



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN

“ANÁLISIS DE ESFUERZOS PRESENTADOS DURANTE EL
TRASLADO A SITIO DE TRANSFORMADORES DE
POTENCIA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
INGENIERIA MECANICA
P R E S E N T A:
DOMÍNGUEZ PÉREZ JOSÉ ANTONIO

ASESOR: ING. RAÚL CRUZ ARRIETA

MÉXICO

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

A MIS PADRES

Gracia, por su apoyo y confianza que depositaron en mí, para este logro que no es mío sino de ustedes.

A MIS HERMANOS

Quiero decirles que todos los sueños se pueden hacer realidad con esfuerzo, trabajo y dedicación. Así mismo que siempre podrán contar con migo, GRACIAS.

Ing. Jorge Domínguez Campa, Ing. Mauricio Bulanda Mejía
Gracias, por todo el apoyo que me brindaron en cada etapa de mi carrera y vida en general.

JUSTIFICACION

La principal justificación que puede tener la realización de un trabajo como este es el demostrar como los conceptos teóricos que se ven en las aulas, son empleados en casos prácticos, y al ser este trabajo un ejemplo de aplicación bastante practico, también sirva de antecedente para algún profesionista o estudiante interesado en el tema.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo, es el de mostrar como se realiza un análisis de esfuerzos a los que son sometidos los transformadores de potencia durante su traslado al lugar donde serán instalados, al mismo tiempo pretendo explicar porque es requerido un estudio de este tipo en aparatos que llegan a costar millones de dolares. .

ÍNDICE

JUSTIFICACIÓN	1
OBJETIVO	2
ÍNDICE	3
INTRODUCCIÓN	5
1._ HISTORIA DEL ARTE DE LOS TRANSFORMADORES	8
1.1 BREVE HISTORIA DE LA ELECTRICIDAD	9
1.2 PRINCIPIO ELEMENTAL DEL TRANSFORMADOR.....	14
1.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	15
1.3 LEYE DE FARADAY	26
1.3.1 LEY DE OERSTED	28
1.3.2 LEY DE BIOT – SAVART	29
2.- COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA	30
2.1 NÚCLEO	31
2.2 DEVANADOS	33
2.3 AISLAMIENTOS	36
2.4 TANQUE	37
2.5 ACCESORIOS	39

3._ PROCEDIMIENTO DE EMBARQUE DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA	46
3.1 ACELERACIONES CRITICAS PARA EMBARQUE	47
3.2 PROCEDIMIENTO PARA PRUEBA DE PRESIÓN TRANSFORMADORES	51
3.3 DESMANTELADO	52
3.4 EMBARQUE	56
4._ ANÁLISIS DE LA REGIDEZ MECÁNICA DE UN TRANSFORMADOR	66
4.1 ANÁLISIS INTERNO ENSAMBLE NÚCLEO-BOBINAS	68
4.2 FLEXIÓN EN BASTIDORES	72
4.3 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD	76
4.4 DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA NATURAL	82
4.5 ANÁLISIS EXTERNO DEL TRANSFORMADOR	99
4.6 ANÁLISIS DEL TANQUE	111

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCION

El diseño esta relacionado con la calidad del producto ya que este no solo depende de lo que se produce; también obedece al diseño de los sistemas que se requieren para producir tales bienes o servicios, mejorar la calidad a través del diseño no significa mayores costos, en general son dos los factores que rigen la calidad del diseño el primero es el mercado en el cual la organización intenta competir. El segundo punto que influyen en el diseño se basa, en lo que realiza la competencia directa, una calidad inferior a la que un competidor esta ofreciendo por el mismo precio tendrá como resultado menos compras repetitivas.

Todas y cada una de las partes antes mencionadas son importantes y trascendentales para que un producto diseñado funcione en perfectas condiciones. En si refiriéndose al punto en el cual involucra a la transportación del producto terminado, se vuelve en ocasiones un problema de gran magnitud cuando el producto es de grandes dimensiones tanto físicamente como en condiciones de peso o lo que sería masa.

Por lo cual es importante conocer los diferentes medios existentes de transportación de productos saber cual es el mas adecuado para el producto que se esta generando, cual medio de transporte da mayor seguridad física al producto la selección de un buen medio de transportación dependerá de muchos factores como son la geografía asia donde se transportara el producto, las rutas necesarias para poder llegar al destino

ANÁLISIS DE ESFUERZOS PRESENTADOS DURANTE EL TRASLADO A SITIO DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

final, además si es necesario implementar nuevas ruta para poder llegar hasta hay o hacer modificaciones a las rutas existentes. Por lo cual una adecuada selección del medio de transportación nos proporciona una mayor calidad para el producto que se esta fabricando.

Por lo tanto la transportación de cualquier producto es un aspecto importante que se debe tomar en cuenta desde el diseño de este, durante el transcurso del traslado de un producto desde su lugar de ensamble o sea desde la fabrica manufacturera hacia su destino final se generan fuerzas, totalmente independientes a las fuerzas producidas durante el funcionamiento propio del equipo o producto diseñado; en la mayoría de los casos no son tomadas en cuenta estas fuerzas de transportación en el diseño del producto debido a que las dimensiones de este tanto físicas como en masa son relativamente pequeñas por lo tanto como se vera en este trabajo la fuerza transmitida durante la transportación esta directamente relacionada con la masa del producto transportado y en este caso que se presenta donde el producto es relativamente pequeño las fuerzas en este caso son de igual forma pequeñas o incluso se pueden implementar diferentes métodos para lograr mantener estas fuerzas de magnitudes pequeñas y por lo tanto despreciar estas fuerzas en el diseño del producto. Uno de estos métodos utilizados es el implemento de amortiguadores durante la transportación.

El presente trabajo lo he estructurado de la siguiente manera:

ANÁLISIS DE ESFUERZOS PRESENTADOS DURANTE EL TRASLADO A SITIO DE UN
TRANSFORMADOR DE POTENCIA

En el capítulo uno encontraremos los antecedentes históricos y conceptos que permitirán entender parte de los capítulos siguientes..

En el capítulo dos se describen los elementos fundamentales que forman un transformador, con la finalidad de familiarizarse con los mismos y entender a de que se habla cuando sean mencionados posteriormente.

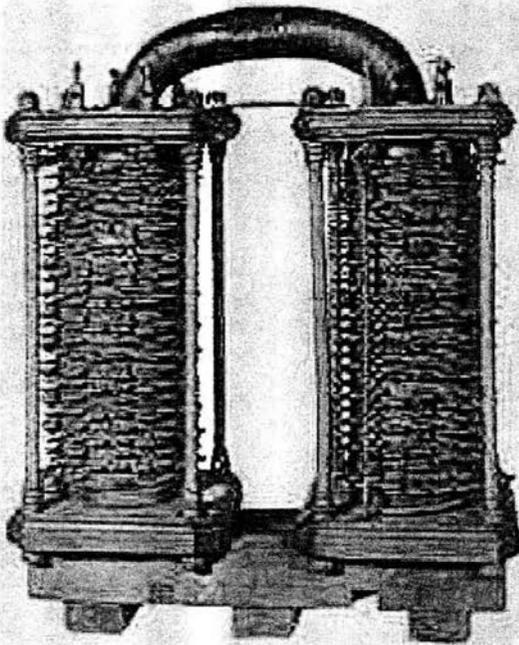
En el capítulo tres introduce al capítulo cuatro, en este capítulo se describen los procedimientos a seguir para embarcar una unidad

En el capítulo cuatro se describe como se calcula la rigidez mecánica de un transformador, para analizar las fuerzas que se producen durante el transporte de los transformadores.

Finalmente expreso mis conclusiones con unas observaciones muy particulares del presente trabajo

CAPITULO 1

Westinghouse transformer firsts



first core-form transformer

HISTORIA DEL ARTE DE LOS
TRANSFORMADORES

1.1 BREVE HISTORIA DE LA ELECTRICIDAD

600 AC - ELECTRICIDAD ESTÁTICA

Alrededor de esta fecha TALES DE MILETUS (630-550 AC) descubre la electricidad estática, que al frotar el ámbar, este posee la propiedad de atraer algunos objetos.

310 AC - PRIMER TRATADO DE ELECTRICIDAD

El filósofo Griego THEOPHRASTUS (374-287 AC) escribe el primer tratado donde se establece que existen varias sustancias, aparte del ámbar, que poseen la propiedad de atraer objetos al ser frotadas. Así deja constancia, sobre el primer estudio científico sobre la electricidad

1600 - ESTUDIOS SOBRE ELECTROSTÁTICA Y MAGNETISMO

El Físico Real Willian Gilbert (1544-1603) estudio los imanes para mejorar la exactitud de las Brújulas usadas en la navegación, siendo éste trabajo la base principal para la definición de los fundamentos de la Electrostática y Magnetismo. El Físico Real Willian Gilbert fue el primero en aplicar el término Electricidad del Griego "elektron" que significa ámbar. El Gilbert es la unidad de medida de la fuerza magneto motriz.

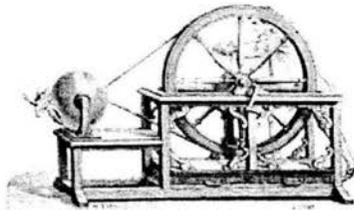
1670 - TEORIA ONDULATORIA DE LA LUZ

El científico alemán Huygens describe la teoría de ondas de la luz.

Demostró que las leyes de la reflexión y de la refracción podían explicarse perfectamente según la teoría ondulatoria.

1672 - MAQUINA ELECTROSTÁTICA

El Físico Alemán Otto von Guericke (1602-1686) desarrolló la primera máquina electrostática capaz de producir cargas eléctricas. Máquina que consiste de una esfera de azufre torneada, con una manija a través de la cual, la carga es inducida al posar la mano sobre la esfera.



1.1.1 FIGURA MAQUINA ELECTROSTÁTICA

1673 - DESCUBRIMIENTO DE LAS POLARIDADES DE LAS CARGAS ELECTRICAS

El Francés Francois de Cisternay Du Fay fue el primero en identificar la existencia de dos cargas eléctricas:

Positiva (+)

Negativa (-)

1745 – DESCUBRIMIENTO DEL EFECTO VOLTA

Alessandro Volta. (1745 - 1827) Físico italiano, descubrió accidentalmente el efecto volta, que lleva en su honor dicho nombre, además de permitirle

construir una pila eléctrica. La Tensión de Volta es la diferencia de potencial existente en la superficie de contacto de dos metales distintos.

1745 – DESCUBRIMIENTO DEL CONDENSADOR ELÉCTRICO

Se desarrolla lo que daría paso al Condensador Eléctrico, la botella de Leyden por E. G. Von Kleist y Pieter Van Musschenbroeck (1692-1761) en la Universidad de Leyden, con esta botella se almacenó por primera vez electricidad estática. La botella de Leyden es un condensador eléctrico de capacidad fija constituido por una botella de vidrio en la que dicho material desempeña el papel de dieléctrico y los electrodos, de papel de estaño, están colocados dentro y fuera de la botella.



1.1.2 FIGURA BOTELLA DE LEYDEN

1800 - PILA ELÉCTRICA

Alessandro Volta inventa la primer pila gracias a los estudios realizados sobre la diferencia de potencial existente en la superficie de contacto de dos metales distintos. Este fenómeno (efecto Volta) se aprovecha para producir corriente eléctrica por medio de una pila construida de placas de cinc y cobre

intercaladas con tela empapada en salmuera. Al abrir una ranas muertas durante una clase de anatomía, un alumno vio como se movía. Volta demostró que el bisturí de acero y la bancada de zinc donde estaban apoyadas las ranas, formaban una pila rudimentaria cuya corriente causaba la contracción de los músculos de la rana.



FIGURA 1.1.3 Pila de VOLTA

1821 - MOTOR ELECTRICO RUDIMENTARIO

Michael Faraday (1745 - 1827) científico ingles, ideo un ingenio en el cual un alambre con corriente giraba alrededor de un imán; transformaba pues la electricidad en movimiento mecánico.



FIGURA 1.1.4 Motor eléctrico de FARADAY

1831 - MOTOR ELÉCTRICO FUNCIONAL

El científico norteamericano, Joshep Henry fabrico el primer motor eléctrico funcional que utilizaba la corriente de una pila

1831 – CREACIÓN DEL DINAMO

En este año, el científico ingles Michael Faraday llevo a cabo experimentos que demostraron que un imán en movimiento inducía una corriente en un alambre. Había demostrado que se podía producir electricidad sin sustancias químicas. Anteriormente a esta fecha, la única fuente de donde se podía obtener energía eléctrica era de una pila. Los principios esbozados por Faraday, llevaron a la invención del dinamo.

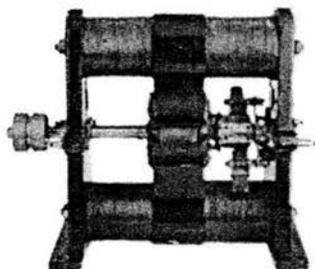


FIGURA 1.1.5 Dinamo de FARADAY

1831 – PRINCIPIO DEL TRANSFORMADOR

En este año, el científico ingles Michael Faraday en sus experimentos con electricidad, enrolló dos bobinas de alambre en un anillo de hierro. Cuando conectaba una bobina a una pila, pasaba una corriente por la otra (no conectada).

Al desconectarla, se generaba otro impulso en la segunda bobina. Habiéndose inventado el transformador.

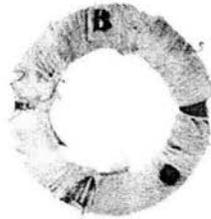


FIGURA 1.1.6 Anillo de FARADAY

1.2. PRINCIPIO ELEMENTAL DEL TRANSFORMADOR

Es un dispositivo eléctrico, estático, que mediante un acoplamiento magnético, transfiere energía eléctrica de un circuito de corriente alterna a otro, a la misma frecuencia, pero usualmente modificando sus valores de voltaje y corriente, ya sea para elevar o para reducir estos valores. Se define también como una máquina eléctrica estática de inducción en la cual la energía eléctrica es transformada en sus factores de tensión (voltaje), e intensidad (corriente). Esta máquina tiene dos componentes principales, que son un circuito eléctrico y un circuito magnético. En su forma más simple, el circuito eléctrico está integrado por dos bobinas o devanados, aislados eléctricamente, uno que recibe la energía de la fuente y se denomina PRIMARIO y otro que entrega la energía ya modificada y se denomina SECUNDARIO. El circuito magnético lo forma un NÚCLEO de acero laminado que enlaza ambos devanados. Para

explicar este fenómeno, se considera un transformador elemental compuesto por una parte eléctrica y una parte magnética, como se ilustra en la figura 1.

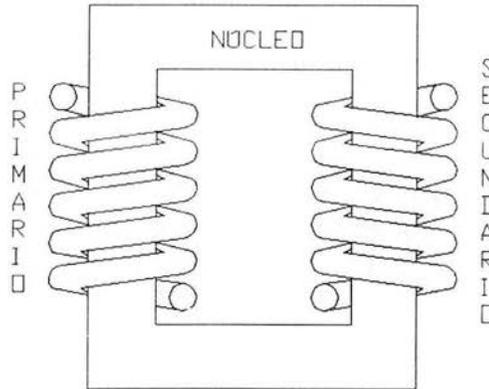


FIGURA 1.2.1 Transformador simplificado

1.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

Al aplicar un voltaje alterno V_1 al devanado primario, circula por este una corriente I_1 que engendra un flujo magnético alterno Φ . Este flujo, viajando a través del núcleo, enlaza al devanado secundario induciendo en este un voltaje V_2 que puede ser aprovechado conectándole una carga que demandara una corriente I_2 . El voltaje inducido guarda una relación directa con el número de vueltas del devanado, esto es, si en el secundario tenemos más vueltas que en el primario, estaremos elevando el voltaje y si por el contrario tenemos menos vueltas en el secundario que en el primario, estaremos reduciendo el voltaje. A esta se le llama relación de transformación. En la figura 2 se aprecia el desarrollo que presenta el funcionamiento del transformador.

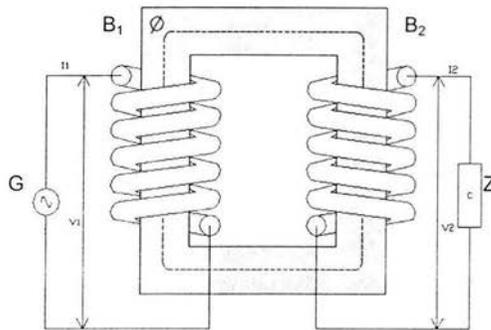


FIGURA 1.2.2 Principio de funcionamiento

Para fines de explicación del funcionamiento del transformador, se considera los devanados primario y secundario colocados separadamente, uno a cada extremo del núcleo. Sin embargo, en un transformador real, los devanados primario y secundario son contruidos o ensamblados uno dentro del otro para aprovechar al máximo el flujo magnético. La figura. 3 muestra un esquema de un arreglo real de devanados y núcleo.

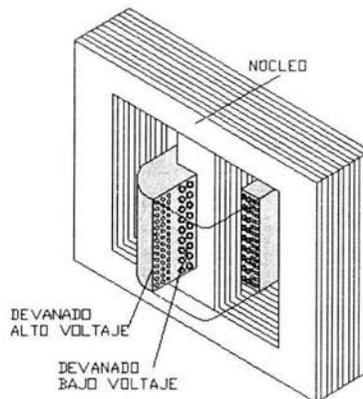


FIGURA 1.2.3 Transformador real

Y bien se incluyen bajo la denominación general de transformador aquellos dispositivos estáticos, es decir, sin partes móviles, destinados a transferir energía eléctrica de un circuito a otro, siendo el enlace común entre ambos circuitos, un flujo magnético común.

El transformador no es, propiamente, una maquina eléctrica, pues el concepto «maquina» presupone siempre órganos en movimiento y el transformador es, como se ha explicado, un dispositivo estático.

Además, en las maquinas eléctricas, o bien hay una conversión de energía eléctrica en energía mecánica (motores) o conversión de energía mecánica en energía eléctrica (generadores); es decir, que siempre existe cambio de energía de una clase, en energía de otra clase diferente. Por el contrario, en los transformadores solamente se modifica energía eléctrica de unas características determinadas de tensión y corriente en energía, también eléctrica, pero de diferentes características de tensión y corriente.

En su forma mas sencilla, como se presenta en la figura 2 un transformador, esta constituido por un circuito magnético, formado por chapas apiladas de material ferromagnético, sobre el que se arrollan dos bobinas B1 y B2. Si conectamos la bobina B1 a los terminales de un generador de corriente alterna G y cerramos el circuito de la bobina B2 mediante una impedancia Z, la bobina B1 actúa como una inductancia que, al ser atravesada por la corriente procedente del generador G produce un flujo alterno que circula por el circuito magnético, induciendo una fuerza electromotriz en la bobina B2, de la misma frecuencia que la tensión aplicada a la bobina B1; como consecuencia, por el circuito eléctrico constituido por B2 y Z, pasa una corriente.

Es decir que, por inducción mutua, o sea por medio de un flujo magnético una potencia alterna pasa de un circuito eléctrico a otro circuito eléctrico, separado del primero. Como, solamente un flujo variable puede producir una fuerza electromotriz inducida y el transformador no tiene partes móviles, se deduce fácilmente que el transformador solamente puede funcionar con corriente alterna, ya que la corriente alterna es la que produce el flujo magnético alterno necesario para el funcionamiento del transformador.

A la bobina B1 que actúa como generadora del flujo se le llama arrollamiento primario o, también, devanado primario; la bobina B2 que actúa como receptora del flujo se denomina arrollamiento secundario o devanado secundario. El circuito eléctrico constituido por el generador y el arrollamiento primario, es el circuito primario o, mas sencillamente, primario del transformador; de la misma forma, el circuito eléctrico constituido por el arrollamiento secundario y la carga, es el circuito secundario o, abreviadamente, secundario del transformador.

Se llamara tensión primaria y corriente primaria, a la tensión aplicada al primario y a la corriente que atraviesa dicho circuito; y tensión secundaria y corriente secundaria a la tensión que aparece entre los bornes del secundario y a la corriente que atraviesa este circuito cuando se le conecta una carga.

