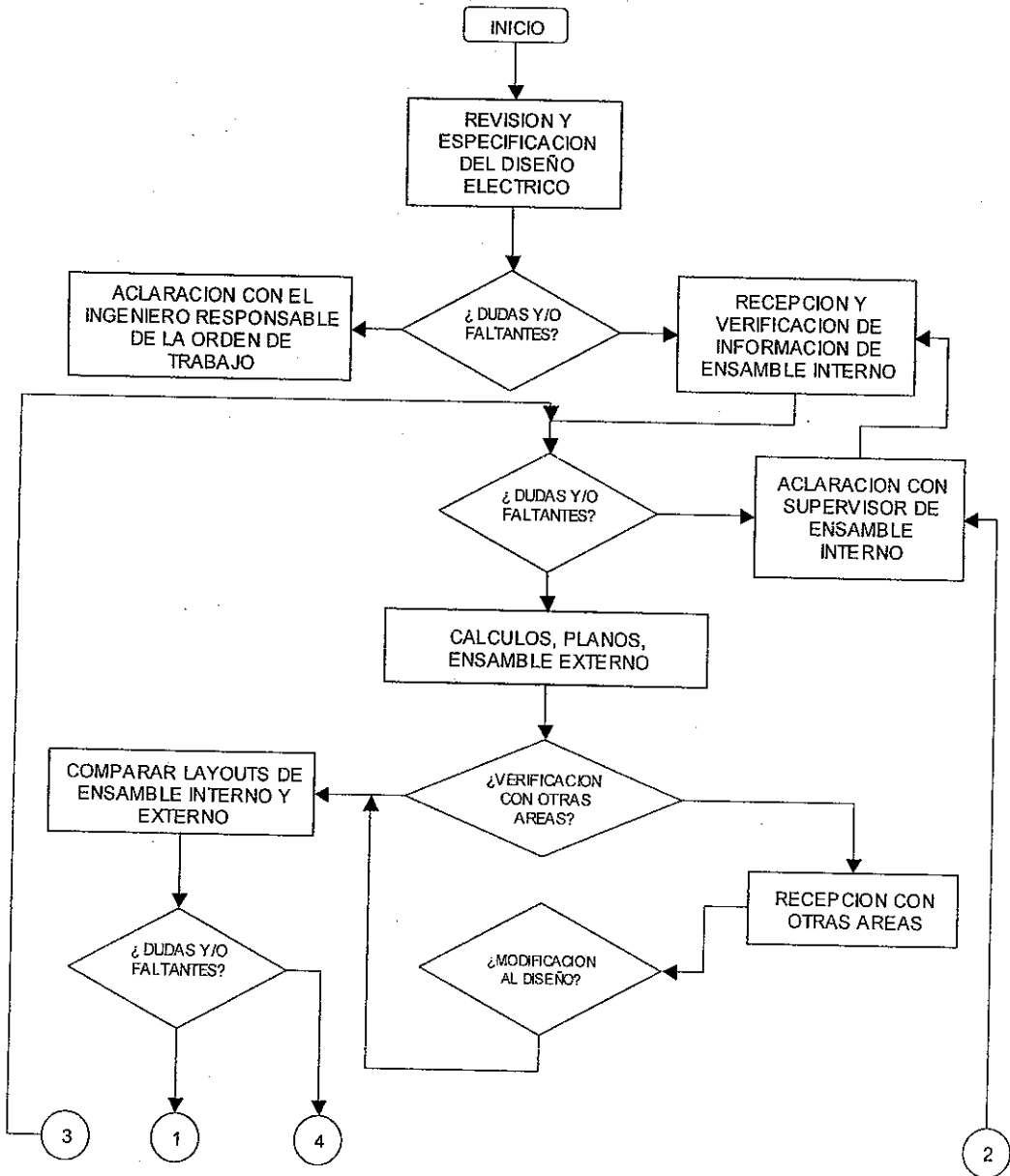


Diagrama de flujo que representa las actividades que desarrolla un Mecánico en el diseño de un transformador de potencia.