Por lo general, los valores de las tensiones primaria y secundaria son diferentes y también se establece una distinción entre los devanados correspondientes, designándolos como devanado de alta tensión y devanado de baja tensión, respectivamente, sin precisar los valores absolutos de la tensión. Incluso ambos

devanados pueden ser considerandos de una forma absoluta, de alta tensión como sucede, por ejemplo, en un transformador cuya tensión primaria sea 220 kV y la tensión secundaria sea de 15 kV; también puede suceder que ambos devanados sean de baja tensión, por ejemplo en un transformador para timbres cuya tensión primaria sea de 220 V y la tensión secundaria de 12 V.

En ambos ejemplos, el devanado de alta tensión es al que corresponde la tensión mas alta (220 kV en el primer ejemplo y 220 V en el segundo), mientras que el devanado de baja tensión es el de tensión mas baja (15 kV en el primer ejemplo y 12 V en el segundo).

Cuando el devanado primario es también el devanado de alta tensión, se trata de un transformador reductor, es decir, que reduce la tensión; por el contrario, si el devanado primario es el devanado de baja tensión, se trata de un transformador elevador ya que la tensión de utilización en el secundario; es mas elevada que la tensión primaria.

El principio del transformador se ha dicho que esta basado en la inducción de un devanado a otro, por medio de un campo magnético, con gran eficiencia del orden del 98 %. La fuerza electromotriz se induce de un devanado a otro por la variación de flujo magnético que se origina en el primer devanado, Comparando un transformador con un alternador tenemos que en el alternador el inducido y el campo tiene movimiento relativo, en cambio en el transformador el flujo en el inductor cambia de sentido y refleja el cambio en el devanado inducido.

En el transformador las espiras y el material magnético están en reposo y la fuerza electromotriz se induce por la variación de la magnitud en el tiempo. El núcleo esta formado por hojas de laminas de hierro, combinado al silicio al 4% ensambladas, el silicio mejora sus propiedades magnéticas, los conceptos devanado primario y secundario son relativos. Se puede afirmar que un transformador transmite potencia eléctrica de un devanado a otro o sea potencia eléctrica a potencia eléctrica cambiando solo el valor de los parámetros que la componen.

En la figura 4 se representan dos circuitos enrollados alrededor de un núcleo de hierro colado, el circuito primario consiste de una bobina enrollada en el núcleo, una batería y un interruptor. El circuito secundario consiste de una bobina enrollada en el núcleo (ordinariamente con un mayor numero de espiras que el del circuito primario), una resistencia y un galvanómetro. Tanto al abrir como al cerrar el circuito primario, el galvanómetro del secundario acusa el paso de una corriente primero en un sentido y después en sentido contrario.

En el esquema (B) de la figura 4 se ha representado un transformador constituido por el núcleo en forma de anillo con dos enrollamientos: el primario con pocas espiras y el secundario con un gran número de espiras. Si al carrete primario se hace llegar una corriente alterna, se genera en el secundario otra corriente alterna inducida de la misma frecuencia que la corriente inductora. La corriente inducida en el secundario tiene menor intensidad que la del primario pero mayor voltaje.

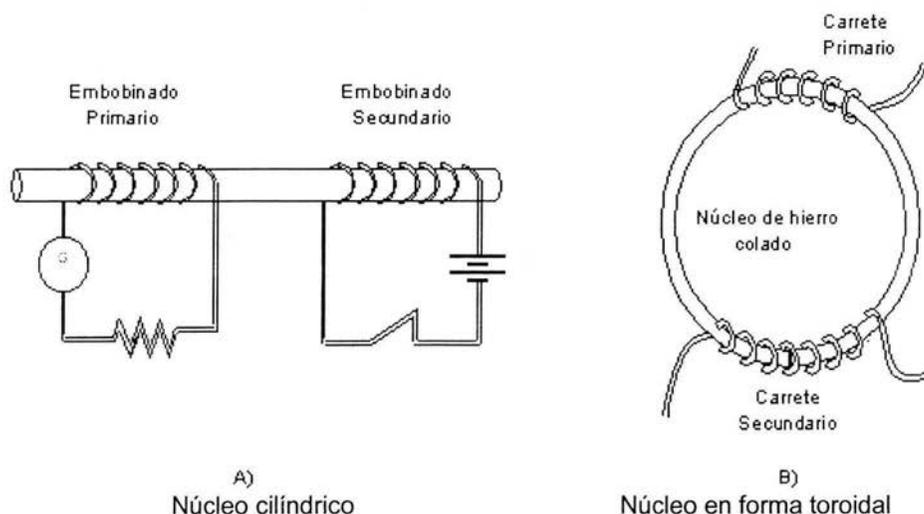


FIGURA 1.2.4 Representación del principio fundamental del transformador

Si se considera dos bobinas puestas una al lado de otra, como se muestra en la figura 5. Una de ellas está conectada a una batería y la otra a un galvanómetro. Se acostumbra llamar primario circuito de entrada o sea a la bobina conectada a la fuente de energía, y secundario al circuito de salida o sea a la bobina no conectada a la fuente de energía y que puede estar conectada a cualquier otro aparato.

Tan pronto como se cierra el interruptor del primario y pasa corriente por su bobina, también se genera una corriente en el secundario, no obstante que no existe una conexión material entre ambas bobinas. Sin embargo, en el secundario sólo se produce una breve oleada de corriente. Después, cuando se abre el interruptor del primario, se registra una vez más una oleada de corriente en el secundario, aunque en sentido opuesto.

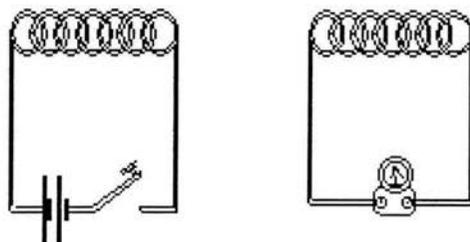


FIGURA 1.2.5 El primario, induce un voltaje en el circuito secundario

La explicación es que el campo magnético que se establece alrededor de la bobina primaria se extiende hasta la secundaria. El secundario, que está cerca, percibe los cambios en el campo magnético del primario. Estos cambios de intensidad de campo magnético en el secundario inducen un voltaje en el secundario, de acuerdo con la ley de Faraday. Si colocamos un núcleo de hierro en el interior de las bobinas primaria y secundaria del montaje que se muestra en la figura 1.2.5, la alineación de los dominios magnéticos del hierro intensifica el campo magnético dentro del primario.

El campo magnético se concentra también en el núcleo, que llega hasta el secundario, así que el secundario intercepta una mayor proporción del cambio que experimenta el campo, el galvanómetro muestra oleadas más grandes de corriente cuando se abre o se cierra el interruptor del primario.

Se supone que, en vez de producir el cambio en el campo magnético abriendo y cerrando un interruptor, se usa una corriente alterna para alimentar el primario. En tal caso el ritmo de cambio del campo magnético en el primario y por tanto en el

secundario es igual a la frecuencia de la corriente alterna. Se tiene entonces un transformador como se puede representar en la figura 1.2.6.

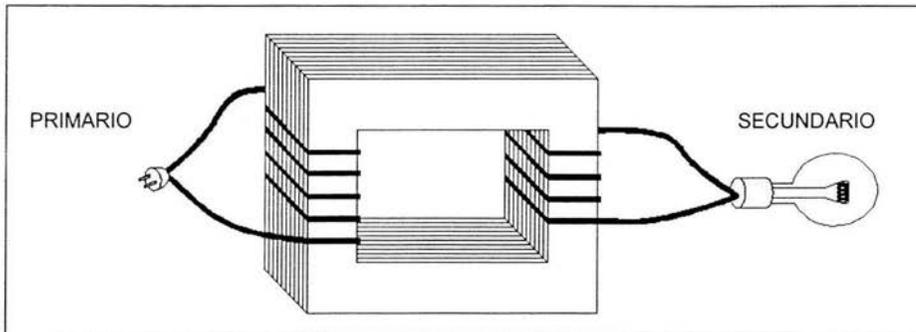


FIGURA 1.2.6 Núcleo tipo circuito cerrado

En la figura 1.2.6 se muestra un montaje más eficiente, donde el núcleo de hierro forma un circuito cerrado para guiar a todas las líneas de campo magnético a través del secundario. El secundario intercepta todas las líneas de campo magnético del interior del primario.

Como se ha mencionado un transformador permite elevar o reducir voltajes. Para entender cómo lo hace, se considera el caso simple que se muestra en el dibujo (a) de la figura 1.2.7. Suponemos que el primario consiste en una espira conectada a una fuente alterna de 1 V, se considera la disposición simétrica de un secundario de una espira que intercepta todas las líneas de campo magnético cambiantes del primario. En estas condiciones se induce un voltaje de 1 V en el secundario.

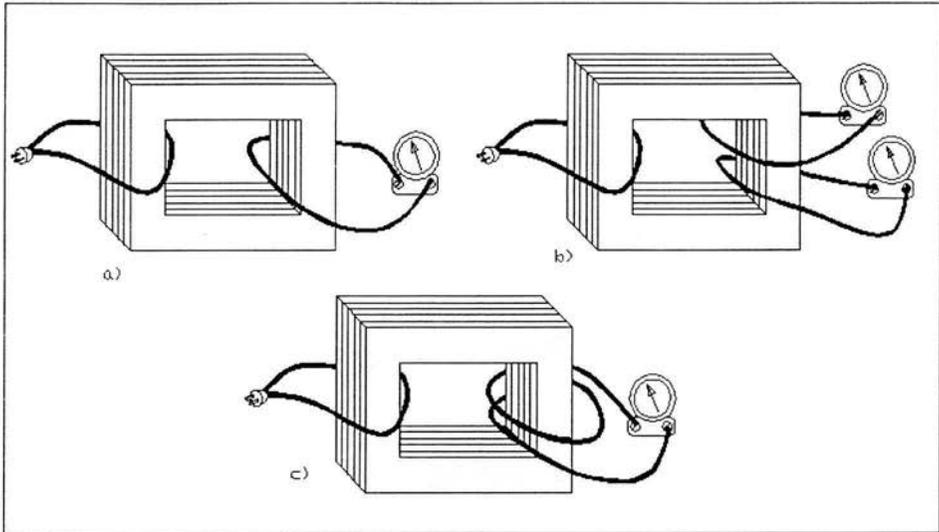


FIGURA 1.2.7 Núcleo tipo circuito cerrado

Si envolvemos otra espira alrededor del núcleo, de modo que el transformador tenga dos secundarios (figura 1.2.7 inciso b), la nueva espira interceptará el mismo cambio en el campo magnético y también se induce en ella un voltaje de 1 Volts. No es necesario mantener separados los dos secundarios, pues podemos unirlos (figura 1.2.7 inciso c) y tener de todos modos un voltaje inducido total de 1 Volt + 1 Volt o sea, 2 Volts. Esto equivale a decir que se induce un voltaje de 2 Volts en un solo secundario que tiene el doble de espiras que el primario. Así pues, se induce dos veces más voltaje en un secundario que tiene dos veces más espiras que el primario.

Si el secundario tiene tres veces más espiras, o vueltas, como se les suele llamar, el voltaje inducido es tres veces mayor. Si el secundario tiene cien veces más vueltas que el primario, entonces se induce un voltaje cien veces mayor, y así sucesivamente. Este

arreglo de un secundario con un número mayor de vueltas que el primario constituye un transformador elevador.

Si el secundario tiene menos vueltas que el primario, el voltaje alterno que se produce en el secundario es menor que el del primario. Decimos que el voltaje se ha reducido.

Si el secundario tiene la mitad del número de vueltas que tiene el primario, entonces se induce sólo la mitad del voltaje en el secundario.

Así pues, podemos alimentar energía eléctrica al primario con un voltaje alterno determinado y extraerla del secundario con un voltaje alterno mayor o menor, según el número relativo de vueltas que tengan los devanados de las bobinas primaria y secundaria.

Podría parecer que obtenemos algo por nada con un transformador que eleva el voltaje. No es así porque la conservación de la energía rige siempre lo que puede ocurrir. En realidad, el transformador transfiere energía de una bobina a otra . La razón de transferencia de energía es la potencia. La potencia que se consume en el secundario proviene del primario. Éste no suministra más potencia que la que consume el secundario, de acuerdo con la conservación de la energía. Si no tomamos en cuenta las ligeras pérdidas de potencia debidas al calentamiento del núcleo, entonces la potencia suministrada es igual a la potencia extraída. La potencia eléctrica es igual al producto del voltaje por la corriente, de modo que podemos decir que:

$$(\text{voltaje} \times \text{corriente})_{\text{primario}} = (\text{voltaje} \times \text{corriente})_{\text{Secundario}}$$

Se observa claramente que si el secundario tiene un voltaje mayor, tendrá menos corriente que el primario. O viceversa si el voltaje del secundario es menor, tendrá más corriente que el primario. La facilidad con la que un transformador permite elevar o reducir voltajes es la razón principal por la que la mayor parte de la energía eléctrica de que disponemos es corriente alterna y no corriente directa o continua.

1.3. LEY DE FARADAY.

En todo conductor eléctrico, que se mueve cortando las líneas de un campo magnético, se genera en el una fuerza electromotriz (f.e.m.), teniendo H y V (de un conductor), se obtiene una fuerza electromotriz (caso del generador de energía eléctrica). El campo magnético " H " y la velocidad " V " deben ser perpendiculares entre si para obtener una fuerza electromotriz que será perpendicular al plano formado por la velocidad y el campo magnético. En caso de no ser perpendicular el campo magnético y la velocidad se deberá considerar la componente de uno de ellos para cumplir la perpendicularidad.

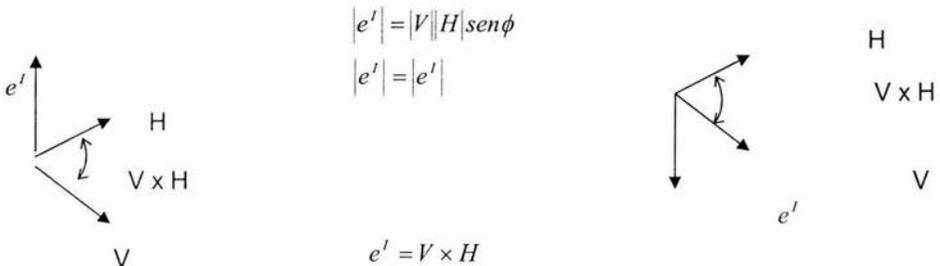
La ley de Faraday y su representación por medio de la mano derecha, también puede ser analizada en forma matemática por el calculo vectorial: Producto vectorial ó producto cruz , el cual no debe confundirse con la suma vectorial ó con el producto escalar de dos vectores. El producto vectorial da como resultado un tercer vector cuya magnitud vale:

$$V \times H = |V| \times |H| \text{sen}\phi$$

Siendo la velocidad "V" y el campo magnético "H" por lo cual " ϕ ", es el ángulo entre la velocidad "V" y el campo magnético "H" La dirección del vector resultante será siempre perpendicular al plano formado por "V" y "H", aplicado este vector en el punto de concurrencia de la velocidad "V" y el campo magnético "H".

El sentido del vector resultante se obtiene abatiendo el primer vector velocidad, girando en el centro de concurrencia sobre el segundo vector del campo magnético, lo que determina un sentido de rosca ó cuerda derecha, ó hélice. De tal forma que la multiplicación de la velocidad y el campo magnético ($V \times H$), produce un sentido de vector resultante, en tanto que la multiplicación del campo magnético y la velocidad ($H \times V$), produce el mismo vector pero de sentido contrario.

Debe observarse que el producto vectorial ó producto cruz, es la excepción en matemáticas a la Ley conmutativa de la multiplicación que dice, " El orden de los factores no altera al producto", ya que en este caso si lo altera, aunque solo en el sentido resultante, en cambio, la dirección y la magnitud no se alteran al conmutar los factores.



1.3.1 LEY DE OERSTED

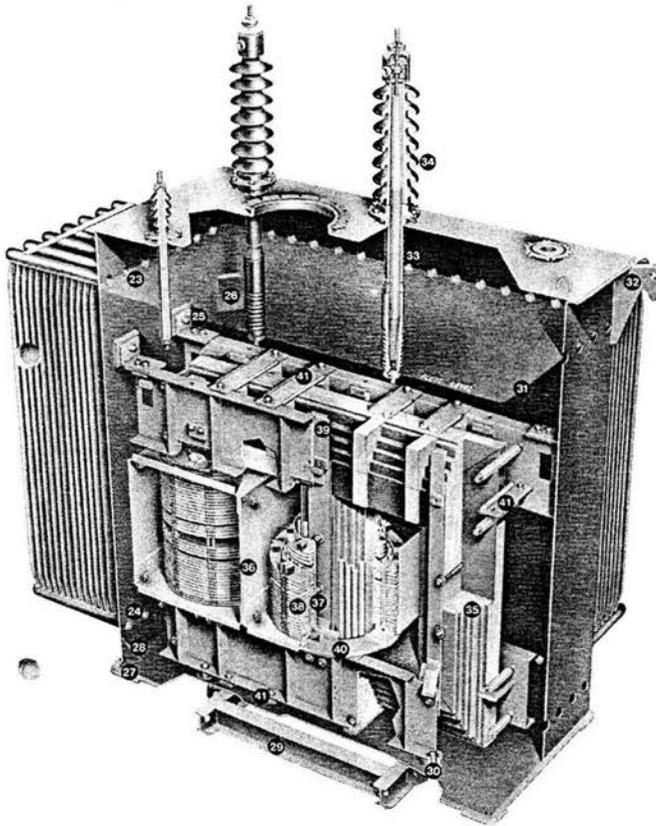
En todo conductor que sea circulado por una corriente eléctrica se formara un campo magnético asociado en forma de anillos concéntricos y perpendiculares al conductor a lo largo de este. Es por eso que toda corriente eléctrica lleva asociada un campo magnético, en el cual si se coloca una brújula o un imán junto a un conductor por el que circula una corriente eléctrica el imán tendera a colocarse en posición normal o sea perpendicular al conductor, el flujo magnético depende del sentido de la corriente eléctrica y se representa en forma de círculos planos, helicoidales rodeando al conductor con esta ley se comprueba la relación existente entre la electricidad y el magnetismo.

1.3.2 LEY DE BIOT – SAVART.

La intensidad del campo magnético que se genera en los anillos es mayor cerca del conductor y decrece al aumentar la distancia de los anillos respecto al conductor. Esta ley establece una relación cuantitativa entre la corriente eléctrica y la intensidad del campo magnético que esta produce por lo que se permite calcular las fuerzas que se generan entre las corrientes eléctricas y los campos magnéticos, es decir el campo magnético producido por una corriente eléctrica tiene una intensidad que depende del valor de la misma puesto que si no circula corriente alguna, no habrá campo magnético, si la corriente va creciendo paulatinamente, también crecerá la intensidad del campo magnético asociado, de modo que la intensidad del campo magnético en un punto tal

será directamente proporcional a la intensidad de la corriente Biot y Savart, dedujeron que dicho campo variara en forma inversamente proporcional a la distancia del conductor.

CAPITULO 2



**COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS
TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

Para poder realizar la verificación de transportación por carretera para de un transformador se deben analizar todas la partes que constituyen a este por lo cual a continuación se describen las partes principales de los transformadores estas varían dependiendo del tipo de transformador que se trate por lo cual para el transformador en estudio y para todo transformador de potencia este se compone por cinco componentes principales que son:

2.1 NÚCLEO.

Tiene como función conducir el flujo magnético generado por los devanados, confinándolo dentro de una trayectoria cerrada formando el circuito magnético. El material actualmente empleado para los núcleos se conoce como acero al silicio de grano orientado. El silicio le permite conducir con mayor facilidad el flujo y la orientación del grano hace que este circule en una sola dirección reduciendo la dispersión que produce pérdidas.

Las líneas de flujo producen a su alrededor pequeñas corrientes que son indeseables, ya que son generadoras de pérdidas. Para reducir estas corrientes, el núcleo se construye con láminas muy delgadas de .009" a .011" aisladas por ambos lados con una capa muy fina de un recubrimiento aislante. Es importante manejar con cuidado la laminación que formará el núcleo, ésta es muy sensible a los esfuerzos mecánicos los cuáles afectan sus propiedades incrementando las pérdidas. Los esfuerzos referidos son producidos por el manejo y corte de laminación así como por el enrollado y formado de núcleos. En los transformadores pequeños, estos esfuerzos se alivian sometiendo

CAPITULO 2 COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA

los núcleos ya formados a un proceso de recocido dentro de un horno a altas temperaturas. De esta manera se recuperan las propiedades alteradas por los esfuerzos. Se conocen tres tipos básicos de construcción de núcleos, que son:

- a) ENROLLADO. Una tira continua de laminación es devanada en espiral y en cada vuelta se hace un corte para permitir el ensamble con la bobina. Los cortes se hacen en puntos alternados de modo que la unión en una vuelta no coincida con la siguiente. Para cada bobina se utilizan 2 piezas de núcleo como se muestra en la figura 2.1.1.

- b) A TOPE 90° Y TRASLAPADO. Utilizado en los transformadores antiguos, antes de descubrir el acero de grano orientado. Se forma con láminas de 2 longitudes diferentes, cortadas en forma rectangular. Cada capa de laminación se traslapa.

- c) TOPE (45°) Y TRASLAPADO. Su construcción es similar a la anterior, sólo que las láminas tienen cortes a 45° para aprovechar la ventaja del grano orientado. Cada capa de laminación se traslapa con la siguiente.

En los tres tipos de núcleos se debe vigilar que las uniones sean lo más cerradas posibles, minimizando el entrehierro ("gap") y a la vez la dispersión del flujo.

El paso final en la construcción de núcleos es la sujeción. Obviamente, si las laminaciones están flojas, se tendrán ruidos y vibraciones que a la larga pueden hacer fallar al transformador. Todos los núcleos de los transformadores están sujetos por

estructuras metálicas llamadas bastidores y tiene la función de contener mecánicamente la laminación.

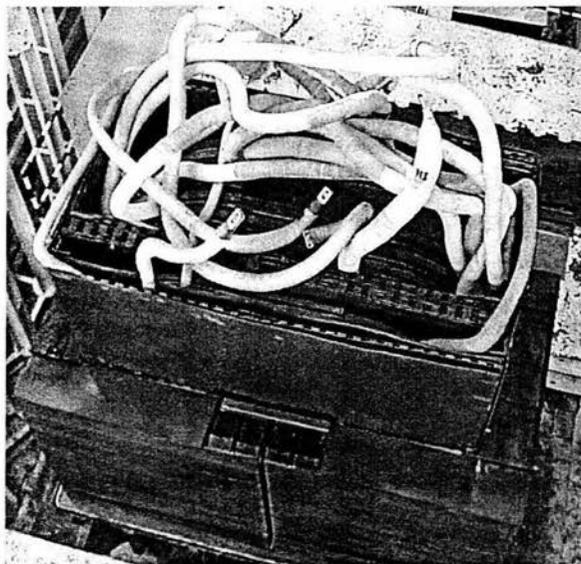


FIGURA 2.1.1 NÚCLEO TIPO ENROLLADO

2.2 DEVANADOS.

Su función, como circuito eléctrico, es recibir un voltaje y una corriente para entregarlos transformados, por inducción, a diferentes valores. Son fabricados con conductores aislados eléctricamente y enrollados sobre moldes. Por su baja resistencia eléctrica y bajo costo, el conductor más empleado es el Cobre (Cu), en forma de alambre o de solera. En transformadores pequeños se emplea también el Aluminio (Al) en forma de lámina.

CAPITULO 2 COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA

Para baja corriente, se utiliza el alambre o la solera individual, mientras que para alta corriente se aplica la lámina o grupos de soleras paralelas, aisladas individualmente para minimizar las pérdidas.

Existe flujo, llamado disperso, que no sigue la trayectoria del núcleo sino que baña a los conductores de los devanados. No todos los conductores reciben la misma cantidad de flujo disperso, esto hace que haya diferencia de voltaje entre un conductor y otro. Cuando estos conductores son paralelos (de un mismo grupo), se establece una corriente entre ellos produciendo pérdidas.

La forma de evitar que se genere esa corriente, es logrando que todos los conductores del grupo sean bañados por la misma cantidad de flujo y esto se hace realizando transposiciones, para que cada conductor ocupe todas las posiciones posibles en el grupo a lo largo del devanado.

Para ayudar a disipar el calor generado por las pérdidas, dentro de la fabricación del devanado se colocan aislamientos que sirven de ductos, ya sea para circulación de aire o de líquido refrigerante. De acuerdo al voltaje y corriente que manejan, los devanados pueden construirse en tres formas básicas: rectangular, cilíndrico y tipo galleta. Cualquiera que sea el tipo de devanado, durante su fabricación es sumamente importante evitar la humedad, las partículas contaminantes y cualquier daño que pueda ocurrir al aislamiento o al conductor.

De no ser así, se pone en peligro la vida del transformador.

- a) **DEVANADO RECTANGULAR.** Sobre un molde rectangular se enrollan los conductores formando capas, aisladas una de otra, para a su vez formar grupos ya sea de baja tensión o de alta tensión. Se utilizan en transformadores de poca capacidad.

- b) **DEVANADO CILÍNDRICO.** Se forman con uno, dos o más conductores paralelos y existen varias modalidades de este devanado, puede estar formado por capas (helicoidal o espiral) o por discos paralelos (continuo o hisercap). Se emplean en transformadores de mediana y gran capacidad. En la figura 2.2.2 se puede apreciar este tipo de devanado.

- c) **DEVANADO TIPO GALLETA.** Formadas con uno, dos o más conductores paralelos, se construyen las bobinas sobre una mesa giratoria para después interconectarse formando grupos. Se utilizan para transformadores de gran capacidad. En la figura 2.2.3 se muestra la fabricación de este tipo de devanado.

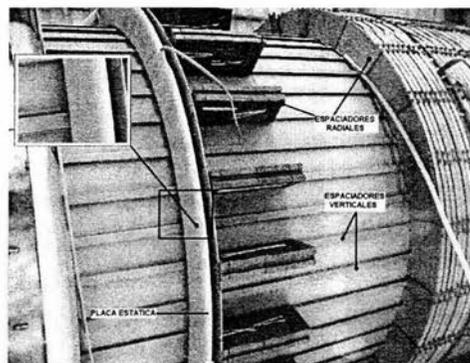


FIGURA 2.2.2 DEVANADO TIPO CILÍNDRICO

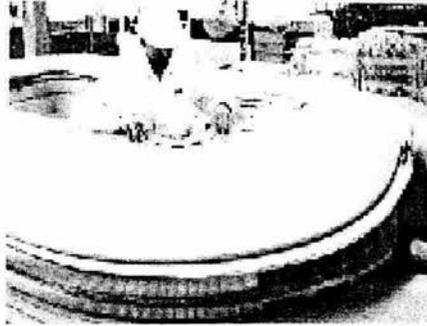


FIGURA 2.2.3 DEVANADO TIPO GALLETA

2.3 AISLAMIENTOS

Estos elementos tienen la función de impedir el contacto eléctrico entre partes conductoras y entre éstas y el núcleo u otras partes metálicas en contacto con tierra. Forman la estructura más importante del transformador, ya que la vida útil de éste depende en alto grado del estado que guarde su sistema aislante.

Los aislamientos pueden ser sólidos o líquidos, pudiendo los sólidos proporcionar soporte mecánico a los devanados y los líquidos funcionar como medio refrigerante. Existen dos categorías de aislamientos, quedando el líquido aislante incluido en ambas.

AISLAMIENTOS MENORES. Son aquellos que se colocan entre conductores de una misma vuelta, entre vueltas adyacentes, entre grupos (secciones o capas) de un mismo devanado y en guías de conexiones internas. Algunos de los materiales que

CAPITULO 2 COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA

componen estos aislamientos son: cintas para forro (papel kraft, papel crepé, algodón, fibra de vidrio); tiras, hojas o paquetes de cartón comprimido; esmaltes, barnices y recubrimientos epóxicos.

AISLAMIENTO MAYORES. Son los que van colocados entre grupos de alta tensión y grupos de baja tensión en una misma fase, entre bobinas de diferente fase, entre bobinas y núcleo y entre bobinas y cualquier parte en contacto con tierra. Algunos materiales para esta categoría son: Hojas o cilindros de cartón comprimido o micarta; resina epóxica; collares de micarta.

2.4- TANQUE.

Es la envoltura del transformador, generalmente construido con lamina de acero en formas diferentes (cilíndrico, rectangular, oval, etc). Funge como recipiente para el conjunto núcleo-bobinas y el medio refrigerante, proporcionando protección mecánica, protección contra agentes contaminantes y además una superficie de disipación al transferir al ambiente el calor cedido por el medio refrigerante. Previa limpieza con abrasivos (chorro de arena o perdigón) o productos químicos (fosfatizado), el tanque es protegido contra la corrosión mediante recubrimientos especiales. El color y las condiciones de la pintura influyen en la disipación adecuada del calor, por lo que deben tomarse las precauciones necesarias para evitar su deterioro.

CAPITULO 2 COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA

Adecuados a su tamaño y aplicación, el tanque cuenta con aditamentos adecuados para maniobras de izaje, deslizamiento y transporte del transformador, así como para el llenado y drenado del líquido. Está diseñado para soportar alto vacío y presiones de hasta 15 psi. En el caso de transformadores sumergidos en líquido, el tanque está provisto de un espacio de gas para permitir la expansión térmica del líquido. En la figura 2.4.1 se aprecia el tanque para un transformador tipo shell monofásico fabricado de forma especial.

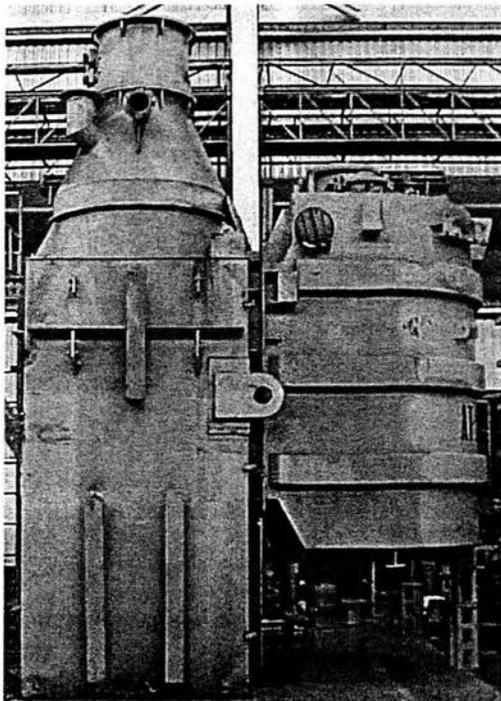


FIGURA 2.4.1 TANQUE PARA TRANSFORMADOR TIPO SHELL.

2.5- ACCESORIOS

BOQUILLAS. :Llamadas también "bushings", tienen la función de llevar, de una manera segura, los conductores o guías de los devanados a través del tanque. Están formadas por un cuerpo aislador y un conector terminal. Además, deben ser herméticas para evitar la entrada de humedad al transformador. De acuerdo a su aplicación, podemos mencionar varios tipos: de cerámica sólida (hasta 25kV), de porcelana-aceite o porcelana-epoxy (25 a 69 kV), de porcelana-papel con resina sintética (34.5 a 115 kV) y porcelana-papel Impregnado con aceite (69 kV y mayores). Los faldones o campanas exteriores les permiten, en poca altura, proporcionar una distancia dieléctrica adecuada al voltaje.

PROTECCIÓN CON FUSIBLES. Se emplea en transformadores para distribución subterránea con objeto de proteger al transformador contra sobrecargas o fallas.

CAMBIADOR DE DERIVACIONES. Por diferentes razones, como por ejemplo: variaciones de carga, adición de circuitos o cargas clandestinas, el voltaje que llega al primario del transformador es diferente al esperado, provocando en el secundario un voltaje mayor o menor al requerido. Para compensar este efecto, los transformadores, en su mayoría, están provistos con un dispositivo que permite ajustar el voltaje secundario al valor deseado, aumentando o eliminando vueltas en el devanado primario. Este dispositivo es el cambiador de derivaciones o de "taps". Normalmente el cambiador se conecta en el devanado de alta tensión, ya que éste, al tener más vueltas, facilita el ajuste más fino del voltaje, este accesorio tiene dos variantes que son

CAPITULO 2 COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA

el resistivo y el inductivo, la selección de cualquiera de los dos puede darse por economía o requisito del cliente.

RADIADORES. Cuando el área del tanque no es suficiente para lograr la disipación térmica deseada. Es entonces cuando se agrega área utilizando radiadores, que con grupos de tubos o aletas de acero, unidas a dos cabezales y que se conectan al tanque ya sea soldándolos o por medio de válvulas de acoplamiento para hacerlos desmontables. Para acelerar la disipación de calor, la lamina de los radiadores es de un espesor mucho menor al de las paredes del tanque.

ENFRIADORES. Cuando se requiere disipar una mayor cantidad de calor de la que los radiadores son capaz de disipar, se ocupan los enfriadores que son prácticamente intercambiadores de calor, un un enfriador esta compuesto por una bateria de tubos con aros disipadores soldados e integrados a ventiladores, algunos incluyen bombas para lograr un flujo de aceite mayor .

INDICADOR DE NIVEL DEL LIQUIDO. En necesario establecer y vigilar un nivel normal del líquido aislante, tomando en cuenta las variaciones posibles por temperatura, de modo que el volumen total siempre sea el adecuado para el buen funcionamiento del transformador. En transformadores pequeños (hasta 225 kVA), basta con una marca interna en la pared del tanque, o una mirilla en la que se pueda observar el nivel. En transformadores mayores, el nivel se indica ya sea por un tubo capilar, una mirilla graduada o un indicador con carátula magnética (flotador) ensamblado en el aparato. Estos indicadores pueden estar provistos con elementos de

CAPITULO 2 COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA

señalización o alarma, para el caso que el nivel sea muy alto o muy bajo, condiciones que ponen en peligro la operación del equipo.

INDICADOR DE TEMPERATURA DEL LÍQUIDO. Hemos dicho ya que la temperatura excesiva, en periodos largos, es nociva para el transformador, de ahí la importancia de vigilar que se mantenga dentro de los límites permitidos. En transformadores pequeños (hasta 225 kVA), debido a su relación volumen-área de disipación, el enfriamiento natural es suficientemente confiable para no requerir un sistema de monitoreo de temperatura. En cambio, en los transformadores más grandes se cuenta con un indicador de temperatura del líquido, de tipo carátula, ensamblado sobre la pared del tanque dentro de un tubo (termo pozo). Este indicador tiene una aguja de arrastre que indica la temperatura máxima alcanzada en un cierto período y puede estar provisto con elementos de señalización o alarma, en caso de que la temperatura rebase el límite de seguridad.

INDICADOR DE TEMPERATURA DEL DEVANADO. Este indicador permite vigilar la temperatura del devanado, a través de una imagen térmica, utilizando un transformador de corriente colocado en la boquilla de alta tensión del transformador. La señal de corriente así obtenida alimenta una bobina calefactora. dentro de un termo pozo, que hace operar un elemento censor para indicar en una carátula la temperatura del devanado, ya sea en grados centígrados ("Hot-Spot") o en porcentaje de carga (TRO-2). Cuenta con aguja de arrastre y contactos ajustados a diferentes temperaturas para hacer operar la secuencia de enfriamiento forzado y la señalización o alarma. En los transformadores tipo seco se utilizan también termostatos o termo resistencias como

indicadores de temperatura.

VÁLVULA MECÁNICA DE ALIVIO DE SOBREPRESIÓN. Los arcos eléctricos producidos por fallas dentro del transformador causan descomposición del aceite y en consecuencia generación de gases. La presión de estos gases puede poner en peligro la integridad mecánica del transformador. Hasta hace algunos años, se utilizaba un diafragma de cristal para liberar las sobrepresiones. Actualmente, se emplea una válvula que, por medio de resortes calibrados, opera y restablece automáticamente su diafragma metálico. Tiene también contactos para señalización o alarma.

RELEVADOR DE SOBREPRESIÓN SÚBITA. Actúa en respuesta a incrementos bruscos de presión originados por fallas internas del transformador. Se usa en unidades de tipo tanque sellado y tiene contactos para señalización o alarma, este a diferencia de la válvula de sobrepresión es capaz de responder en ciclos de corriente continua es decir responde muy rápido.

EQUIPO PARA ENFRIAMIENTO FORZADO. De acuerdo al tipo de enfriamiento, está formado por unidades o grupos (bancos) de motoventiladores; por enfriadores; por intercambiadores de calor o por bombas centrífugas para circulación de aceite. Estos dispositivos son accionados en forma manual o en forma automática, a través del equipo de control que recibe la señal del indicador de temperatura, sea del líquido o del devanado.

INDICADOR DE FLUJO. Instalado en la tubería de succión o de descarga de la bomba de aceite del transformador, accionado por una veleta indica en una carátula si la

CAPITULO 2 COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA

dirección del flujo es correcta y si la bomba funciona. Está provisto de contactos para señalización o alarma.

TANQUE CONSERVADOR. De forma cilíndrica o rectangular, se coloca por encima del tanque principal conectándose por medio de tubería. Mantiene al tanque principal lleno de aceite y libre de variaciones de nivel por efecto de la temperatura. Con este tanque, se reduce la superficie de líquido expuesta a la oxidación. Su espacio de gas está en contacto con la atmósfera a través de algún sistema de respiración, este sistema de respiración puede ser por medio de una bolsa de neopreno o con una atmósfera de gas inerte..

DESHIDRATADOR. Permite la respiración del transformador por medio de una válvula de admisión de aire y otra de expulsión, ambas precalibradas. El aire que entra al espacio de gas pasa por un material secante (silica-gel) eliminando la humedad.

RELEVADOR DETECTOR DE GASES (BUCHHOLZ). Permite detectar y atrapar los gases generados por fallas internas en el transformador. Se coloca en la tubería que conecta el tanque principal con el tanque conservador. Cuenta con señal de alarma para fallas menores y señal de disparo en caso de falla seria.

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE. Tienen forma de anillo o dona, van ensamblados en las boquillas por la parte interior. Proporcionan la corriente para relevadores de protección e instrumentos indicadores en la subestación, estos por lo regular son montados en las colas de las boquillas.

CAPITULO 2 COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA

BOMBAS.- Tienen la función de forzar el aceite que se encuentra dentro del transformador con el fin de crear un efecto refrigerante mayor.

INDICADOR DE FLUJO.- Este se instrumento tine la funcion de indicar cuando existe un flujo de aceite debido a el funcionamiento de las bombas.,

EQUIPO DE GAS INERTE.- Sirve para retardar el deterioro del sistema aislante mediante la presencia constante de nitrógeno en el espacio de gas del transformador. Consta de un cilindro de nitrógeno y un gabinete regulador que permite liberar el exceso de presión en el aparato o inyectar gas si ésta baja. También se emplea en almacenamiento o embarque de transformadores sin aceite, para evitar la entrada de humedad.