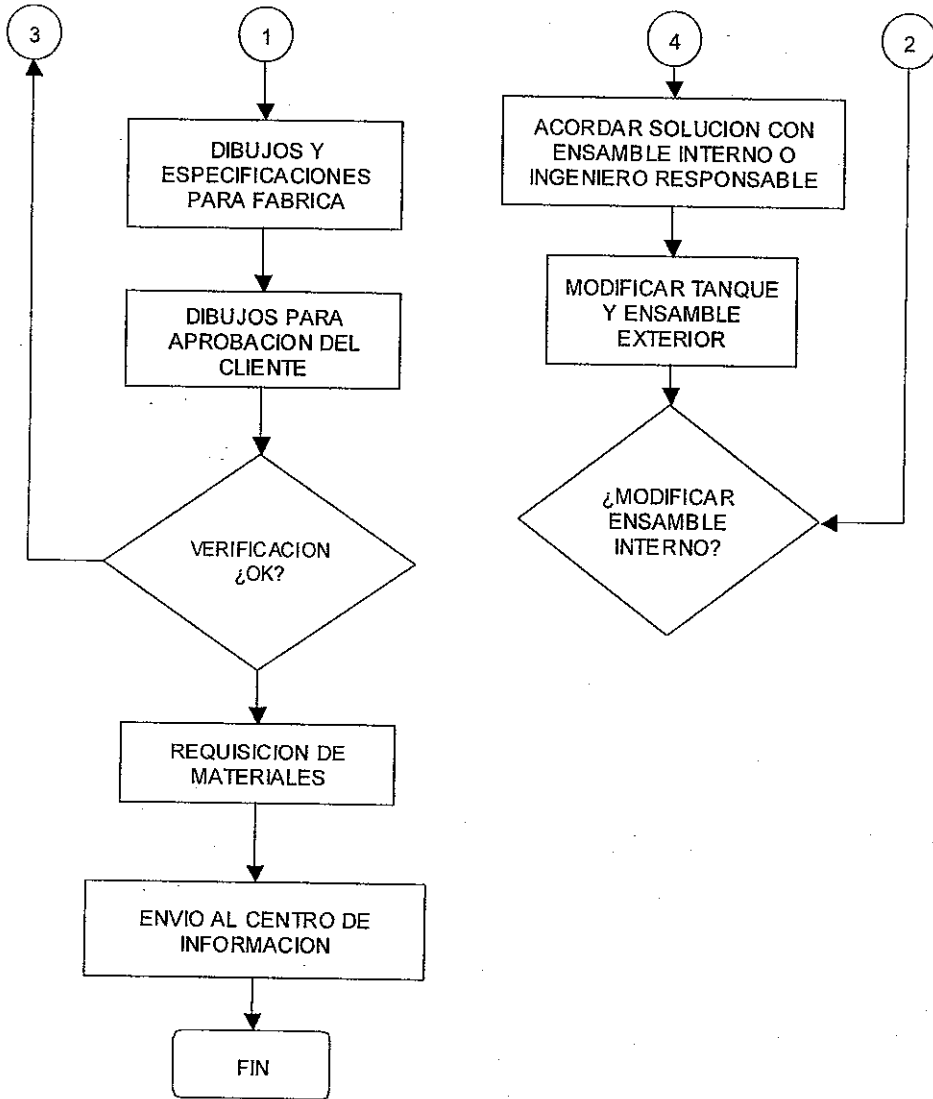


Diagrama de flujo que representa las actividades que desarrolla un Mecánico en el diseño de un transformador de potencia. (continuación)