Ahora bien no todos los componentes son embarcados en conjunto si no que algunos componentes son retirados de la unidad por exceso de dimensiones o por la integridad física del componente retirado. Los componentes que son retirados de la unidad dependen del tipo de transformador que sea embarcado. Para el caso particular del transformador en estudio las partes retiradas para su embarcación son:

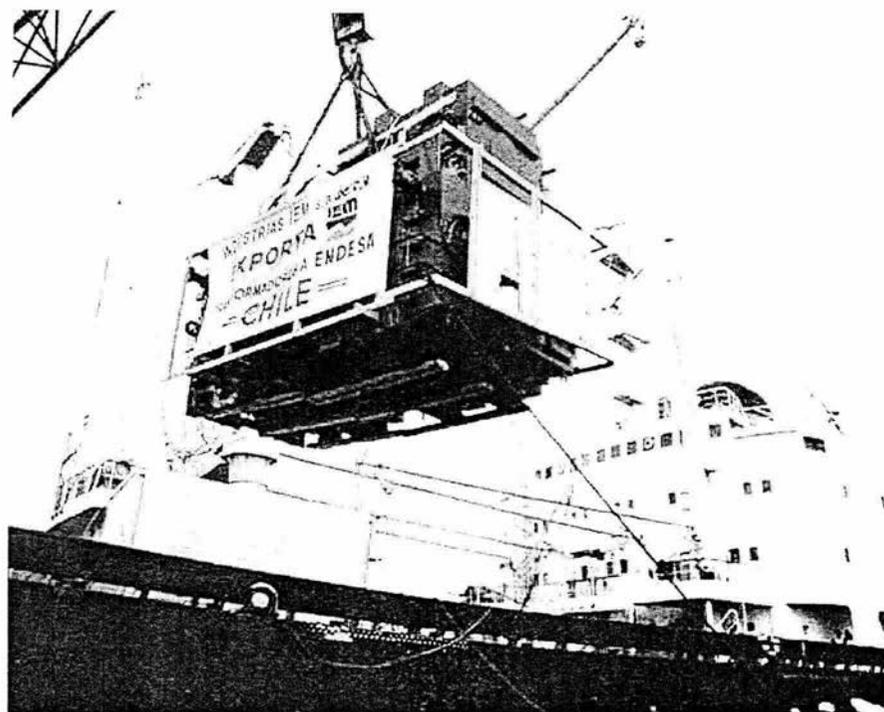
1. Boquillas de alta tensión.
2. Boquillas de baja tensión.
3. Boquilla neutro de baja tensión.
4. Conector para boquilla de alta tensión.
5. Conector para boquilla de baja tensión.

CAPITULO 2 COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES DE PONENCIA

6. Conector para boquilla de neutro.
7. Radiadores de aletas.
8. Ventiladores de enfriamiento.
9. Indicador de nivel de aceite.
10. Válvula de sobrepresión mecánica.
11. Válvula para tubería de tanque de expansión.
12. Extensión para válvula de sobrepresión mecánica.
13. Relevador de protección buchholz.
14. Tanque de expansión tipo cops.
15. Tubería para tanque de expansión.
16. Soporte para apartarrayos de baja tensión.
17. Soporte para apartarrayos de alta tensión.
18. Tirantes de sujeción de radiadores.
19. Tubería para purga de asientos de boquillas.
20. Soporte para montaje de tanque de expansión.

Lo cual el retiro de estas partes produce que la transportación del transformador se enfoque en un sistema en que los componentes que llegan a sufrir algún tipo de deformación son las partes internas y componentes principales de armado del conjunto núcleo-bobinas así como el tanque principal ya que de este esta sujeto el conjunto núcleo-bobinas.

CAPITULO 3



**PROCEDIMIENTO DE EMBARQUE DE
TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

3.1 ACELERACIONES CRITICAS PARA EMBARQUE

Desde el punto de vista de aceleración, existen diferencias notables entre los métodos de transportación, como son el ferroviario, el carretero y el marítimo. En consecuencia, cada tipo es subdividido en varias posibilidades diferentes, tales como las diferentes rutas de ferrocarriles existentes en el territorio mexicano, así como las diferentes rutas en territorio extranjero como el ferrocarril centroamericano y el ferrocarril norteamericano, transporte ferroviario empleando carros de caja baja o carros planos, sistema roll-on roll-off para un embarque combinado marítimo y / o carretero tierra adentro, o transporte carretero considerando de igual forma las diferentes carreteras en la republica mexicana y carreteras en el exterior de esta.

Se ha desarrollado algún tipo de información y está disponible, sobre aceleraciones en diferentes direcciones, así como de las frecuencias de los movimientos y ángulos de inclinación en diferentes direcciones. Esta información se encuentra especificada en la Tabla 1. Toda la información está basada en el comportamiento normal del transporte bajo las peores condiciones. Tomando como ejemplo una transportación marina.

En cuanto a la transportación marítima, las aceleraciones dependen no solo de las condiciones del clima, sino también de los datos y propiedades del barco y de la ubicación de la carga sobre el mismo. Cálculos en embarcaciones de diferentes envergaduras muestran que los de 15,000 toneladas o mas tienen aceleraciones mas o menos independientes del tonelaje del barco. Estos valores pueden resumirse como sigue:

Rodamiento:	Longitudinal.	1.1 – 1.5 m/seg ²
	Transversal.	5 – 6 m/seg ²
	Vertical.	5.5 – 6.4 m/seg ²
Cabeceo:	Longitudinal.	1.8 – 3.0 m/seg ²
	Transversal.	2.5 – 3.0 m/seg ²
	Vertical.	6.4 – 8.6 m/seg ²

TABLA 1 ACELERACIONES DE TRANSPORTACIÓN.

Al considerar las aceleraciones transversales y longitudinales, la conclusión debe ser que debe tomarse en cuenta un máximo rodamiento de 6 m/seg² a un máximo cabeceo de 3 m/seg² considerando únicamente la transportación marítima..

Es claro que no es posible controlar por completo las condiciones de transportación por carretera de transformadores de potencia, pero se disponen de los mas modernos sistemas, en los cuales se disminuyen gran parte de los movimientos repetitivos que se generan durante el periodo de transportación. Así mismo la aceleraciones producidas durante este periodo dependen de muy diversos factores por los cuales dichas aceleraciones variaran dependiendo de los factores que influyan en cada transportación. En la tabla 2 se muestran algunas aceleraciones para diversos medios de transportación.

Para poder tener un parámetro aceptable referente a aceleraciones por carretera se tomara como base a los parámetros de verificación en pruebas de prototipo y diseño

referente a la norma CFE K0000-13 de Comisión Federal de Electricidad, donde dichas pruebas y revisión de diseño se refieren a la verificación de transformadores de potencia, de acuerdo al diseño del mismo, cumplan al menos un margen de seguridad de 2.5 veces el esfuerzo máximo producido por una aceleración de 2.5g en sentido longitudinal, 2.0g en sentido lateral y 1.5g en sentido vertical. Los valores de aceleración indicados son validos únicamente para transporte por carretera.

TABLA 2

**DATOS DE TRANSPORTACIÓN PARA
CONDICIONES EXTREMAS DE ACELERACIÓN.**

Medios de transportación	Máximas Aceleraciones			Frecuencia de Movimiento	Angulo (grados)	
	$\frac{m}{seg^2}$				Hz.	Longitudinal
	Longitudinal	Transversal	Vertical			
1. Ferrocarril Europeo carro tipo schnabel.	2.5	2.5	2.5	< 0.01	5	11
2. Ferrocarril carga en el centro	5	4	3	< 0.01	5	11
3. Ferrocarril Americano.						

Valores normales	7.5	5	6	< 0.01	5	11
Valores picos.	10	7	8	n.a		
4. Ferrocarril de la costa.	2.5	2.5	2.5	n.a	5	10
Por carretera.	4.5	3	3	n.a.	10	20
por Carretera						
Normales	6	6	6	0.2	15	30
Extremas	4	4	4	0.05	5	10

Una vez que se han terminado las pruebas de rutina o de fábrica a la unidad, está lista para ser embarcada y transportada a su lugar de destino. En esta etapa, la unidad pasa a manos de un grupo de personas especializadas que proceden a retocar su pintura, detallarla en acabado, accesorios, etc... y que finalmente la preparan y la embarcan en un transporte.

Es importante conocer algunos detalles de estos procedimientos y métodos, ya que de ellos depende que la unidad llegue a salvo de accidentes y daños al lugar de su instalación. Enseguida se explicaran los detalles y operaciones más importantes que ocurren para el desmantelado, embarques y transporte de transformadores de potencia.

En la figura 6 se aprecia la forma de desmantelamiento para poder transportar la unidad principal de un transformador de potencia.

3.2 PROCEDIMIENTO PARA PRUEBA DE PRESIÓN.

Una vez que la unidad a pasado por el departamento de piso de pruebas, se procede a realizar una prueba de presión con todo su equipo y accesorios montados con excepción de las válvulas de esc-pe, tanque de expansión, relevador Bucholtz, relevador de presión súbita, relevador detector de gases, y equipos conservadores (inertaire etc...). el procedimiento para la prueba de presión es : Se llena el tanque del transformador con aceite a presión hasta que la presión en la tapa del tanque alcanza 0.70 kg/cm^2 (10 lbs/in^2). A continuación se limpian los residuos de aceite en todas las superficies del tanque y se aplica una solución de agua con yeso a todas las costuras de soldadura y se observa que no existan fugas de aceite en ningún punto. Sin embargo, la presión puede cambiar con la temperatura. Si la presión cae a un valor abajo de 0.63 Kg/cm^2 debe restablecerse a 0.70 kg/cm^2 antes de continuar la prueba. Si por lo contrario la presión sube, esta no debe exceder de 0.77 kg/cm^2 (11 lbs./in^2). Si se observan bajas de presión posteriores es indicio de que existe una fuga en el tanque y ésta debe localizarse, sellarse y probar de nuevo. Si no se observan fugas, debe mantenerse la unidad bajo presión durante un período de 6 horas y si no aparecen fugas en ese lapso, las uniones son rígidas y no hay fugas.

Esta prueba debe repetirse en todos los compartimentos que estén aislados del tanque principal. Todas las válvulas para radiadores y bombas se inspeccionan también durante la prueba para verificar la condición en que se hallan los empaques. Los tanques de expansión se prueban por separado, los tanques de paredes planas se prueban con 0.70 kg/cm^2 por 6 horas, los tanques que llevan bolsa de neopreno se

prueban a 0.70 kg/cm^2 6 horas con la bolsa abierta a la atmósfera y después se aplican 0.3 kg/cm^2 a la bolsa con el tanque vacío.

Antes de hacer presión en la unidad principal se llena el compartimiento del cambiador con aceite hasta su nivel normal y se anota la posición del indicador de nivel después de hacer presión. Si durante la prueba de la unidad principal no varía el volumen de aceite del cambiador, quiere decir que no hay fugas del cambiador.

A todos los radiadores y bancos de enfriadores se les hace pruebas de presión igual que a la unidad principal. Cuando no es posible hacer todas estas pruebas con aceite a presión, es posible efectuarlas si se llenan las unidades con aceite hasta unos 10 o 15 cm. por abajo de la cubierta y éste espacio se llena con nitrógeno seco a presión hasta obtener las presiones indicadas. En este caso las fugas se pueden verificar con solución de agua jabonosa.

3.3 DESMANTELADO.

Para poder llevar a cabo los trabajos necesarios dentro del transformador, es recomendable abrir sólo un registro hombre, el cual debe estar colocado en su posición cuando no se esté trabajando dentro del transformador.

Después se procede a drenar el aceite hasta el nivel necesario que permita trabajar dentro del transformador, pero de preferencia no bajarlo más del nivel superior de las bobinas. A continuación se cubren éstas en su parte superior con sábanas de tela de

algodón para cubrir las de suciedad y retener objetos extraños que pudieran llegar a caer por accidente. Se deben asegurar bien las conexiones permanentes cerciorándose que estén rígidas y bien aisladas. A continuación se desmontan las boquillas y se sellan inmediatamente sus entradas con tapas y empaques.

Si por algún motivo se requiere desencintar alguna guía y es preciso reencintarla en el campo, es necesario amarrar una tarjeta de advertencia en dicha guía. A todas las conexiones atornilladas que no van encintadas se les da un apriete final. Se deben cerciorarse que todas las cuñas estén rígidas.

Todas las guías largas se enrollan formando un rizo de circunferencia lo suficientemente grande para evitar dañar el aislamiento del cable y se amarran cuando menos 3 puntos de la circunferencia. Una vez hecho lo anterior se amarra el rizo a algún puente de la estructura para evitar movimiento. Si la unidad va a embarcarse con aceite, se amarra el rizo a la parte inferior de la entrada de hombre de manera que pueda recobrase fácilmente sin remover el aceite.

Las guías largas de cobre flexible usualmente se atornillan a una estructura de metal en el fondo del agujero de la boquilla. En otras ocasiones, cuando la guía es más corta y más flexible, se dobla sobre sí misma y se amarra el extremo sobre la guía formando un ojillo y a través de este se amarra a alguna estructura adyacente. Debe verificarse la inmovilidad y amarre de todas las guías, cambiadores de derivaciones, transformadores de corriente y todas las partes que puedan dañarse con el movimiento del embarque y transportación.

El desensamblaje externo puede hacerse simultáneamente con el desensamblaje interior.

Antes de quitar cualquier accesorio exterior deben marcarse las piezas para su acoplamiento posterior en el campo. Deben quitarse solamente las piezas que se especifican en los diseños de los transformadores. Todas las aberturas en el tanque principal deben sellarse con tapas, tapones macho o tapones cachucha según el caso. También deben sellarse las aberturas de las partes desensambladas a menos que éstas se vayan a embarcar en envolturas especiales a prueba de polvo y humedad.

Cuando es necesario remover los gabinetes de control, en ocasiones quedan expuestos los cables de control, y también es preciso aislarlos bien con bolsas de polietileno. El acabado de todas las partes desensambladas debe estar en buenas condiciones y se debe reparar o retocar si se requiere.

Las tuberías de cobre pueden permanecer en su lugar si las dimensiones de embarque lo permiten, pero deben desconectarse e insertarse tapones en las conexiones de la tubería y el tanque.

Después de la prueba de presión se instala sílica gel. Esta se instala en el recipiente de sílica gel el cual se atornilla en el fondo de la tapa del agujero o entrada de hombre. Puede ser necesario bajar un poco el nivel de aceite para mantener la sílica fuera del aceite. La sílica gel es un material higroscópico que absorbe fácilmente humedad, y se le utiliza precisamente para observar si se humedece el transformador. Para tener una referencia, se pesa la cantidad de sílica gel y se debe conservar este dato. Es recomendable no exponer la sílica gel al ambiente o al aire por más de 1/2 hora.

Una vez cerrada la cubierta de entrada de hombre se hace un barrido del espacio entre aceite y tapa con nitrógeno seco (contenido de humedad máxima de 0.005%). Al mismo tiempo que se suministra nitrógeno se va bajando el nivel del aceite, teniendo cuidado de mantener en el tanque siempre una presión positiva y una vez vaciado el aceite del tanque, se incrementa la inyección de nitrógeno hasta una presión ligeramente superior a 0.25 kg/cm^2 y se deja reposar el transformador con nitrógeno por un período de 24 horas y al final de éste se checa el contenido de humedad con la medición del punto de rocío del nitrógeno, lo cual consiste en medir la temperatura a la cual se igualan las presiones del nitrógeno y del vapor de agua. Con esta temperatura y la presión del gas en el transformador, se obtiene el valor directo de presión de vapor en micrones. Con el valor obtenido de presión de vapor y con la -temperatura ambiente en el transformador se obtiene el porcentaje de humedad residual en el transformador el cual debe ser menor (como una buena regla práctica) de 0.5 %. Es conveniente anotar los siguientes valores:

- a) Número de serie y marca del transformador.
- b) Presión del nitrógeno.
- c) Temperatura ambiente en la medición.
- d) Temperatura de punto de rocío y humedad residual.
- e) Peso de la sílica gel.

Estos datos servirán como referencia en la recepción e instalación de la unidad en campo. Cuando los transformadores se embarcan con su aceite, el nivel de éste se ajusta como sigue:

El Tanques de expansión Si se quita el tanque de expansión para el embarque, se baja el nivel de aceite en el tanque principal de tal manera que la altura del espacio gaseoso sobre el nivel de aceite sea aproximadamente el 5 % de la altura del tanque.

Los Radiadores y Enfriadores si se desensamblan para el embarque, debe procurarse que la mayor cantidad posible de aceite de éstos se embarque en el tanque principal. El tanque puede llenarse hasta un nivel máximo tal que la altura del espacio gaseoso sobre el aceite sea aproximadamente el 5 % de la altura del tanque.

3.4 EMBARQUE.

Este aspecto abarca el empaque, embarque e identificación de partes del transformador y accesorios que se embarcan desensamblados de la unidad principal, para cubrir los requerimientos de transportación que en nuestro país se conocen como gálivos.

Las partes que se van a desensamblar deben marcarse con números de golpe para facilitar el ensamble en la instalación, y las marcas deben ser lo suficiente profundas para que no se tapen con la pintura. Las partes que no se pueden marcar con golpe

pueden identificarse con tarjetas metálicas; esto incluye los conduit, cables de tierra, tubería de cobre, etc., que vayan a ser removidos.

Las partes que van por separado pueden embarcarse con uno o más de los siguientes métodos:

- a) Libres, sobre el piso de la plataforma.
- b) En bolsas de lona o tela, varias de las cuales se colocan dentro de una caja de cartón corrugado.
- c) En cajas de cartón corrugado, las cuales a su vez se colocan dentro de una caja de madera.
- d) En cajas de madera.
- e) En jaulas de madera.
- f) Montadas sobre patines para montacargas.

Cada pieza menor debe identificarse con una tarjeta amarrada a la pieza. En el caso de piezas múltiples, la tarjeta se amarra solo a una pieza. Las cajas de cartón corrugado se usan para contener partes para una función específica, tales como "piezas sueltas de cabeza de boquillas" o "partes de repuesto de radiador".

Las cajas de madera se usan para contener partes para una función general, tales como "Detalles de Boquilla Alta Tensión" o "Detalles de Radiador", etc... Las jaulas de madera se usan para proteger gabinetes, radiadores, etc., de daños y para tener medios de levantamiento y almacenaje de los mismos.

Los patines se usan para tener medios de manejo y facilidades de almacenaje para embarques abiertos. Las partes deben acomodarse sobre la plataforma de detalles de la manera más ventajosa.

Pueden colocarse travesaños cruzados cada 3 metros sobre la plataforma firmemente asegurados a ella, preferentemente con estacas, de manera que el movimiento de un grupo de piezas no provoque el movimiento de los demás grupos. Las cajas, (excepto las jaulas para boquillas) deben bloquearse sólidamente. También se requiere un bloqueo lateral, y las cajas deben asegurarse al piso de la plataforma con bandas de flejes de 0.089 x 3.17 cms (0.035 x 1 1/4 pulgs).

Para embarcar la unidad principal se bloquea en los extremos de la carga utilizando ángulos de hierro de 12.7 x 12.7 x 1.27 cms. Deben soldarse un mínimo de tres ángulos a espacios iguales entre los extremos de la carga y la plancha de la plataforma o a la estructura metálica de ésta. Para unidades de menos de 16 toneladas se acostumbra usar 3 ángulos en cada extremo de la carga y 4 ángulos para unidades de 16 a 30 toneladas.

Además de este bloqueo longitudinal se utilizan ángulos de las mismas dimensiones para cada lado para efectuar un bloqueo lateral y evitar movimiento en esta dirección. Todos los ángulos utilizados para los bloqueos deben sobresalir un mínimo de 5 cms sobre la ceja de la base del transformador. Todos los embarques que alcancen estos requerimientos deben anclarse con varillas rígidas de 2.5 cms de diámetro firmemente aseguradas a las esquinas superiores del tanque del transformador y a la plataforma del carro. La conexión en las esquinas superiores se hace en los ganchos superiores de

levantamiento. Además todas las cargas mayores de 16 toneladas deben llevar varillas similares de los ganchos de levantamiento inferiores a las orillas de la plataforma. En la figura 3.4.1 se puede observar como es transportada la unidad principal de un transformador de potencia.

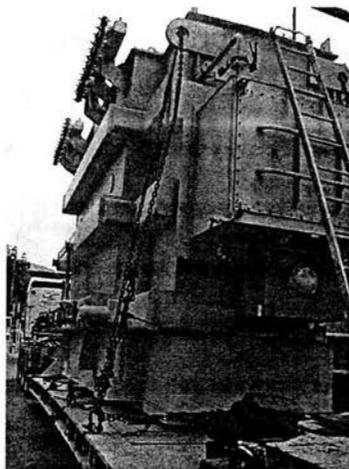


FIGURA 3.4.1 EMBARQUE

3.5 EMBARQUE CON PESOS SUPERIORES A 30 TONELADAS.

Los embarques de unidades de esta clase deben hacerse solo en plataformas con cubierta de acero y ésta debe estar en buenas condiciones en las áreas de soporte de la carga. Es recomendable que la cubierta tenga un espesor mínimo de 1.27 cm. para unidades de 110 toneladas o menos y para unidades de pesos mayores a éste, los puntos de anclaje deben estar sobre los miembros principales de la estructura del carro a menos que la plataforma de éste sea de 1.9 cm. y esté en buena condición. En caso de que no se cumplan estas condiciones, debe reforzarse la plataforma con placas de

acero de 1.9 cm. de espesor para unidades de 200 toneladas y de 2.5 cm de espesor para unidades de 300 toneladas. Las placas deben ser lo suficientemente grandes para cubrir completamente las áreas de soporte y el ancho del carro y van soldadas a éste con un mínimo de soldadura de 1.5 cm. de grueso y con una longitud de 2 veces el ancho del carro.

Algunas unidades poseen características limitativas tales como su peso y dimensión, que impiden utilizar las plataformas y remolques de ferrocarril o traileres usuales. Este es el caso de unidades con pesos hasta de 350 toneladas. Para transportar este tipo de unidades es frecuente el uso de carros de ferrocarril especiales conocidos como plataformas seccionales o plataformas tipo Schnabel. En su forma fundamental los carros Schnabel consisten en dos mitades idénticas que permiten que el transformador viaje suspendido en la parte central.

En estas unidades el equipo principal se utiliza para el desembarque, ya que los embarques se efectúan con grúas especiales tales como las grúas viajeras de gran capacidad existentes en las fábricas o las grúas de ferrocarril. Para los desembarques, estas plataformas llevan dos conjuntos de gatos. Uno de ellos consta de cuatro gatos grandes colocados uno en cada esquina del armazón de la plataforma, y los cuales se utilizan para levantar el transformador. Los otros cuatro gatos se localizan en la parte media de la estructura y se utilizan para maniobrar la estructura de tal modo que los pernos que soportan la carga puedan deslizarse en sus entradas correspondientes.

Para este tipo de transportación, es necesario observar ciertas reglas de seguridad para obtener los mejores resultados. Por ejemplo, los carros deben cargarse y descargarse

sobre tramos de vía rectos, ya que solo así se logra la operación adecuada del sistema de gatos y se evita una posible volcadura de la unidad. En un punto medio de la recta de la vía, y antes de llevar la plataforma hasta allí, se rellena la parte central de la vía entre los rieles hasta una altura aproximadamente igual a la del riel. Se sitúa la plataforma sobre esta parte con la carga directamente sobre el relleno y se procede a la maniobra de descarga. Una vez levantado el transformador quedará un espacio de 25 a 35 centímetros para relleno adicional bajo el transformador, y éste puede deslizarse fuera de la vía mediante placas de acero lubricadas o rieles.

La localización de la vía por la que va a viajar el transformador debe ser tal que, el terreno circundante no se hunda debido al peso de la carga. El transformador no puede descargarse sobre terreno suave porque sería casi imposible deslizar los pernos que lo sujetan a la estructura del carro. Normalmente se utilizan cuatro gatos mecánicos de 100 tons. cada uno para levantar el transformador. Estos gatos se manejan mediante motores de aire con mecanismos reductores accionados con aire proporcionado por una compresora a una presión de 6.5 kg/cm^2 . Se requiere un mínimo de 3 personas en cada gato. Una persona maneja el gato con el motor, una segunda persona mide la altura que se eleva el gato y la tercera maneja un mecanismo transversal en el gato que le permite a éste mantenerse en una posición vertical. Los cuatro gatos pequeños, de 30 toneladas de capacidad, se usan para colocar la estructura de la plataforma en la posición correcta que permite el deslizamiento de los pernos de carga, pero estos gatos nunca deben usarse para levantar la carga.

La longitud del tramo recto de vía sobre el cual va a cargarse o descargarse la plataforma debe ser igual a la longitud de ésta ya cargada más 2 metros en cada extremo. La longitud mínima necesaria podría ser 50 metros. Los dos metros libres en cada extremo se requieren para cuando se separan las dos secciones del carro del transformador.

Algunas características de estos carros son:

a) Para transformador de 230 tons., 3.66 m. ancho por 8.5 m. largo:

- 20 metros de longitud (vacío)

- 99 tons. de peso (vacío)

- Radio mínimo de curvatura recomendable con carga:

61 metros. (El radio mínimo absoluto es de 46 metros y un radio menor que éste puede provocar volcaduras)

b) Para transformador de 340 tons., 3.66 m. ancho por 10 m. largo:

- 24 metros de longitud (vacío)

- 135 tons. de peso (vacío)

- Radio mínimo de curvatura recomendable con carga:

67 metros. (El radio mínimo absoluto es de 55 metros y un radio menor que éste puede provocar volcaduras).

Cada carro o plataforma sobre la cual se embarca un transformador de potencia debe equiparse con un registrador para medir los impactos transmitidos al transformador durante su embarque y traslado. Estos registradores funcionan con mecanismos de

relojería y tienen cuerda para 16 y 30 días de modo que se puede seleccionar su funcionamiento con el tiempo estimado de duración del embarque y la transportación. De preferencia se usan registradores para detectar los impactos en dos direcciones (longitudinal al movimiento y transversal perpendicular al mismo). El dispositivo en sí consta de un peso sujeto por resortes y el mecanismo de reloj que controla el avance de una carta registradora y un juego de planillas para graficar los impactos, y de esta manera se puede detectar la intensidad de los mismos y la fecha y hora en que ocurrieron. Para calibrar el instrumento se procede como sigue.

- a) Se verifica el contacto de la plumilla sobre la carta registradora.
- b) Se asegura la caja del registrador sobre una mesa, en posición vertical y con la tapa abierta.
- c) En esta posición, la plumilla debe marcar el centro de la zona 1.
- d) En un gancho especial se coloca el soporte de los pesos, cuyo peso debe llevar la plumilla hasta la raya que limita la zona 1.
- e) Se coloca un peso de 1.36 kg en el soporte y la plumilla debe ir a la línea que marca la zona 2.
- f) Se añade un peso igual al anterior y la plumilla debe ir a la línea que marca la zona 3.
- g) Otro peso igual, debe llevar la plumilla a la línea de la zona 4.
- h) Se invierte la posición del registrador y se repiten los mismos pasos anteriores.

En cada paso se debe recorrer la carta registradora para que aparezcan las marcas correspondientes. Se permite una tolerancia de diferencia entre las líneas y las marcas de 1 mm. una vez verificado lo anterior, se anota la fecha y hora de arranque, se arranca, se cierra el registrador, se sella y se monta en una caja de madera clavada al

piso de la plataforma. Al llegar la unidad a su lugar de destino, se abre el registrador y se analiza la gráfica.

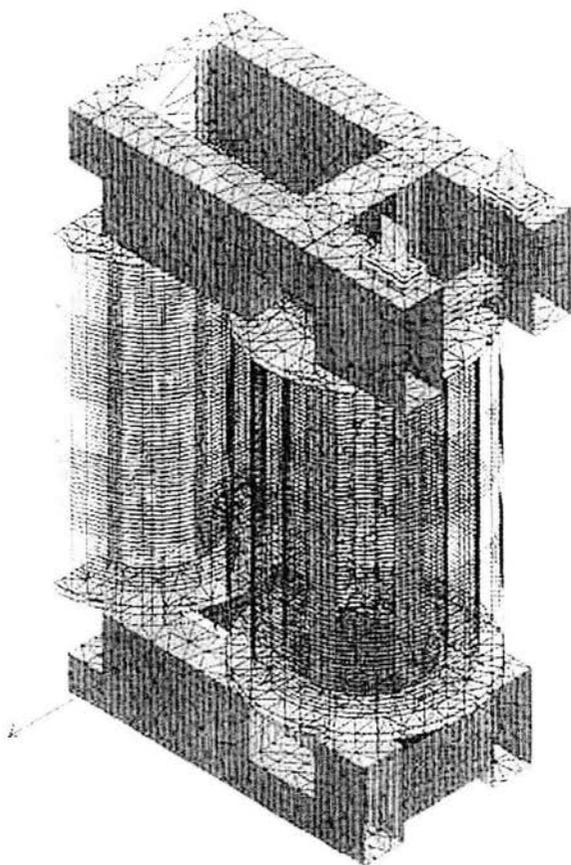
Normalmente todas las partes de un transformador de potencia están diseñadas para soportar una aceleración de 5 g sin dañarse, que corresponde a un impacto a una velocidad de 9 km/hora. Los valores de aceleración vertical rara vez exceden de 2 g. El registro de impactos en zonas 5 o mayores implica transporte rudo y debe hacerse una inspección detallada interna del transformador para comprobar que no se dañó. Se considera normal un transporte con impactos en zonas 1 y 2.

La realización y vigilancia de trabajos de transporte, especialmente cuando se trata de unidades pesadas, van unidas a una gran responsabilidad. Los andamios, aparatos elevadores, vagones, góndolas y plataformas que van a emplearse para las maniobras y el transporte de los transformadores deben elegirse lo suficientemente robustos. Generalmente los problemas de embarque en fábricas no son muchos porque se cuenta con medios adecuados. La carga y descarga, así como el desplazamiento de las unidades tiene que hacerse con los auxiliares apropiados.

En transportes con vagones de ferrocarril, góndolas y plataformas debe procurarse embarcar todas las piezas con orden y evitar que se golpeen al ser transportadas, y también es necesario verificar que no se rebase la carga máxima admisible. Para el envío en vagones de ferrocarril cubiertos hay que tener en cuenta que las puertas tienen sólo 2 metros de altura. Existen también vagones especiales con puertas hasta de 2.60 metros de altura. Por lo demás, han de utilizarse hasta donde sea posible

vagones de ferrocarril con las paredes laterales desmontables, porque en el lugar de la descarga no se tiene siempre una grúa disponible que pueda elevar la carga al otro lado de la pared del vagón. la carga del vagón y el gálibo no deben ser sobrepasados. La carga tiene que repartirse uniformemente sobre los ejes y ballestas del vagón. Se debe tener cuidado de apuntalar y bloquear firmemente los transformadores sobre la plataforma de transporte, pero es necesario hacerlo con mas precaución en los ferrocarriles de vía estrecha, donde el peligro de vuelco es especialmente grande. También hay que prestar un cuidado especial al balasto de las vías para evitar volcaduras por causa de un subsuelo blando. Si no existe ningún enlace de vías farreas en el lugar de destino, el transporte puede efectuarse por carretera sobre camas bajas, con ruedas anchas, pero es necesario consultar con la oficina gubernamental correspondiente que la capacidad de carga de las carreteras y puentes sea suficiente.

CAPITULO 4



**ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ MECÁNICA DE UN
TRANSFORMADOR**

Como se ha mencionado el embarque de transformadores requiere de toda una metodología desarrollada desde el diseño del mismo en la cual se tiene presente que todos aquellos componentes que lleguen a presentar algún obstáculo para la correcta transportación del transformador son retirados de este o bien aquellas partes que debido a su naturaleza presenten problemas o incluso puedan presentarse algún daño durante este periodo son retiradas del transformador para poder realizar la transportación correcta.

Por lo cual las partes principales durante la transportación de los transformadores son el ensamble núcleo-bobinas y tanque, el ensamble núcleo bobinas dentro del tanque esta soportado para evitar movimientos internos contra la pared del tanque y los devanados, los devanados son de forma cilíndrica los cuales son capaces de soportar esfuerzos de corto circuito que son por mucho mayores que los esfuerzos de transporte. Las partes donde se pueden llegar a presentar algún tipo de daño en el transformador son precisamente los soportes de núcleo bobinas llamados bastidores.

El análisis de rigidez mecánica se divide en dos secciones Análisis interno para la parte del ensamble núcleo-bobinas y Análisis externo para la parte del tanque.

4.1 ANÁLISIS INTERNO ENSAMBLE NÚCLEO-BOBINAS

Se tiene que para el transformador tipo columnas Core de 3 fases capacidad de 12/16/20 MVA, 115/13.8 KV, 550/110 KV Bil, cuenta con un enfriamiento OA/FA/FA conexión Delta en alta tensión y conexión "Y" para baja tensión, con un cambiador de carga para alta tensión de (+1,-3 x 2.5%) , 55°C temperatura de aceite y frecuencia de 60 Hz. El ensamble núcleo-bobinas se encuentra restringido para movimientos transversales y longitudinales lo cual el mayor movimiento se presenta en el sentido vertical del ensamble núcleo-bobinas, la aceleración vertical producida durante el transporte del transformador produce un efecto mayor en los bastidores del ensamble núcleo bobinas, ya que la aceleración vertical es de 1.5 g., en sentido vertical se tiene una fuerza que actúa sobre los bastidores, y esta será la masa que soportan los bastidores aceleración vertical producida en el instante de dicha aceleración. En la figura 4.1 se muestra la representación de bastidores los cuales soportan a las bobinas.

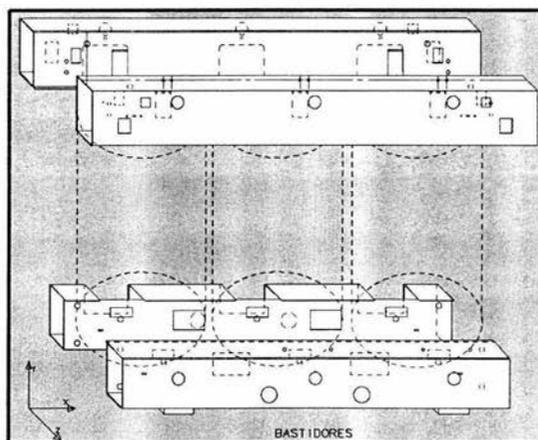


FIGURA 4.1.1 BASTIDORES

La fabricación de cada uno de los bastidores se realiza a través de placas de acero ASTM A-36, el procedimiento de fabricación de estos bastidores es el siguiente una placa de acero de 124.5 plg. × 29.5 plg. × 0.375 plg. con los respectivos cortes requeridos para la circulación de aceite sujeción de accesorios y guías como se aprecia en este dibujo la placa se le realizara un proceso de doblado para poder general un perfil "C". La designación del nombre cada bastidor corresponde al lugar donde se encuentre ubicado el bastidor en el interior del transformador, cada conjunto núcleo bobinas esta soportado por cuatro bastidores como el descrito anteriormente si el bastidor se encuentra del lado de la salida de las guías de alta tensión que por lo regular estas se localizan en la parte superior del conjunto núcleo bobinas, se le asigna así el nombre de bastidor inferior o superior lado alta tensión. Por otro lado si el bastidor se localiza del lado de la salida de las guías de baja tensión que por lo regular se encuentran en la parte inferior del conjunto núcleo bobinas y del lado opuesto a las guías de alta tensión, se le asigna de esta forma el nombre de bastidor superior o inferior lado baja tensión.

La construcción de cada uno de los bastidores representa un análisis diferente para cada bastidor que se toma en cuenta desde el diseño de estos, para el caso del bastidor inferior de lado baja tensión se tuvieron que tomar otros aspectos para su diseño como son los cortes necesarios para la salida de guías de baja tensión, pero en si después de haber diseñado este bastidor la manufactura es la misma llegando a la construcción de un bastidor del lado baja tensión inferior . Los bastidores superiores son diseñados de cierta forma que impidan el movimiento longitudinal del conjunto núcleo bobinas por lo cual estos al general la placa de realización de canal es mayor

que para los batidores inferiores y debido a esta mayor longitud en los bastidores estos son capaces de poderlos sujetar en forma directa del tanque del transformador en este caso la placa para realización de perfil tipo "C" para los batidores superiores es de 143.5 plgs. × 30.9375 plgs. × 0.375 plg. ,posteriormente se procede a realizar la placa de cierre para proporcionar un momento de inercia mayor al bastidor y finalmente unir estas partes para poder llegar a la construcción del bastidor superior .

Después de haber construido los bastidores estos son rígidamente sujetos en grupos tanto los inferiores como los superiores de esta forma se coloca todo el conjunto núcleo bobinas sobre los bastidores, los batidores inferiores son colocados dentro del tanque sobre dos placas que impiden el contacto directo de los bastidores con el fondo del tanque y permiten la circulación del aceite entre el fondo del tanque y los bastidores, los bastidores superiores son sujetos a la pared del tanque a través de placas que permiten una rigidez entre el tanque y el conjunto núcleo bobinas.

La construcción de todos los bastidores permite tener una idea clara del análisis interno del transformador ya que se muestra físicamente los soportes mas importante para la sujeción del conjunto núcleo bobinas y se puede localizar el accionamiento de las carga que actúan en el transformador de esta forma se puede afirmar de una forma clara el movimiento generado por la fuerza de aceleración durante la transportación de este transformador por carretera, los puntos importantes considerados para el análisis de rigidez interno son los apoyos en el que descansa el conjunto núcleo bobinas estos pueden generar mayores esfuerzos en la base del transformador pero estos apoyos están diseñados de una forma tal que la base del transformador cuenta con refuerzos

adicionales para disminuir la cantidad de esfuerzos en esta por lo que la base no presenta ningún riesgo durante la transportación.

La aceleración vertical producida durante el transporte del transformador produce un efecto mayor en los bastidores, por eso tomando en cuenta una aceleración vertical de 1.5 g., en sentido vertical se tendrá una fuerza que actúa sobre el bastidor, y esta será la masa que soportan los bastidores multiplicada por la aceleración vertical producida en el instante de dicha aceleración. Como esto se refiere únicamente en el transporte los bastidores inferiores soportan a las tres bobinas y núcleo de acero del transformador cuyo peso de estos es de 28375 Kg. cerrando el valor a 30000 Kg. por lo tanto la masa del núcleo y bobinas es la siguiente

$$m = \frac{\text{peso}}{\text{gravedad}} = \frac{30\text{ton.}}{9.81} = 3.06 \text{ Ton.}$$

Por consiguiente la fuerza que actúa en dichos bastidores será como se menciona anteriormente y se muestra de la forma siguiente.

$$\begin{aligned} F &= m \times a \\ F &= \frac{30000}{9.81} \times (9.81 \times 1.5) \\ F &= 45000 \text{ kg.} \end{aligned}$$

La construcción física de los bastidores se mostrada anteriormente, cada bastidor esta diseñado para soportar cargas de corto circuito en teoría mayores que las producidas

durante la transportación del transformador, además en la figura 4.1.2 muestra la forma en que actúan las cargas verticales sobre los bastidores.

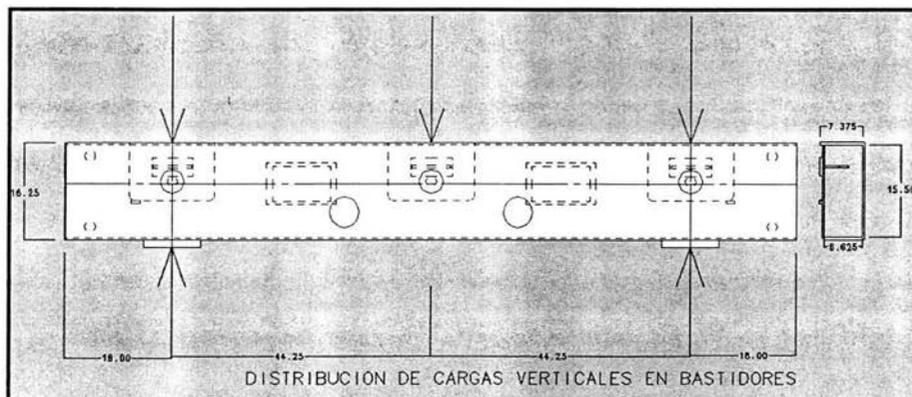


FIGURA 4.1.2 DISTRIBUCIÓN DE CARGAS VERTICALES

Considerando el instante mas critico cuando esta fuerza actúa como una carga concentrada en el centro de los bastidores, en este instante estos soportaran el mayor esfuerzo que se pudiese presentar en la estructura del transformador, a continuación se determinan estos esfuerzos en los bastidores.

4.2 FLEXIÓN EN BASTIDORES.

Las dimensiones de los bastidores se presentan en los dibujos de ensamble de bastidores mostradas anteriormente ya que son de gran importancia para la determinación de los esfuerzos además en estas figuras se localiza la forma de

determinación del momento de inercia del perfil de los bastidores. En el esquema de la figura 4.2.1 se muestra de forma general la situación aparente en el cual se pudiese presentarse este caso que como lo mencioné anteriormente es un caso especial y por lo tanto donde se presenta la mayor concentración de esfuerzos, esto nos proporciona un parámetro importante en donde nos indica un limite que no se puede superar. Además en esta figura se muestran el diagrama de momentos flexionantes que se presentan en los bastidores.