TABLAS DE MÓDULOS DE SECCIÓN PARA REFUERZOS MEDIOS, EN
TRANSFORMADORES TIPO COLUMNA

TAMAÑO DEL REFUERZO			ESPESOR DE LA PARED DEL TANQUE										
			0.250		0.313		0.375		0.500		0.625		
TK	DP	WD	LBS/IN	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI
0.250	1.75	3.00	0.39	1.24	1.74	1.31	2.00	1.37	2.23	1.47	2.63	1.57	3.00
0.250	1.75	4.00	0.46	1.62	2.20	1.71	2.53	1.78	2.83	1.91	3.35	2.03	3.82
0.250	1.75	5.00	0.53	2.01	2.64	2.10	3.05	2.19	3.41	2.34	4.05	2.49	4.62
0.250	1.75	6.00	0.60	2.39	3.07	2.50	3.55	2.60	3.97	2.78	4.73	2.95	5.42
0.250	2.75	4.00	0.60	2.95	5.88	3.09	6.74	3.20	7.48	3.39	8.71	3.55	9.74
0.250	1.75	7.00	0.67	2.77	3.49	2.90	4.04	3.01	4.53	3.21	5.40	3.41	6.20
0.250	2.75	5.00	0.67	3.57	6.93	3.72	7.95	3.85	8.83	4.06	10.30	4.25	11.52
0.250	1.75	8.00	0.74	3.16	3.90	3.30	4.52	3.42	5.08	3.65	6.07	3.86	6.97
0.250	2.75	6.00	0.74	4.19	7.97	4.36	9.14	4.50	10.15	4.74	11.85	4.95	13.28
0.250	3.50	5.00	0.78	4.89	11.73	5.10	13.42	5.27	14.88	5.54	17.30	5.77	19.25
0.250	1.75	9.00	0.81	3.54	4.31	3.70	5.00	3.83	5.62	4.08	6.72	4.32	7.73
0.250	2.75	7.00	0.81	4.81	8.99	5.00	10.31	5.15	11.46	5.41	13.39	5.65	15.02
0.250	3.50	6.00	0.85	5.68	13.38	5.91	15.31	6.10	16.98	6.40	19.74	6.65	21.98
0.250	1.75	10.00	0.88	3.92	4.72	4.09	5.48	4.24	6.16	4.51	7.38	4.78	8.49
0.250	2.75	8.00	0.88	5.43	10.00	5.63	11.47	5.80	12.75	6.09	14.91	6.35	16.74
0.250	3.50	7.00	0.92	6.48	15.02	6.73	17.17	6.93	19.04	7.26	22.15	7.53	24.68
0.250	4.00	6.00	0.92	6.75	17.89	7.02	20.44	7.25	22.66	7.59	26.32	7.88	29.25
0.250	2.75	9.00	0.95	6.05	11.01	6.27	12.61	6.45	14.03	6.77	16.42	7.04	18.45
0.250	3.50	8.00	0.99	7.28	16.65	7.55	19.02	7.76	21.09	8.11	24.53	8.41	27.35
0.250	4.00	7.00	0.99	7.66	20.02	7.96	22.85	8.20	25.33	8.57	29.41	8.88	32.70
0.250	2.75	10.00	1.02	6.68	12.00	6.91	13.75	7.11	15.30	7.44	17.92	7.74	20.14
0.250	3.50	9.00	1.06	8.09	18.26	8.37	20.86	8.60	23.12	8.97	26.90	9.29	30.00
0.250	4.00	8.00	1.06	8.58	22.13	8.90	25.25	9.15	27.97	9.55	32.48	9.88	36.12
0.250	4.50	7.00	1.06	8.90	25.83	9.25	29.47	9.52	32.64	9.95	37.88	10.30	42.06
0.250	3.50	10.00	1.13	8.89	19.87	9.19	22.68	9.43	25.14	9.83	29.25	10.17	32.64
0.250	4.00	9.00	1.13	9.51	24.23	9.84	27.63	10.10	30.60	10.53	35.52	10.88	39.51
0.250	4.50	8.00	1.13	9.94	28.50	10.30	32.48	10.60	35.96	11.05	41.71	11.42	46.32
0.313	1.75	11.00	1.17	4.95	5.57	5.19	6.54	5.41	7.44	5.78	9.06	6.14	10.54
0.250	4.00	10.00	1.20	10.43	26.32	10.78	30.00	11.06	33.21	11.51	38.55	11.89	42.89
0.250	4.50	9.00	1.20	10.98	31.14	11.36	35.47	11.67	39.25	12.15	45.52	12.55	50.55
0.250	5.00	8.00	1.20	11.34	35.78	11.77	40.74	12.10	45.09	12.62	52.29	13.04	58.01
0.313	1.75	12.00	1.26	5.40	6.01	5.66	7.06	5.89	8.02	6.30	9.78	6.69	11.40
0.250	4.50	10.00	1.27	12.02	33.78	12.42	38.45	12.75	42.53	13.26	49.30	13.67	54.75
0.250	5.00	9.00	1.27	12.50	39.04	12.94	44.42	13.30	49.13	13.85	56.93	14.28	63.16
0.250	5.50	8.00	1.27	12.79	44.00	13.28	50.08	13.67	55.42	14.26	64.26	14.72	71.27
0.250	5.00	10.00	1.34	13.66	42.28	14.33	48.07	14.50	53.15	15.07	61.56	15.53	68.28
0.250	5.50	9.00	1.34	14.07	47.94	14.58	54.50	14.99	60.27	15.60	69.83	16.09	77.43
0.313	1.75	13.00	1.34	5.85	6.44	6.13	7.57	6.38	8.61	6.82	10.50	7.24	12.25
0.313	2.75	11.00	1.34	8.54	14.31	8.88	16.57	9.16	18.61	9.63	22.14	10.04	25.17
0.250	5.50	10.00	1.41	15.36	51.85	15.89	58.91	16.30	65.11	16.95	75.37	17.46	83.55



APENDICE



TABLAS DE MÓDULOS DE SECCIÓN PARA REFUERZOS MEDIOS, EN TRANSFORMADORES TIPO COLUMNA

TAMAÑO DEL REFUERZO			ESPESOR DE LA PARED DEL TANQUE										
			0.250		0.313		0.375		0.500		0.625		
TK	DP	WD	LBS/IN	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI
0.2500	6.00	9.00	1.41	15.70	57.88	16.27	65.77	16.73	72.72	17.43	84.25	17.96	93.40
0.3125	2.75	12.00	1.43	9.28	15.39	9.64	17.83	9.94	20.02	10.45	23.83	10.89	27.11
0.3125	3.50	11.00	1.48	11.40	23.77	11.83	27.39	12.18	30.63	12.75	36.18	13.22	40.82
0.2500	6.00	10.00	1.48	17.10	62.53	17.70	70.99	18.17	78.44	18.89	90.80	19.45	100.62
0.3125	2.75	13.00	1.52	10.03	16.46	10.41	19.07	10.73	21.42	11.27	25.51	11.74	29.03
0.3125	3.50	12.00	1.57	12.37	25.52	12.83	29.41	13.19	32.89	13.79	38.85	14.30	43.85
0.3125	4.00	11.00	1.57	13.39	31.54	13.89	36.26	14.29	40.48	14.93	47.67	15.46	53.63
0.3125	3.50	13.00	1.65	13.35	27.27	13.82	31.42	14.21	35.13	14.84	41.50	15.38	46.86
0.3125	4.00	12.00	1.65	14.51	33.83	15.03	38.88	15.45	43.40	16.13	51.11	16.68	57.51
0.3125	4.50	11.00	1.65	15.44	40.52	16.01	46.49	16.47	51.83	17.20	60.93	17.78	68.41
0.3125	4.00	13.00	1.74	15.63	36.11	16.18	41.50	16.62	46.31	17.33	54.54	17.91	61.38
0.3125	4.50	12.00	1.74	16.71	43.42	17.31	49.81	17.79	55.52	18.54	65.24	19.15	73.26
0.3125	5.00	11.00	1.74	17.55	50.76	18.21	58.14	18.73	64.75	19.54	76.02	20.18	85.24
0.3125	4.50	13.00	1.83	17.98	46.31	18.60	53.11	19.10	59.18	19.89	69.54	20.54	78.09
0.3125	5.00	12.00	1.83	18.97	54.34	19.65	62.22	20.19	69.28	21.04	81.30	21.71	91.16
0.3125	5.50	11.00	1.83	19.72	62.29	20.46	71.24	21.05	79.28	21.96	92.99	22.67	104.19
0.3125	5.00	13.00	1.92	20.39	57.91	21.09	66.29	21.66	73.78	22.54	86.56	23.25	97.05
0.3125	5.50	12.00	1.92	21.28	66.63	22.05	76.17	22.67	84.74	23.62	99.34	24.36	111.28
0.3125	6.00	11.00	1.92	21.95	75.16	22.78	85.84	23.44	95.47	24.47	111.91	25.25	125.33
0.3125	6.50	10.00	1.92	22.37	83.33	23.27	95.09	23.99	105.76	25.09	124.04	25.92	138.93
0.3125	5.50	13.00	2.01	22.85	70.94	23.65	81.08	24.28	90.17	25.27	105.65	26.04	118.34
0.3125	6.00	12.00	2.01	23.66	80.32	24.52	91.69	25.21	101.93	26.27	119.41	27.08	133.69
0.3125	6.50	11.00	2.01	24.23	89.40	25.16	101.98	25.91	113.35	27.04	132.82	27.91	148.71
0.3750	2.75	15.00	2.01	12.98	19.89	13.53	23.23	13.99	26.30	14.75	31.74	15.41	36.50
0.3125	6.00	13.00	2.10	25.37	85.45	26.27	97.52	26.98	108.37	28.07	126.88	28.92	142.02
0.3125	6.50	12.00	2.10	26.09	95.45	27.05	106.83	27.82	120.91	29.00	141.58	29.89	158.45
0.3125	7.00	11.00	2.10	26.57	105.06	27.60	119.69	28.43	132.98	29.70	155.79	30.65	174.41
0.3750	3.50	15.00	2.17	17.34	33.06	18.02	38.37	18.57	43.21	19.46	51.69	20.20	58.95
0.3125	6.50	13.00	2.18	27.95	101.48	28.95	115.67	29.74	128.45	30.95	150.30	31.88	168.16
0.3125	7.00	12.00	2.18	28.57	112.07	29.64	127.63	30.50	141.72	31.80	165.89	32.78	185.63
0.3125	7.50	11.00	2.18	28.96	122.17	30.11	139.03	31.03	154.40	32.42	180.85	33.47	202.49
0.3750	4.00	15.00	2.28	20.34	43.85	21.11	50.73	21.73	56.99	22.73	67.91	23.54	77.18
0.3125	7.00	13.00	2.27	30.59	119.06	31.69	135.54	32.57	150.44	33.91	175.95	34.93	196.81
0.3125	7.50	12.00	2.27	31.12	130.21	32.30	148.13	33.24	164.41	34.68	192.39	35.76	215.29
0.3125	7.50	13.00	2.36	33.28	138.23	34.49	157.20	35.46	174.39	36.94	203.90	38.05	228.05
0.3125	8.00	12.00	2.36	33.72	149.92	35.01	170.37	36.05	189.00	37.63	221.15	38.81	247.49
0.3750	4.50	15.00	2.38	23.41	56.31	24.28	64.96	24.98	72.83	26.08	86.54	26.97	98.11