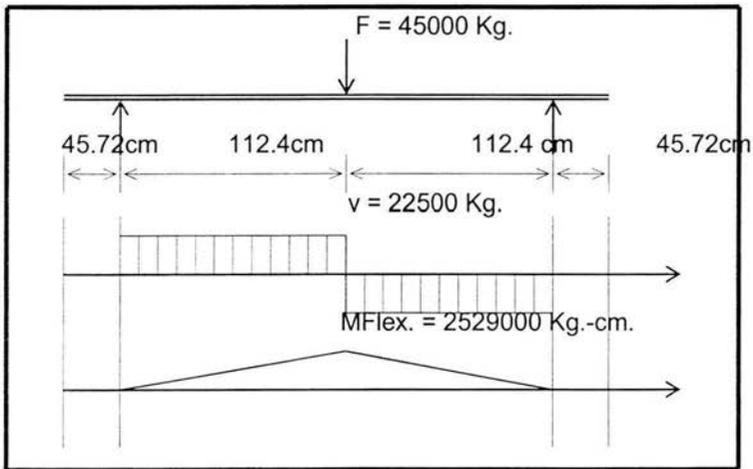


FIGURA 4.2.1 DIAGRAMA DE MOMENTOS

Donde las reacciones en los apoyos son las siguientes:

$$R_B = \frac{45000 \times 112.4}{244.8} = 22500 \text{ Kg.} \quad \therefore R_A = 22500 \text{ Kg.}$$

El momento flexionante determinado a través del diagrama de fuerzas cortantes es el siguiente:

$$M_{Flex.} = 22500 \times 112.4$$

$$M_{Flex.} = 2529000 \text{ Kg} - \text{cm.}$$

por lo tanto la determinación del esfuerzo de trabajo que soportan los bastidores esta dado por el momento flexionante dividido entre el modulo de resistencia a la flexión como se expresa en la siguiente ecuación.

$$\sigma = \frac{M_{Flex.}}{W_{Flex.}}$$

El modulo de la resistencia a la flexión esta dado por el momento de inercia de la sección transversal de los bastidores entre " C " que corresponde a la distancia del eje neutro a la fibra mas alejada del bastidor en el sentido transversal de este, por lo tanto el modulo de la resistencia a la flexión es:

La determinación del momento de inercia para la sección transversal de cada bastidor se muestra en la figura 4.2.2, este es determinado ya sea por el teorema de ejes paralelos o mediante la utilización de un software para computadora este es de 628.3924 plg^4 (26155.66826 cm^4) como son dos los bastidores inferiores que componen al transformador el momento de inercia es el doble.

$$W_{Flex} = \frac{I_{XX}}{C}$$

$$W_{Flex} = \frac{2 \times 26155.66826}{20.6375}$$

$$W_{Flex} = 2534.771 \text{ cm}^3$$

por lo tanto el esfuerzo de trabajo de los bastidores es el siguiente:

$$\sigma = \frac{2529000}{2534.771}$$

$$\sigma = 997.723265 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

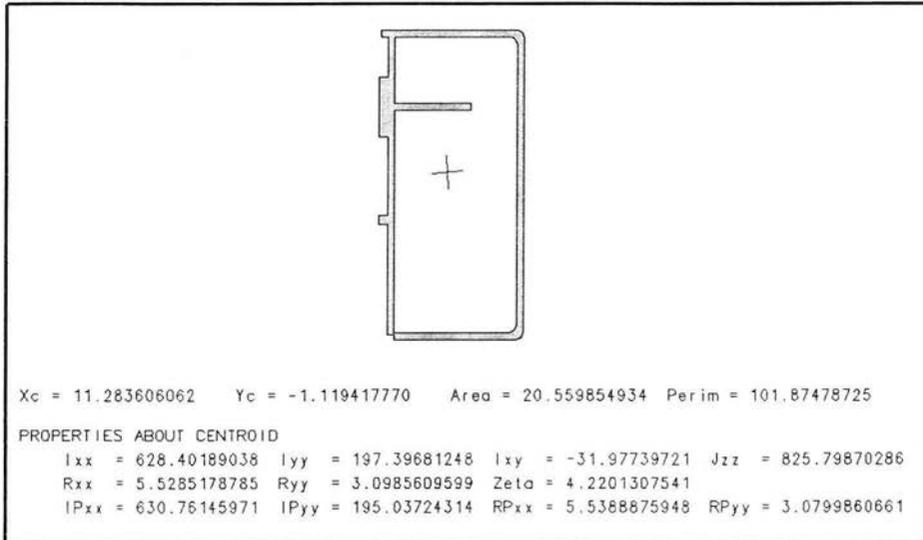


FIGURA 4.2.2 MOMENTO DE INERCIA DE BASTIDORES

La deformación que se presenta en este caso es:

$$y = \frac{PL^3}{48EI}$$

$$y = \frac{45000 \times (224.8)^3}{48 \times (2.1 \times 10^6) \times (2 \times 26155.66826)}$$

$$y = 0.0969493 \text{ cm.}$$

Comparando el esfuerzo máximo permisible del material con el esfuerzo de trabajo de los bastidores, el material que se utiliza en los bastidores es acero estructural ASTM. A-36 con las siguientes propiedades.

$$\sigma_y = 36 \text{ KSI.}$$

$$\sigma_u = 60 \text{ KSI.}$$

$$E = 29 \times 10^3 \text{ KSI.}$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{Max.Perm} = CVC \times \sigma_y$$

$$\sigma_{Max.Perm} = \frac{2}{3} \times 2531.058193$$

$$\sigma_{Max.Perm} = 1687.3721 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

4.3 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD.

El factor de seguridad relaciona tanto al esfuerzo máximo permisible del material como al esfuerzo de trabajo que actúa sobre los bastidores como se muestra a continuación.

$$\sigma = \frac{\sigma_{Max.Per}}{F.S.}$$

$$\therefore F.S. = \frac{\sigma_{Max.Per}}{\sigma}$$

$$F.S. = \frac{1687.3721}{997.723265}$$

$$F.S. = 1.6912$$

Se podría afirmar que en el instante en que ocurre la aceleración de 1.5 g en sentido vertical para este caso los bastidores soportarían esta aceleración con un factor de seguridad de 1.69 que relativamente es cercano el valor del esfuerzo de trabajo del bastidor al esfuerzo máximo del material. Teniendo en cuenta que estos resultados son para el caso mas critico que puede encontrarse afectando a los bastidores.

Ahora bien en un segundo caso en donde mas se aproxima al del transformador, en este las bobinas y el núcleo de acero son soportadas por los dos bastidores inferiores, por lo tanto el peso de cada bobina es considerado como una carga puntal distribuida sobre la longitud de los bastidores.

En el diagrama de la figura 4.3.1 se aprecia de forma general este caso donde las tres carga concentradas representan el peso de las bobina y el núcleo de acero. En el instante en que la fuerza actua en cada uno de los bastidores estos tienden a ser flexionados de tal forma que están sometidos a esfuerzos flexionantes esto involucra las propiedades físicas de cada bastidor por lo que en la figuras anteriores se muestra las características de estos. El material utilizado para la fabricación de estos bastidores es acero estructural ASTM. A-36 con un esfuerzo a la cedencia $\sigma_y = 36$ KSI, esfuerzo ultimo $\sigma_u = 60$ KSI, y modulo de elasticidad de $E = 29 \times 10^3$ KSI.

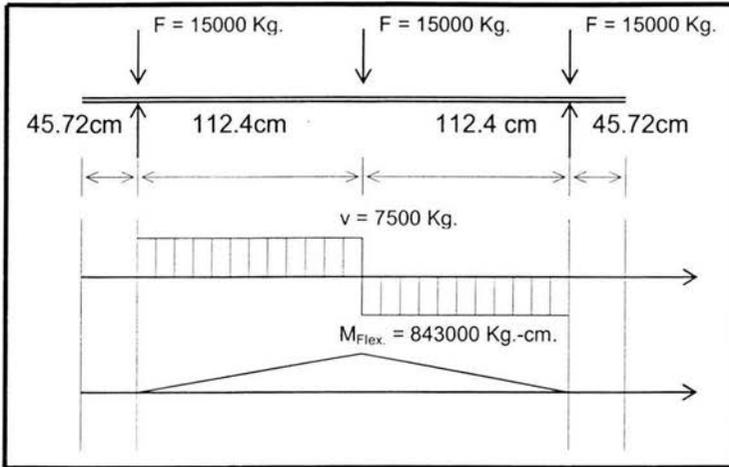


FIGURA 4.3.1 DIAGRAMA DE MOMENTOS FLEXIONANTES

Las reacciones en los soporte de los bastidores son las siguientes:

$$\sum M_A = (15000 \times 112.4) + (15000 \times 224.8) - (R_B \times 224.8)$$

$$R_B = \frac{(15000 \times 112.4) + (15000 \times 224.8)}{224.8} = 22500 \text{ Kg.} \quad \therefore R_A = 22500 \text{ Kg.}$$

El momento flexionante determinado a través del diagrama de fuerzas cortantes en este caso es el siguiente:

$$M_{Flex.} = 7500 \times 112.4$$

$$M_{Flex.} = 843000 \text{ Kg} - \text{cm.}$$

Ahora bien la determinación del esfuerzo de trabajo que se presentan en los bastidores esta dado por el momento flexionante dividido por el modulo de resistencia a la flexión como se expresa en la siguiente ecuación.

$$\sigma = \frac{M_{Flex}}{W_{Flex}}$$

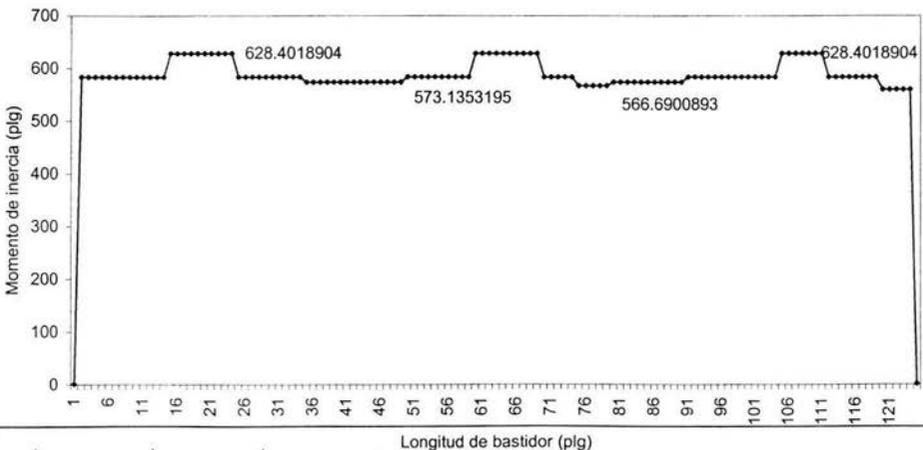
Los bastidores no son de una sección transversal constante por lo que el momento de inercia para fines de calculo es el momento mas critico. En las siguientes graficas siguientes se representa la forma en que actúa el momento de inercia de los bastidores respecto a la longitud de los estos. El momento de inercia para la sección transversal de cada bastidor es de 628.3924 plg^4 (26155.6826 cm^4) como son dos los bastidores inferiores que componen al transformador el momento de inercia es el doble.

$$W_{Flex} = \frac{I_{XX}}{C}$$

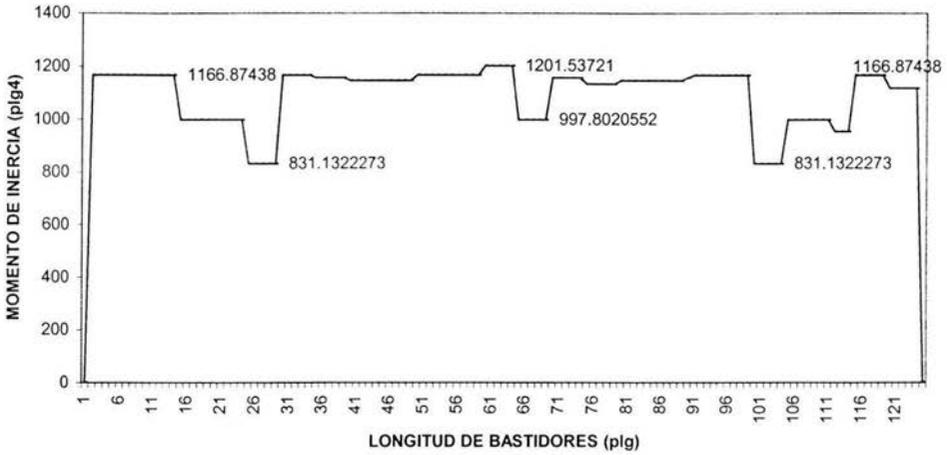
$$W_{Flex} = \frac{2 \times 26155.66826}{20.6375}$$

$$W_{Flex} = 2534.771 \text{ cm}^3$$

Grafica N.1 Bastidor-Momento de inercia
Bastidor de baja tension



GRAFICA N.2 BASTIDORE-MOMENTO DE INERCIA
BASTIDOREI DE ALTA TENSION



por lo tanto el esfuerzo de trabajo de los bastidores es el siguiente:

$$\sigma = \frac{843000}{2534.771}$$

$$\sigma = 332.5744 \frac{kg}{cm^2}$$

La deformación que se presenta en este caso es:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M_x$$

$$M_x = -(15000 < x - 45.72 >) + (22500 < x - 45.72 >) - (15000 < x - 158.12 >) + (22500 < x - 270.52 >) - (15000 < x - 270.52 >)$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = (15000 < x - 45.72 >) - (22500 < x - 45.72 >) + (15000 < x - 158.12 >) - (22500 < x - 270.52 >) + (15000 < x - 270.52 >)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = (7500 < x - 45.72 >^2) - (11250 < x - 45.72 >^2) + (7500 < x - 158.12 >^2) \\ - (11250 < x - 270.52 >^2) + (15000 < x - 270.52 >) + C_1$$

$$EIy = (2500 < x - 45.72 >^3) - (3750 < x - 45.72 >^3) + (2500 < x - 158.12 >^3) \\ - (3750 < x - 270.52 >^3) + (15000 < x - 270.52 >) + C_1x + C_2$$

Cuando $x = 45.72$ cm. $y_A = 0$ cm.

$$EIy_A = 45.72C_1 + C_2$$

$$C_2 = -45.72C_1$$

Cuando $x = 270.52$ cm. $y_B = 0$ cm.

$$EIy_B = -10.65 \times 10^9 + 270.52C_1 + C_2$$

$$C_2 = 10.65 \times 10^9 - 270.52C_1$$

$$\therefore C_1 = 4737660 \quad Y \quad C_2 = -2166058152.$$

$$EIy_{Max} = -3893724832$$

$$y_{Max} = \frac{-3893724832}{2.1 \times 10^6 \times 2 \times 26155.66826}$$

$$y_{Max} = -0.03544460 \text{ cm.}$$

Como se menciona el material utilizado es acero estructural ASTM A-36 con las características utilizadas anteriormente respecto a sus propiedades mecánicas, y el esfuerzo máximo permisible de este material utilizado es como se indica a continuación.

$$\sigma_{Max.Perm} = CVC \times \sigma_y$$

$$\sigma_{Max.Perm} = \frac{2}{3} \times 2531.058193$$

$$\sigma_{Max.Perm} = 1687.3721 \frac{kg}{cm^2}$$

El factor de seguridad se determina con la formula anterior que es:

$$\sigma = \frac{\sigma_{Max.Per}}{F.S.}$$
$$\therefore F.S. = \frac{\sigma_{Max.Per}}{\sigma}$$
$$F.S. = \frac{1687.3721}{332.5744} = 5$$

Para este caso que es como se comportan la fuerzas que actúan sobre el bastidor del transformador y en el instante que ocurre una aceleración de 1.5 g en sentido vertical se encuentra un margen de seguridad de 5 respecto al esfuerzo máximo permisible del material.

4.4 DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA NATURAL.

Considerando una viga con carga concentrada, se desarrollará un método aproximado para el cálculo de la frecuencia de vibración natural de los bastidores inferiores del transformador. Como la masa de las bobinas y núcleo es suficientemente grande con respecto a los bastidores el peso de estos se despreciará. Utilizando el método de energías donde la suma de la energía potencial más la energía cinética de un punto dado en el bastidor será igual a la suma de las energías tanto potencial como cinética de un segundo punto dentro del mismo bastidor.

Expresado de esta forma $E_{c1} + E_{p1} = E_{c2} + E_{p2}$.

La vibración en un sistema de este tipo, la energía cinética es cero en el momento del máximo desplazamiento; la energía potencial es un máximo en ese momento. A la inversa, la energía potencial es cero y la energía cinética es un máximo en el momento de cero desplazamiento. Por lo tanto es posible determinar ciertas características del sistema igualando la energía potencial máxima con la energía cinética máxima. Por lo mencionado anteriormente, la posición del punto numero uno es aquel donde la energía cinética es máxima y energía potencial nula ($E_{c1}=\text{Max}$ y $E_{p1}=0$). Como posición del punto numero dos aquella en la cual la energía potencial es máxima y la energía cinética es nula ($E_{p2}=\text{Max}$ y $E_{c2}=0$). Por lo tanto la igualdad de energías máximas cinética y potencial queda representada de la siguiente forma. $E_{c\text{Máx}} = E_{p\text{Máx}}$. Esta igualdad permitirá el calculo para la determinación de la frecuencia natural en este sistema. En el caso de la viga que simula a los bastidores del transformador, como estos no son de una sección transversal constantes se recurrirá a un método aproximado para determinar la deformación y por lo tanto la ecuación de la elástica del sistema en estudio. Considerando una viga de sección constante, simplemente apoyada, que vibra. como se aprecia en el siguiente diagrama de la figura

4.4.1

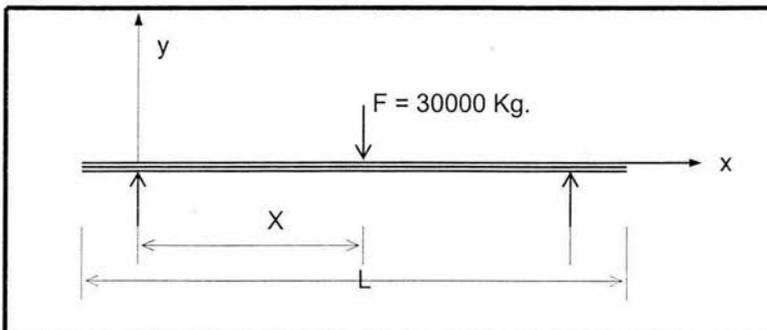


FIGURA 4.4.1 VIGA DOBLEMENTE EMPOTRADA

La deflexión entre un punto cualesquiera del bastidor del eje neutro de accisa x, es variable respecto al tiempo de tal manera que $y = \gamma (x , t)$. O sea que esta en función directa con el tiempo. Esta ecuación se supone de la siguiente forma:

$$y(x) = y_o \text{sen} \times \frac{\pi x}{l}$$

se considera que cada elemento de la viga experimenta un movimiento armónico a la frecuencia natural ω_n expresado por la siguiente ecuación:

$$y(x,t) = y_o \text{sen} \times \frac{\pi x}{l} \times \text{sen } \omega_n t$$

Esta ecuación nos indica que al vibrar la viga conserva la misma forma fundamental y que solo la amplitud de la deflexión, varia con el tiempo, esto corresponde a la frecuencia mas baja posible. Para poder aplicar este método se calcula la energia potencial y cinética de movimiento del bastidor. Donde la energia potencial es:

$$dEp = \frac{E}{2} \left(y \frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dA dx$$

$$\int a y^2 dA = I$$

Integrando la diferencial de energia potencial se tiene :

$$Ep = \int_0^l \frac{EI}{2} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx$$

o bien;

$$Ep = -\frac{1}{2} \int_0^l M d\theta$$

$$Ep = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{(M_{flex})^2}{EI} dx$$

$$Ep = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{d^2 y}{dx} \right)^2 dx$$

La energía cinética se determina sustituyendo la masa de un incremento de sección de viga en el eje "x" que este incremento de masa es μdx ; conociendo que la energía cinética es un medio de la masa por la velocidad elevada al cuadrado se tiene que:

$$dEc = \frac{1}{2} \mu dx \dot{y}^2$$

$$Ec = \frac{1}{2} \int \mu \dot{y}^2 dx$$

De la ecuación supuesta para el movimiento de la viga en el sentido vertical obtenemos

tanto a \dot{y} como a $\frac{d^2y}{dx^2}$ que corresponden a la primer derivada del desplazamiento respecto al tiempo y de la segunda derivada del desplazamiento vertical respecto al desplazamiento horizontal, o sea la deformación vertical de la viga. Como se muestra a continuación.