APENDICE



TABLAS DE MÓDULOS DE SECCIÓN PARA REFUERZOS MEDIOS, EN TRANSFORMADORES TIPO COLUMNA

TAMAÑO DEL REFUERZO				ESPESOR DE LA PARED DEL TANQUE									
				0.250		0.313		0.375		0.500		0.625	
TK	DP	WD	LBS/IN	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI
0.3750	5.00	14.00	2.38	24.89	66.65	25.83	76.70	26.59	85.88	27.77	101.85	28.70	115.26
0.3125	8.00	13.00	2.45	36.02	159.04	37.36	180.67	38.43	200.33	40.05	234.18	41.26	261.92
0.3750	5.00	15.00	2.49	26.54	70.47	27.52	81.10	28.31	90.78	29.54	107.65	30.51	121.82
0.3750	5.50	14.00	2.49	27.91	81.75	28.97	93.89	29.81	104.98	31.13	124.31	32.15	140.50
0.3750	5.50	15.00	2.59	29.74	86.38	30.84	99.20	31.71	110.90	33.08	131.28	34.14	148.37
0.3750	6.00	14.00	2.59	31.00	98.58	32.18	113.00	33.12	126.20	34.58	149.25	35.70	168.54
0.3750	6.00	15.00	2.70	33.01	104.10	34.22	119.32	35.20	133.24	36.71	157.51	37.07	177.83
0.3750	6.50	14.00	2.70	34.15	117.18	35.46	134.08	36.50	149.60	38.12	176.73	39.35	199.45
0.3750	5.50	15.00	2.81	36.33	123.67	37.68	141.50	38.76	157.84	40.43	168.39	41.70	210.29
0.3750	7.00	14.00	2.81	37.37	137.60	38.81	157.18	39.96	175.21	41.74	206.82	43.06	233.29
0.3750	7.00	15.00	2.91	39.73	145.13	41.21	165.79	42.40	184.76	44.23	217.97	45.62	245.80
0.3750	7.50	14.00	2.91	40.65	159.88	42.23	182.35	43.50	203.10	45.45	239.56	46.92	270.15
0.3750	7.50	15.00	3.02	43.18	168.54	44.81	192.23	46.12	214.04	48.12	252.32	49.63	284.42
0.3750	8.00	14.00	3.02	43.99	184.07	45.72	209.64	47.11	233.31	49.24	275.02	50.84	310.07
0.3750	8.50	13.00	3.02	44.53	199.05	46.34	226.38	47.82	251.83	50.09	296.92	51.78	334.91
0.3750	8.00	15.00	3.12	46.70	193.94	48.48	220.87	49.91	245.74	52.10	289.49	53.74	326.24
0.3750	8.50	14.00	3.12	47.40	210.23	49.27	239.09	50.79	265.88	53.12	313.25	54.86	353.13
0.3750	8.50	15.00	3.23	50.29	221.37	52.21	251.76	53.77	279.90	56.16	329.54	57.94	371.31
0.3750	9.00	14.00	3.23	50.87	238.38	52.90	270.75	54.55	300.88	57.08	354.30	58.97	399.40
0.3750	9.00	15.00	3.34	53.93	250.88	56.02	284.95	57.71	316.57	60.30	372.51	62.23	419.69
0.3750	9.50	14.00	3.34	54.41	268.59	56.60	304.67	58.38	338.35	61.13	398.24	63.17	448.93
0.3750	9.50	15.00	3.44	57.64	282.53	59.89	320.49	61.72	355.81	64.52	418.48	66.61	471.45
0.3750	10.00	15.00	3.55	61.41	316.35	63.83	358.41	65.80	397.66	68.83	467.49	71.08	526.66
0.5000	4.00	21.00	3.81	27.37	64.41	34.38	75.24	36.62	85.35	38.50	103.59	40.02	119.65
0.5000	4.00	22.00	3.95	28.32	67.02	35.56	78.30	38.33	88.81	40.28	107.80	41.85	124.52
0.5000	4.50	21.00	3.95	31.48	82.92	39.43	96.51	42.13	109.18	44.19	132.00	45.84	151.97
0.5000	4.00	23.00	4.09	29.27	69.62	36.74	81.35	40.04	92.27	42.06	112.00	43.69	129.37
0.5000	4.50	22.00	4.09	32.57	86.25	40.78	100.40	44.07	113.58	46.21	137.31	47.91	158.09



APENDICE



TABLAS DE MÓDULOS DE SECCIÓN PARA REFUERZOS MEDIOS, EN TRANSFORMADORES TIPO COLUMNA

TAMAÑO DEL REFUERZO				ESPESOR DE LA PARED DEL TANQUE									
				0.250		0.313		0.375		0.500		0.625	
TK	DP	WD	LBS/IN	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI
0.5000	5.00	21.00	4.09	35.70	103.99	44.58	120.64	47.43	136.16	50.00	164.09	51.78	188.44
0.5000	4.00	24.00	4.23	30.22	72.21	37.92	84.39	41.75	95.72	43.84	116.18	45.52	134.21
0.5000	4.50	23.00	4.23	33.65	89.56	42.12	104.27	46.02	117.97	48.23	142.61	49.99	164.19
0.5000	5.00	22.00	4.23	36.92	108.12	46.09	125.45	49.92	141.60	52.26	170.63	54.10	195.95
0.5000	5.50	21.00	4.23	40.02	127.67	49.82	147.68	53.44	166.35	55.92	199.93	57.85	229.14
0.5000	4.50	24.00	4.38	34.73	92.87	43.46	108.14	47.97	122.35	50.25	147.90	52.06	170.28
0.5000	5.00	23.00	4.38	38.13	112.23	47.60	130.26	52.11	147.03	54.52	177.16	56.42	203.45
0.5000	5.50	22.00	4.38	41.37	132.69	51.50	153.53	55.87	172.94	58.42	207.83	60.41	238.19
0.5000	6.00	21.00	4.38	44.44	154.03	55.16	177.71	59.24	199.81	61.95	239.58	64.04	274.15
0.5000	5.00	24.00	4.52	39.34	116.34	49.10	135.05	54.30	152.44	56.78	183.68	58.74	210.92
0.5000	5.50	23.00	4.52	42.72	137.70	53.17	159.36	58.29	179.52	60.92	215.72	62.97	247.21
0.5000	6.00	22.00	4.52	45.92	160.04	57.00	184.68	61.91	207.66	64.69	248.98	66.84	284.87
0.5000	6.50	21.00	4.52	48.95	183.15	60.58	210.77	65.14	236.61	68.09	283.13	70.35	323.54
0.5000	5.50	24.00	4.66	44.06	142.70	54.84	165.18	60.72	186.08	63.43	223.58	65.53	256.21
0.5000	6.00	23.00	4.66	47.40	166.03	58.83	191.64	64.57	215.50	67.44	258.34	69.65	295.56
0.5000	6.50	22.00	4.66	50.57	190.22	62.59	218.98	68.04	245.83	71.07	294.13	73.39	336.08
0.5000	7.00	21.00	4.66	53.56	215.07	66.09	246.95	71.13	276.80	74.33	330.62	76.78	377.40
0.5000	6.00	24.00	4.80	48.87	172.00	60.66	198.59	67.24	223.32	70.18	267.69	72.45	306.23
0.5000	6.50	23.00	4.80	52.18	197.28	64.59	227.17	70.95	255.04	74.06	305.11	76.44	348.58
0.5000	7.00	22.00	4.80	55.31	223.31	68.26	256.49	74.27	287.51	77.56	343.36	80.07	391.88
0.5000	7.50	21.00	4.80	58.26	249.87	71.69	286.29	77.21	320.45	80.68	382.14	83.32	435.78
0.5000	6.50	24.00	4.94	53.79	204.32	66.58	235.34	73.86	264.22	77.04	316.07	79.49	361.06
0.5000	7.00	23.00	4.94	57.06	231.53	70.43	266.00	77.42	298.19	80.78	356.08	83.35	406.34
0.5000	7.50	22.00	4.94	60.15	259.36	74.03	297.26	80.59	332.75	84.15	396.75	86.85	452.36
0.5000	8.00	21.00	4.94	63.06	287.61	77.38	328.86	83.38	367.62	87.14	437.74	89.98	498.78
0.5000	7.00	24.00	5.08	58.80	239.72	72.59	275.50	80.56	308.85	84.01	368.77	86.64	420.76
0.5000	7.50	23.00	5.08	62.04	268.82	76.37	308.21	83.97	345.02	87.62	411.33	90.38	468.91
0.5000	8.00	22.00	5.08	65.09	298.44	79.89	341.37	87.00	381.63	90.84	454.34	93.75	517.60
0.5000	8.50	21.00	5.08	67.96	328.35	83.16	374.73	89.64	418.38	93.70	497.50	96.76	566.47
0.5000	9.00	24.00	5.23	63.91	278.27	78.69	319.13	87.36	357.28	91.09	425.88	93.92	485.42
0.5000	8.00	23.00	5.23	67.11	309.24	82.39	353.84	90.62	395.60	94.55	470.91	97.53	536.37
0.5000	8.50	22.00	5.23	70.12	340.62	85.84	388.87	93.50	434.20	97.64	516.22	100.77	587.65
0.5000	9.00	21.00	5.23	72.94	372.17	89.02	423.96	95.99	472.79	100.36	561.47	103.64	638.92
0.5000	8.00	24.00	5.37	69.12	320.02	84.89	366.29	94.24	409.55	98.26	487.45	101.30	555.11
0.5000	8.50	23.00	5.37	72.28	352.84	88.50	402.97	97.36	449.98	101.59	534.90	104.79	608.79
0.5000	9.00	22.00	5.37	75.24	385.95	91.87	439.83	100.06	490.53	104.54	582.44	107.90	662.61
0.5000	9.50	21.00	5.37	78.02	419.11	94.97	476.60	102.43	530.91	107.12	629.73	110.64	716.19
0.5000	8.50	24.00	5.51	74.42	365.04	91.17	417.05	101.22	465.74	105.54	553.55	106.80	629.90
0.5000	9.00	23.00	5.51	77.54	399.69	94.71	455.66	104.18	508.23	108.73	603.36	112.16	686.26
0.5000	9.50	22.00	5.51	80.46	434.50	97.99	494.31	106.76	550.68	111.54	653.07	115.14	742.53