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = y_o w_n \text{sen} \frac{\pi x}{l} \times \cos w_n t ;$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = y_o \frac{\pi^2}{l^2} \text{sen} \frac{\pi x}{l} \times \text{sen} w_n t$$

Como se menciona anteriormente la energía potencial máxima ocurre cuando $\text{sen} w_n t = 1$; correspondientemente a la máxima energía cinética ocurre cuando $\cos w_n t = 1$ efectuando las sustituciones correspondientes en las ecuaciones anteriores se tiene que:

$$Ep_{Max} = \frac{EI}{2} \int \frac{y_o^2 \pi^4}{l^4} \text{sen}^2 \frac{\pi x}{l} dx$$

$$Ec_{Max} = \frac{\mu}{2} \int_0^l y_o^2 w_n \text{sen} \frac{\pi x}{l} dx$$

Igualando las expresiones anteriores y realizando las integraciones correspondientes de energía máxima se obtiene la frecuencia a través de este método.

$$\frac{EI y_o^2 \pi^4}{4l^3} = \frac{\mu y_o^2 w_n l}{4}$$

$$\therefore w_n = \sqrt{\frac{\pi^4 EI}{l^4 \mu}}$$

$$w_n = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}}$$

Sustituyendo los valores:

$$w_n = \frac{\pi^2}{(224.8)^2} \sqrt{\frac{(2.1 \times 10^6) \times 26155.6826 \times 316.23}{30000}}$$

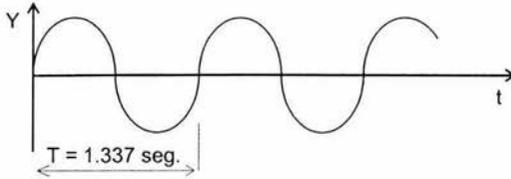
$$w_n = 4.699383 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} w_n$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} 4.699383$$

$$f_n = 0.74793 \text{ CPS [Hz]}$$

Hay que tener en cuenta que el movimiento supuesto que presenta el transformador es un movimiento armónico representado gráficamente de la siguiente forma, también hay que considerar que el movimiento del bastidor no se expresa realmente con la ecuación del movimiento del sistema.



Considerando un segundo método para el calculo de la frecuencia natural del sistema en donde se requiere conocer la ecuación de la curva que produce la elástica de deformación de la viga. Para un inciso A se tiene una carga concentrada en el centro del bastidor con la cual se deberá determinar su ecuación de deformación.

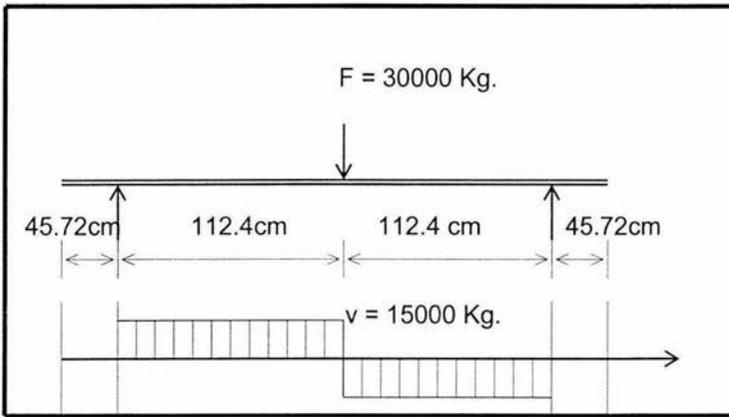


FIGURA 4.4.2 VIGA DOBLEMENTE EMPOTRADA CON CARGA AL CENTRO VIGA

Determinación de la ecuación de deformación de la viga.

$$R_B = \frac{30000 \times 112.4}{244.8} = 15000 \text{ Kg.} \quad \therefore R_A = 15000 \text{ Kg.}$$

$$M_x = \frac{F}{2}(x)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M_x$$

$$M_x = -\frac{F}{2}(x)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{F}{2}(x)$$

Integrando.

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{F}{4}x^2 + C_1$$

$$EI y = -\frac{F}{12}x^3 + C_1 x + C_2$$

Cuando $x = 0$ cm. $y_A = 0$ cm.

$$0 = 0 + C_2$$

$$C_2 = 0$$

Cuando $x = \frac{l}{2}$ $\theta = 0$ cm.

$$0 = -\frac{F}{4} \left(\frac{l^2}{4} \right) + C_1$$

$$\therefore C_1 = \frac{Fl^2}{16}$$

Cuando $x = \frac{l}{2}$ $y = \text{Max}$

$$EI y_{\text{Max}} = -\frac{F}{12} \left(\frac{l^3}{8} \right) + \frac{Fl^2}{16} \left(\frac{l}{2} \right)$$

$$EI y_{\text{Max}} = -\frac{Fl^3}{96} + \frac{Fl^3}{32}$$

$$EI y_{\text{Max}} = \frac{Fl^3}{48EI}$$

La fuerza que actúa sobre los bastidores es la misma que se presenta en la viga como respuesta de la primera y esta dada por la ecuación:

$$F' = K_{Eq} \times y_{Max}$$

Donde:

F Es la fuerza que actúa sobre los bastidores.

KEq. Es el modulo de rigidez de los bastidores.

YMax. Es la deformación máxima en el sentido vertical de los bastidores.

Pero la fuerza que actúa sobre los bastidores esta directamente involucrada con la aceleración del bastidor en sentido vertical.

$$F' = m \times a$$

sustituyendo en la ecuación anterior.

$$m \times a = K_{Eq} \times y_{Max}$$

$$\frac{F \times a}{g} = \frac{K_{Eq} \times F \times l^3}{48EI}$$

$$K_{Eq} = \frac{48EIa}{gl^3}$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K_{Eq}}{m}}$$

$$w_n = \sqrt{\frac{48EIag}{Fl^3}}$$

Sustituyendo valores obtenemos la frecuencia fundamental.

$$w_n = \sqrt{\frac{48 \times (2.1 \times 10^6) \times 26155.6826 \times 9.81 \times 1.5}{30000 \times (224.8)^3}}$$

$$w_n = 10.6693 \frac{rad}{seg}$$

Determinación del periodo de oscilación.

$$T = \frac{2\pi}{w_n}$$

$$T = \frac{2\pi}{10.6693}$$

$$T = 0.588899 \text{ seg.}$$

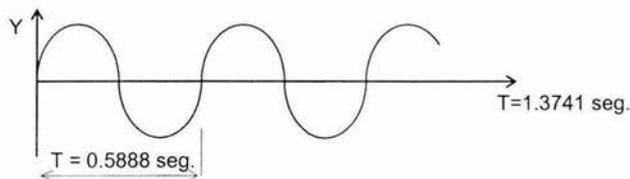
Determinación de la frecuencia natural.

$$F_n = \frac{w_n}{2\pi}$$

$$F_n = \frac{10.6693}{2\pi}$$

$$F_n = 1.698071 \text{ CPS [Hz]}$$

Como se menciona anteriormente la fuerza esta relacionada con movimiento armónico simple de la siguiente forma $F(t) = F_o \cos w_n t$ donde este movimiento se representa de la misma forma que en caso anterior.



La fuerza cortante que actúa sobre la viga. esta fuerza cortante esta dada de acuerdo al diagrama de fuerzas cortantes mostrado anteriormente donde $v = F_o = 15000 \text{ Kg}$.

Teniendo como ecuación del movimiento para el sistema

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t)$$

sustituyendo la fuerza armónica en la ecuación anterior.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_o \cos w_n t$$

para este caso $C = 0$

dentro de lo que se refiere al desplazamiento "y" este esta dado por dos estados uno transitorio y otro estable y se representan de la siguiente forma.

1.- Estado transitorio representado por $y = y_h$.

2.- Estado estable representado por $y = y_p$.

Ahora la ecuación del estado transitorio será:

$$m\ddot{y}_h + c\dot{y}_h + ky_h = 0$$

y y_h esta dada por la ecuación

$$y_h = Ae^{-c\omega_n t} \text{sen}(w_n t + \theta_o)$$

En el estado estable será la otra ecuación.

$$m\ddot{y}_p + c\dot{y}_p + ky_p = F_o \cos w_n t$$

como $c = 0$

$$m\ddot{y}_p + ky_p = F_o \cos w_n t$$

y y_p esta dada por la ecuación

$$y_p = C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t$$

Derivando esta ecuación con respecto al tiempo para obtener la velocidad.

$$\dot{y}_p = -C_1 w_n \text{sen} w_n t + C_2 w_n \cos w_n t$$

La segunda derivada de la ecuación para obtener la aceleración.

$$\ddot{y}_p = -C_1 w_n^2 \cos w_n t + C_2 w_n^2 \text{sen} w_n t$$

o bien $\ddot{y}_p = -w_n^2 \times y$

Sustituyendo los valores de velocidad y aceleración en la ecuación

$$m\ddot{y}_p + c\dot{y}_p + ky_p = F(t)$$

$$m[-w_n^2(C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t)] + k[(C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t)] = 0 \text{sen} w_n t + F_o \cos w_n t$$

$$-w_n^2 m(C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t) + k[C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t] = 0 \text{sen} w_n t + F_o \cos w_n t$$

$$(k - w_n^2 m)(C_1 \cos w_n t) + (k - w_n^2 m)(C_2 \text{sen} w_n t) = 0 \text{sen} w_n t + F_o \cos w_n t$$

cuando:

$$(k - w_n^2 m)(C_2 \text{sen} w_n t) = 0 \text{sen} w_n t$$

$$\therefore C_2 = 0$$

cuando se presenta el siguiente caso:

$$(k - w_n^2 m)(C_1 \cos w_n t) = F_o \cos w_n t$$

$$F_o = \frac{k - w_n^2 m (C_1 \cos w_n t)}{(C_1 \cos w_n t)}$$

$$F_o = k - m w_n^2 C_1$$

$$\therefore C_1 = \frac{F_o}{(k - m w_n^2)}$$

De la ecuación $y_p = C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t$ se tiene que

$$y_p = C_1 \cos w_n t$$

$$C_1 = \frac{y_p}{\cos w_n t}$$

Igualando estas ecuaciones

$$\frac{F_o}{(k - m w_n^2)} = \frac{y_o}{\cos w_n t}$$

$$y_p = \frac{F_o}{k - m w_n^2} \times \cos w_n t$$

Sustituyendo valores.

$$k = \frac{48EI}{l^3}$$

$$k = \frac{48 \times (2.1 \times 10^6) \times 26155.6826}{(224.8)^3}$$

$$k = 232079.9755 \frac{Kg}{cm}$$

$$y_p = \frac{15000}{232080 - [3058.1039 \times (10.6693)^2]} \times \cos(10.6693 \times t)$$

$$y_p = 0.0977483 \text{ cm}$$

Esta es la deformación máxima que se puede presentar en los bastidores en movimiento con el caso donde la carga es crítica o sea que es concentra en el centro de los bastidores. Ahora bien en el inciso B en donde se aproxima a la forma que presenta el transformador. En el diagrama de la figura 4.4.2 se aprecia de forma general este inciso y se procederá a determinar la frecuencia natural del sistema mostrado.

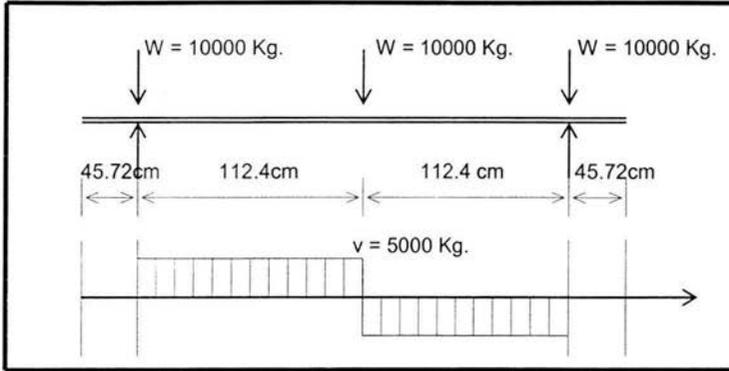


FIGURA 4.4.3 VIGA DOBLEMENTE APOYADA CON TRES CARGAS CONCENTRADAS.

El procedimiento de calculo para este caso es el mismo obtenido anteriormente por lo tanto se realizara de la siguiente forma. Determinamos de la ecuación de la elástica.

$$\sum M_A = (W \times l) - (R_b \times l) + \left(W \times \frac{l}{2} \right)$$

$$R_b = W + \frac{W}{2} = \frac{3W}{2} \quad \therefore \quad R_A = \frac{3W}{2}$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M_x$$

$$M_x = -Wx + R_A x - W \left(x - \frac{l}{2} \right)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = Wx - R_A x + W \left(x - \frac{l}{2} \right)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{Wx^2}{2} - \frac{3Wx^2}{4} + \frac{W}{2} \left(x - \frac{l}{2} \right)^2 + C_1$$

$$EIy = \frac{Wx^3}{6} - \frac{3Wx^3}{4} + \frac{W}{6} \left(x - \frac{l}{2} \right)^3 + C_1 x + C_2$$

Cuando $x = 0$ cm. $y_A = 0$ cm.

$$0 = 0 + C_2$$

$$C_2 = 0$$

Cuando $x = \frac{l}{2}$ $\theta = 0$

$$0 = -\frac{w}{2} \left(\frac{l^2}{4} \right) + -\frac{3w}{4} \left(\frac{l^2}{4} \right) + C_1$$

$$\therefore C_1 = \frac{Wl^2}{16}$$

Cuando $x = \frac{l}{2}$ $y = \text{Max}$

$$EIy_{\text{Max}} = -\frac{W}{6} \left(\frac{l^3}{8} \right) - \frac{W}{4} \left(\frac{l^3}{8} \right) + \frac{Wl^2}{16} \left(\frac{l}{2} \right)$$

$$EIy_{\text{Max}} = -\frac{Wl^3}{48} - \frac{Wl^3}{32} + \frac{Wl^3}{32}$$

$$EIy_{\text{Max}} = \frac{Wl^3}{48EI}$$

Determinación del modulo de rigidez de la viga.

$$F' = K_{Eq} \times y_{\text{Max}}$$

$$m \times a = K_{Eq} \times y_{\text{Max}}$$

$$\frac{F' \times a}{g} = \frac{K_{Eq} \times F' \times l^3}{48EI}$$

$$K_{Eq} = \frac{48EIa}{gl^3}$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K_{Eq}}{m}}$$

sustituyendo valores.

$$w_n = \sqrt{\frac{48Elag}{Wl^3g}}$$

$$w_n = \sqrt{\frac{48 \times (2.1 \times 10^6) \times 26155.6826 \times 9.81 \times 1.5}{10000 \times (224.8)^3}}$$

$$w_n = 18.4798 \frac{rad}{seg}$$

Determinación del periodo de oscilación.

$$T = \frac{2\pi}{w_n}$$

$$T = \frac{2\pi}{18.4798}$$

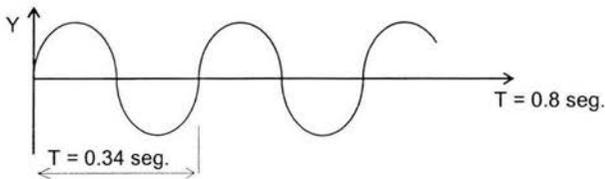
$$T = 0.34 \text{ seg.}$$

Determinación de la frecuencia natural.

$$F_n = \frac{w_n}{2\pi}$$

$$F_n = \frac{18.4798}{2\pi}$$

$$F_n = 2.9411 \text{ CPS [Hz]}$$



Determinación de la fuerza cortante que actúa sobre la viga.

$$V = W_o = 5000 \text{ Kg.}$$

Teniendo como ecuación del movimiento para el sistema

$$m\ddot{y}_p + c\dot{y}_p + ky_p = W_o \cos w_n t$$

para este caso $c = 0$

$$m\ddot{y}_p + k y_p = W_o \cos w_n t$$

y y_p esta dada por la ecuación

$$y_p = C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t$$

Derivando esta ecuación con respecto al tiempo para obtener la velocidad.

$$\dot{y}_p = -C_1 w_n \text{sen} w_n t + C_2 w_n \cos w_n t$$

La segunda derivada de la ecuación para obtener la aceleración.

$$\ddot{y}_p = -C_1 w_n^2 \cos w_n t + C_2 w_n^2 \text{sen} w_n t$$

o bien $\ddot{y}_p = -w_n^2 \times y$

Sustituyendo los valores de velocidad y aceleración en la ecuación

$$m\ddot{y}_p + c\dot{y}_p + k y_p = F(t)$$

$$m[-w_n^2(C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t)] + k[(C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t)] = 0 \text{sen} w_n t + W_o \cos w_n t$$

$$-w_n^2 m(C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t) + k[C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t] = 0 \text{sen} w_n t + W_o \cos w_n t$$

$$(k - w_n^2 m)(C_1 \cos w_n t) + (k - w_n^2 m)(C_2 \text{sen} w_n t) = 0 \text{sen} w_n t + W_o \cos w_n t$$

cuando:

$$(k - w_n^2 m)(C_2 \text{sen} w_n t) = 0 \text{sen} w_n t$$

$$\therefore C_2 = 0$$

$$(k - w_n^2 m)(C_1 \cos w_n t) = W_o \cos w_n t$$

$$W_o = \frac{k - w_n^2 m(C_1 \cos w_n t)}{(C_1 \cos w_n t)}$$

$$W_o = k - m w_n^2 C_1$$

$$\therefore C_1 = \frac{W_o}{(k - m w_n^2)}$$

De la ecuación $y_p = C_1 \cos w_n t + C_2 \text{sen} w_n t$ se tiene que

$$y_p = C_1 \cos w_n t$$

$$C_1 = \frac{y_p}{\cos w_n t}$$

Igualando estas ecuaciones

$$\frac{W_o}{(k - m w_n^2)} = \frac{y_o}{\cos w_n t}$$

$$y_p = \frac{W_o}{k - m w_n^2} \times \cos w_n t$$

Sustituyendo valores.

$$k = 232079.9755 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}}$$

$$y_p = \frac{5000}{232080 - [3058.1039 \times (18.4798)^2]} \times \cos(18.4798 \times 1)$$

$$y_p = \underline{0.0057073 \text{ cm}}$$

Esta es la deformación máxima que presentan los bastidores del transformador cuando este se encuentra con un movimiento de 1.5 g en el sentido vertical. Para este tipo de transformador, para estas condiciones y por supuesto en el instante en que ocurre la aceleración vertical los miembros estructurales en particular los bastidores presentan un margen de seguridad de 5 respecto al esfuerzo máximo permisible del material. Y además la deformación máxima que se presenta en los bastidores del transformador cuando este se encuentra con este movimiento vertical es de 0.0057 cm aclarando que los partes internas no sufrirán daño alguno durante su transportación.

4.5 ANÁLISIS EXTERNO DEL TRANSFORMADOR

La unida principal es preparada para su embarque de acuerdo a lo mencionado anteriormente por lo cual el transformador se presenta como se muestra en la figura 55 el tanque esta fabricado de tal forma que los miembros estructurales no sufran deformaciones permanentes durante el periodo de funcionamiento, la manufactura del tanque comienza con el diseño de este para una presión de 15 psi. bajo las condiciones de recipiente sujeto a presion, el tanque esta integrado por diferentes partes las cuales son:

Fondo.

Base.

Panel "X".

Panel "Y".

Panel "Z".

Panel "W".

Refuerzos.

Cubierta.

Accesorios.