TABLAS DE MÓDULOS DE SECCIÓN PARA REFUERZOS MEDIOS, PARA TRANSFORMADORES TIPO COLUMNA

TAMAÑO DEL REFUERZO				ESPESOR DE LA PARED DEL TANQUE									
				0.250		0.313		0.375		0.500		0.625	
TK	DP	WD	LBS/IN	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI	SM	MI
0.5000	10.00	21.00	5.51	83.19	469.25	101.01	532.73	108.96	592.80	113.98	702.35	117.75	798.38
0.5000	9.00	24.00	5.65	79.82	413.41	97.53	471.47	108.28	525.91	112.93	624.26	116.42	709.86
0.5000	9.50	23.00	5.65	82.89	449.86	101.00	511.97	111.10	570.41	115.97	676.36	119.64	768.83
0.5000	10.00	22.00	5.65	85.77	486.34	104.20	552.37	113.53	614.71	118.64	728.18	122.49	827.50
0.5000	10.50	21.00	5.65	88.46	522.65	107.13	592.40	115.57	658.52	120.94	779.38	124.97	885.54
0.5000	11.00	20.00	5.65	90.94	558.54	109.80	631.81	117.25	701.56	122.86	829.65	127.08	942.58
0.5000	9.50	24.00	5.79	85.32	465.17	103.99	529.61	115.44	590.11	120.41	699.62	124.14	795.06
0.5000	10.00	23.00	5.79	88.34	503.40	107.37	571.97	118.10	636.58	123.32	753.97	127.23	856.58
0.5000	10.50	22.00	5.79	91.18	541.53	110.49	614.07	120.38	682.69	125.85	807.83	129.95	917.59
0.5000	11.00	21.00	5.79	93.81	579.37	113.35	655.67	122.28	728.15	128.00	860.90	132.30	977.75
0.5000	11.50	20.00	5.79	96.24	616.66	115.93	696.51	123.80	772.67	129.77	912.84	134.28	1036.71
0.5000	10.00	24.00	5.93	90.90	520.40	110.54	591.53	122.68	658.42	127.99	779.72	131.98	885.61
0.5000	10.50	23.00	5.93	93.88	560.37	113.84	635.71	125.19	706.81	130.76	836.24	134.94	949.58
0.5000	11.00	22.00	5.93	96.67	600.14	116.87	679.49	127.32	754.68	133.14	892.10	137.52	1012.86
0.5000	11.50	21.00	5.93	99.25	639.47	119.64	722.62	129.07	801.73	135.16	946.97	139.74	1075.08
0.5000	12.00	20.00	5.93	101.63	678.14	122.14	764.84	130.44	847.70	136.79	1000.52	141.58	1135.90
0.5000	12.50	19.00	5.93	103.80	715.92	124.36	805.90	131.45	892.29	138.05	1052.45	143.05	1194.96
0.5000	10.50	24.00	6.07	96.58	579.17	117.17	657.30	130.00	730.90	135.67	864.61	139.93	981.53
0.5000	11.00	23.00	6.07	99.52	620.86	120.39	703.25	132.36	781.16	138.30	923.25	142.75	1047.92
0.5000	11.50	22.00	6.07	102.26	662.22	123.34	748.67	134.35	830.73	140.54	981.04	145.20	1113.39
0.5000	12.00	21.00	6.07	104.79	703.03	126.02	793.30	135.95	879.34	142.41	1037.65	147.28	1177.61
0.5000	12.50	20.00	6.07	107.11	743.05	128.43	836.87	137.18	926.70	143.90	1092.76	148.99	1240.21
0.5000	11.00	24.00	6.22	102.36	641.52	123.89	726.97	137.42	807.60	143.45	954.36	147.98	1082.92
0.5000	11.50	23.00	6.22	105.24	684.91	127.03	774.67	139.63	859.69	145.94	1015.06	150.67	1151.64
0.5000	12.00	22.00	6.22	107.93	727.84	129.90	821.69	141.46	910.93	148.04	1074.72	152.99	1219.25
0.5000	12.50	21.00	6.22	110.41	770.09	132.49	867.77	142.91	961.04	149.76	1133.01	154.93	1285.40
0.5000	11.50	24.00	6.36	108.22	707.54	130.70	800.62	144.92	888.60	151.33	1049.03	156.14	1189.84
0.5000	12.00	23.00	6.36	111.06	752.59	133.75	850.02	146.98	942.46	153.67	1111.73	158.70	1260.84
0.5000	12.50	22.00	6.36	113.70	797.06	136.54	898.60	148.66	995.32	155.63	1173.20	160.88	1330.52
0.5000	12.00	24.00	6.50	114.18	777.27	137.60	878.31	152.50	973.95	159.31	1148.70	164.41	1302.37
0.5000	12.50	23.00	6.50	116.97	823.96	140.57	929.37	154.42	1029.54	161.51	1213.33	166.83	1375.57
0.5000	12.50	24.00	6.64	120.23	850.79	144.58	960.09	160.18	1063.71	167.38	1253.42	172.79	1420.58

TK = Espesor del refuerzo

DP = Profundidad

WD = Ancho

SM = Módulo de Sección

MI = Momento de inercia

LBS / IN = Peso del refuerzo / Pulgadas lineales



Haugen E. B., *Probabilistic Approaches to Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968.

Jones, Christopher. *Metodos de Diseño 3a Ed.*, Gustavo Gili, Barcelona, 1992.

Nessler, Herbert. *Constitución y Funcionamiento del Transformador*, Barcelona, Marcombo; Berlín, Siemens-Aktiengesellschaft, 1988.

Norton L., Robert. *Diseño de Máquinas*, México, Prentice Hall-Hispanoamerica, 1999.

Pahl G. And Beitz W. *Engineering Design. A Systematic approach. Second Edition*, Springer.

Pansini, Anthony J. *Electrical Transformers and Power Equipment 3a. Ed.*, Georgia, Fairmont, 1999.

Patrick Shultz, George. *Transformers and Motors: A single-source Reference for Electricians*, Indianapolis, Howard W. Sams, 1989.

Peterson R. E., *Stress-Concentration Design Factors*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1974.

Roberto Meli, *Structural Design of Masonary Buildings, The Mexican Practice in Masonary in the Americas*, ACI Special Publication SP-147, Detroit, 1994.

Shigley, Joseph E. *Diseño en Ingeniería Mecánica*, México, Mc Graw Hill, 2002.

Smith C.O., *Engineering Design*, NBS Special Publication 487, pp. 1-15, August 1977

Visodic J. P., *Design Stress Factors*, Proc. ASME, vol. 55, mayo de 1948.



Wilson I.G. and Wilson M. E., *From Idea to Working Model*, Wiley-Interscience, New York, 1970

Zahavi E., *The finite Element Method in Machine Design*. Prentice Hall, New Jersey, 1992.

Códigos y Normas

ANSI-ASTM B483-78 Resistencias Minimas para aceros ASTM

Especificaciones AISC para el diseño, fabricación y construcción de estructuras de acero para la construcción. (AISC Specifications for the Design, Fabrication, and Erection of Structural Steel for Building).

AISC. Code of Standard Practice for Steel Buildings and Bridges.

NMX-J-284-ANCE Productos Eléctricos-Transformadores-Transformadores de Potencia- Especificaciones

ANSI C57.12.00 Requisitos Generales para Transformadores de Distribución, Potencia y Regulación, Sumergidos en Aceite

INTERNET

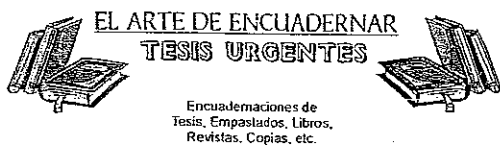
<http://www.condumex.com.mx>

<http://www.cfe.gob.mx/subdis/internet.htm>

<http://www.texaco.com>

<http://www.abb.com>

<http://www.siemens.com>



Encuadernaciones de
Tesis, Empastados, Libros,
Revistas, Copias, etc.

Av. Instituto Politécnico Nacional
N° 1891 Col. Lindavista
Tel: 10-89-05-07

Hda. Zotoluca #9 Col. Impulsora
Tel: 57-12-00-55
Nextel: 10-89-05-06