Todas las partes del transformador son fabricadas por separado para posteriormente realizar la unión de estas, el fondo del transformador consta de una placa de acero ASTM A-36 de 153 plgs. × 81 plgs. × 0.625 plgs. A esta se le colocan refuerzos de placas de acero ASTM A-36 con perfil "C" para así formar la base del transformador, la distribución de las paredes se realiza de una forma tal que la pared colocada del lado

de las boquillas de baja tensión se le asigna el nombre de panel "X" a la pared opuesta a esta o sea la pared localizada del lado de las boquillas de alta tensión se le asigna el nombre de panel "Z" , la localización de los paneles "Y" y "W" se realiza a partir del panel "X" el panel inmediato en sentido horario se le asigna el nombre de panel "Y" , de la misma forma el panel "Z" el panel inmediato en el sentido horario se le asigna el nombre de panel "W", el caso del transformador presentado la localización de los paneles es relativamente fácil pero en diferentes transformadores esto causa algunas dificultades debido a diseño propio de cada transformado, la localización de boquillas, o tanque de diversas formas geométrica. Los paneles son fabricados a partir de placas de acero ASTM A-36 colocándoles refuerzos uniformemente distribuidos, de la misma forma la cubierta esta diseñada para soportar una presión interna de hasta 15 psi., en los paneles "Y" y "W" son colocadas las placas de sujeción del conjunto núcleo bobinas. Después de esta breve descripción de la manufactura del tanque se procede al análisis del mismo. El análisis del tanque es uno de los puntos mas importantes ya que en este se inducen las fuerzas generadas por las aceleraciones en el transformador y justo aquí se tiene una respuesta inmediata a estas fuerzas, la manera de contrarrestar el movimiento el movimiento del transformador es por medio de cables tensionadores, para poder mantener el transformador en un sitio fijo y que al actuar estas fuerzas, debidas a las aceleraciones este mantenga la posición menos critica debido al esfuerzo que se llega a presentar al actuar las fuerzas de aceleración por lo cual son colocados estos cables. Los cables de sujeción del transformador actúan en diferentes formas debido a que las fuerzas producidas por las aceleraciones no corresponden en un mismo sentido además las fuerzas producidas por las aceleraciones se presentan en tres ejes coordenados.

En el diagrama de la Figura 4.5.1 se presentan en forma general las fuerzas que actúan en el tanque del transformador, en este diagrama las fuerzas que actúan debido a las aceleraciones en el transporte se inducen en el centro de gravedad del transformador, al analizar el transformador como conjunto se requiere conocer la respuesta al sistema principal, para poder conocer esta respuesta se analizara el sistema en forma tridimensional de esta forma se determinaran las tensiones en los cables de sujeción los cuales son una respuesta inmediata a la aceleración producida en el transformador.

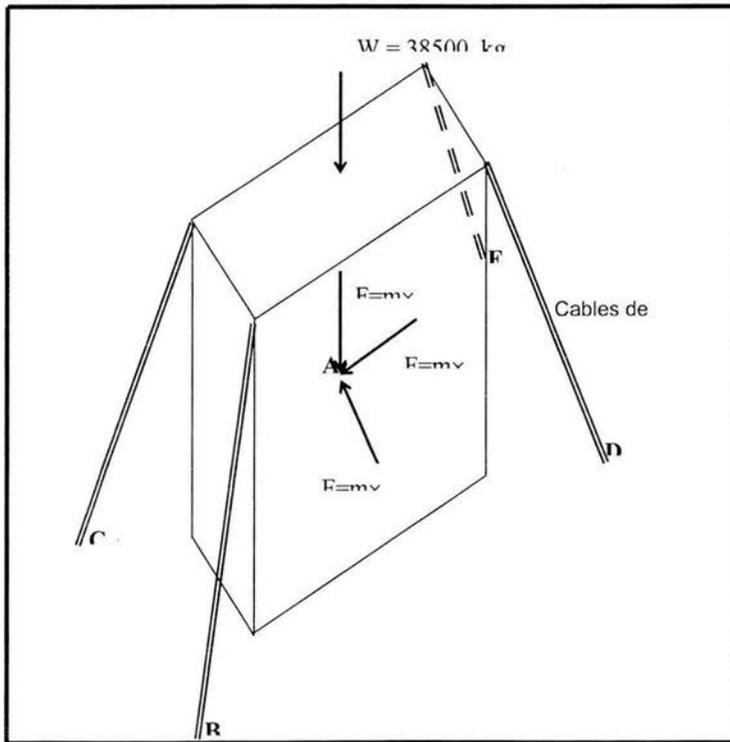


FIGURA 4.5.1 REPRESENTACIÓN DE FUERZAS EN EL TANQUE DEL TRANSFORMADOR.

Como se puede apreciar en el diagrama de la figura 4.5.1 las fuerzas que actúan debido a las aceleraciones en el transporte se inducen en el centro de gravedad del transformador, al analizar el transformador como conjunto se requiere conocer la respuesta al sistema principal, para poder conocer esta respuesta se analizara el sistema en forma tridimensional de esta forma se determinaran las tensiones en los cables de sujeción los cuales son una respuesta inmediata a la aceleración producida en el transformador. La determinación de las tensiones en los cables de sujeción se realizara a través de los métodos de mecánica, considerando este como un sistema dinámico donde se desarrollaran ecuaciones vectoriales para la determinación de estas. A continuación en la figura 4.5.2 se presenta el diagrama de cuerpo libre respecto a las tensiones de los cables. Las ecuaciones de equilibrio que rige al sistema son las presentadas a continuación:

$$\sum F_x = m \times a_x$$

$$\sum F_y = m \times a_y$$

$$\sum F_z = m \times a_z$$

$$\sum M_o = 0$$

De manera adicional a las reacciones del movimiento que presentan cada uno de los cables el propio cuerpo presenta reacciones en sentido contrario a la acción de la fuerza de inercia, debido a que se considera la base del transformador sin ningún desfaseamiento respecto a la plataforma esta es la razón por la cual al inducirse una fuerza de inercia la base del transformador actúa sin deslizamiento y esto provoca una

reacción de la base del transformador con la plataforma , la representación grafica de estas reacciones se pueden apreciar en el diagrama de la figura 59.

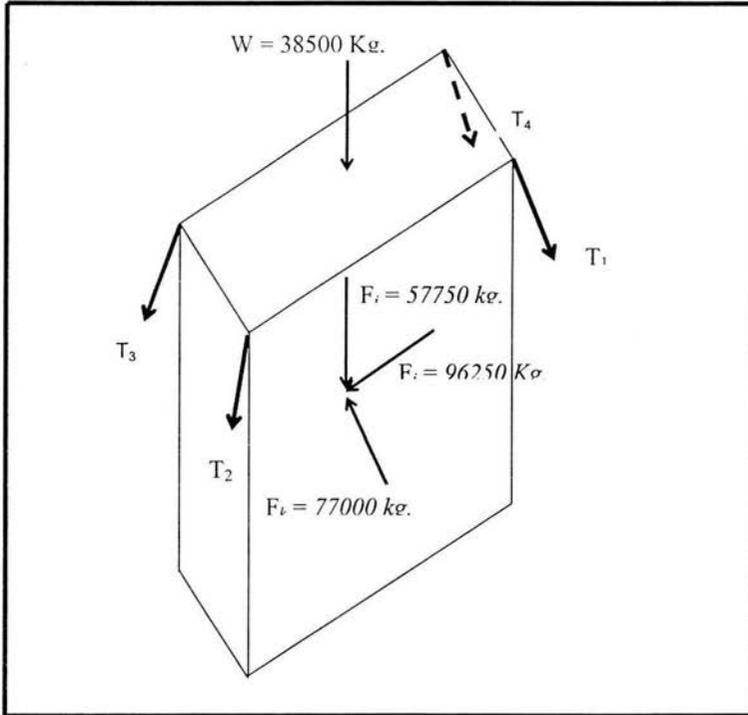


FIGURA 4.5.2 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL TANQUE.

Después de poder apreciar la representación grafica de las fuerzas que actúan sobre el transformador se determinaran los valores necesarios para realizar los cálculos correspondientes. Considerando los vectores siguientes:

- Vector FB

$$\overline{FB} = -100i - 411.5j + 40k$$

$$|\overline{FB}| = 425.36 \text{ cm.}$$

Por lo tanto el ángulo α será:

$$\text{sen } \alpha = \frac{100}{425.36}$$

$$\alpha = 13.5971^\circ$$

$$\therefore \beta = 76.40^\circ$$

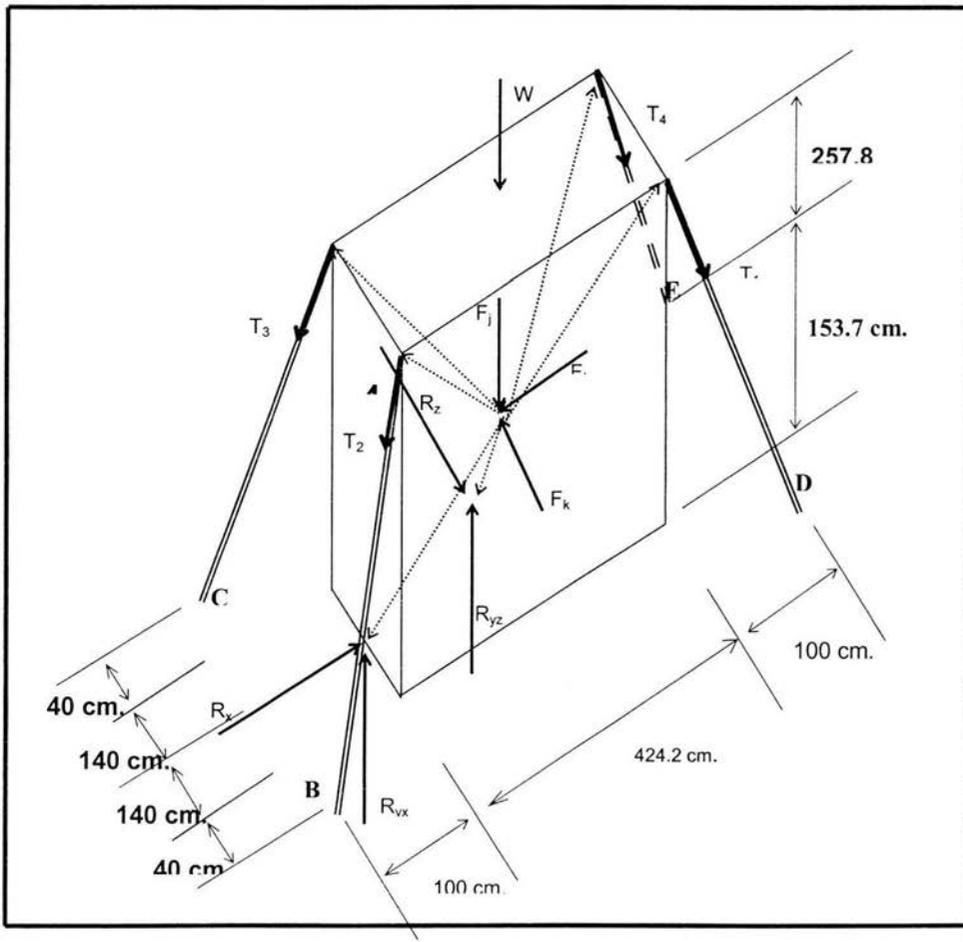


FIGURA 4.5.3 REPRESENTACIÓN DE REACCIONES EN LA BASE DEL TANQUE

$$\therefore \overline{FB} = -23.5094i. - 400j + 9.4k$$

$$\therefore T_{FB} = T_2 = \underline{-\cos \beta T_2 i. - \operatorname{sen} \beta T_2 j + \cos \beta T_2 k}$$

- Vector GC

$$GC = -100i. - 411.5j - 40k$$

$$\overline{GC} = 425.36 \text{ cm.}$$

Por lo tanto el ángulo β será:

$$\beta = 76.40^\circ$$

y la tensión en el cable GC será:

$$\therefore GC = -23.5094i. - 400j - 9.4k$$

$$\therefore T_{GC} = T_3 = \underline{-\cos \beta T_3 i. - \operatorname{sen} \beta T_3 j - \cos \beta T_3 k}$$

- Vector HE

$$HE = 100i. - 411.5j - 40k$$

$$\overline{HE} = 425.36 \text{ cm.}$$

Por lo tanto el ángulo β será:

$$\beta = 76.40^\circ$$

y la tensión en el cable HE será:

$$\therefore HE = 23.5094i. - 400j - 9.4k$$

$$\therefore T_{HE} = T_4 = \underline{\cos \beta T_4 i. - \operatorname{sen} \beta T_4 j - \cos \beta T_4 k}$$

- Vector ID

$$ID = 100i. - 411.5j + 40k$$

$$\overline{ID} = 425.36 \text{ cm.}$$

Por lo tanto el ángulo β será:

$$\beta = 76.40^\circ$$

y la tensión en el cable ID será:

$$\therefore ID = 23.5094i - 400j + 9.4k$$

$$\therefore \underline{T_{ID} = T_1 = -\cos \beta T_1 i - \operatorname{sen} \beta T_1 j - \cos \beta T_1 k}$$

Ecuación de equilibrio para fuerzas.

$$\sum F = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + R_x + R_z + W = m \times (a_x i + a_y j + a_z k)$$

$$\begin{aligned} & -\cos \beta T_2 i - \operatorname{sen} \beta T_2 j + \cos \beta T_2 k - \cos \beta T_3 i - \operatorname{sen} \beta T_3 j - \cos \beta T_3 k + \\ & \cos \beta T_4 i - \operatorname{sen} \beta T_4 j - \cos \beta T_4 k + \cos \beta T_1 i - \operatorname{sen} \beta T_1 j + \cos \beta T_1 k + R_x i + R_y j + \\ & R_z k + R_{xy} j - 38500 j = 3924.5667 \times ((9.81 \times 2.5) i + (9.81 \times 1.5) j + (9.81 \times 2.0) k) \end{aligned}$$

Componentes de la ecuación.

$$i: -\cos \beta T_2 - \cos \beta T_3 + \cos \beta T_4 + \cos \beta T_1 + R_x = 96250$$

$$j: -\operatorname{sen} \beta T_2 - \operatorname{sen} \beta T_3 - \operatorname{sen} \beta T_4 - \operatorname{sen} \beta T_1 + R_{xy} + R_y - 38500 = 57750$$

$$k: \cos \beta T_2 - \cos \beta T_3 - \cos \beta T_4 + \cos \beta T_1 + R_z = 77000$$

En la figura 4.5.4 se representa gráficamente el radio vector generado a partir del punto

"O" a la línea donde actúa la fuerza a determinar.

Sumatoria de momentos respecto al punto "O".

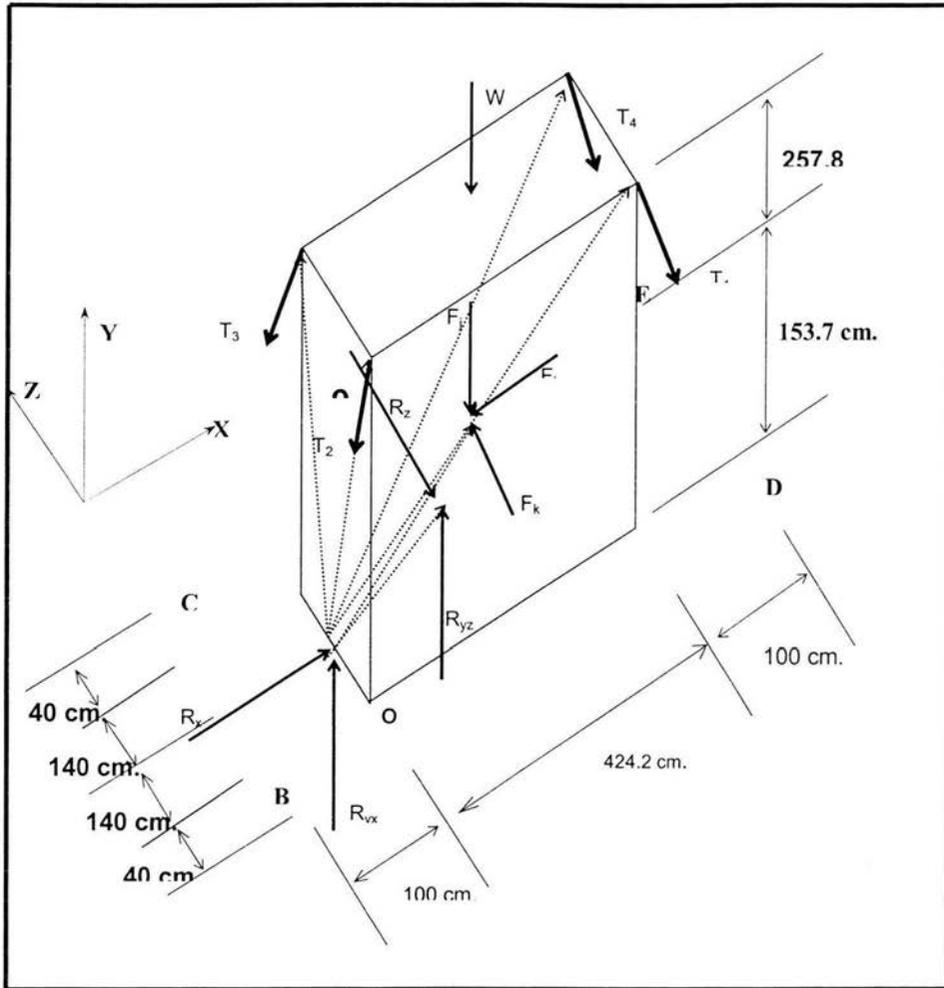


FIGURA 4.5.4 REPRESENTACIÓN DEL RADIO VECTOR A PARTIR DEL PUNTO "O".

$$\sum M_o = 0$$

$$\begin{aligned} & [(411.5j + 140k) \times (-\cos \beta T_2i - \operatorname{sen} \beta T_2j + \cos \beta T_2k)] + \\ & [(411.5j - 140k) \times (-\cos \beta T_3i - \operatorname{sen} \beta T_3j - \cos \beta T_3k)] + \\ & [(424.2i + 411.5j - 140k) \times (\cos \beta T_4i - \operatorname{sen} \beta T_4j - \cos \beta T_4k)] + \\ & [(424.2i + 411.5j + 140k) \times (\cos \beta T_1i - \operatorname{sen} \beta T_1j + \cos \beta T_1k)] + [(212.1i - 140k) \times (R_2k)] + \\ & [(212.1i - 140k) \times (R_{2y}j)] + [(212.1i + 153.7j) \times (-m \times a_xi)] + [(212.1i + 153.7j) \times (-m \times a_yj)] + \\ & [(212.1i + 153.7j) \times (-m \times a_zk)] + [(212.1i + 153.7j) \times (-Wj)] = 0 \end{aligned}$$

Las componentes de la ecuación son:

$$\text{i: } 96.68T_2 + 136T_2 - 96.68T_3 - 136T_3 - 96.68T_4 - 136T_4 + 96.88T_1 + 136T_1 + 140R_{2y} - 11834900 = 0$$

$$\text{j: } 232.68T_2 - 232.68T_3 - 232.68T_4 + 232.68T_1 + 140R_{2y} - 11834900 = 0$$

$$\text{j: } -32.92T_2 + 32.92T_3 + 99.75T_4 - 32.92T_4 - 99.75T_1 + 32.92T_1 - 212.1R_2 + 16331700 = 0$$

$$\text{j: } -32.92T_2 + 32.92T_3 + 66.83T_4 - 66.83T_1 - 212.1R_2 + 16331700 = 0$$

$$\text{k: } 96.68T_2 + 96.68T_3 - 412.3T_4 - 96.68T_4 - 412.3T_1 - 96.68T_1 + 212.1R_{2y} - 8165850 - 12248775 + 14793625 = 0$$

$$\text{k: } 96.68T_2 + 96.68T_3 - 508.98T_4 - 508.98T_1 + 212.1R_{2y} - 5621000 = 0$$

En la figura 4.5.5 se representa gráficamente el radio vector generado a partir del punto

" O' " a la línea donde actúa la fuerza a determinar.

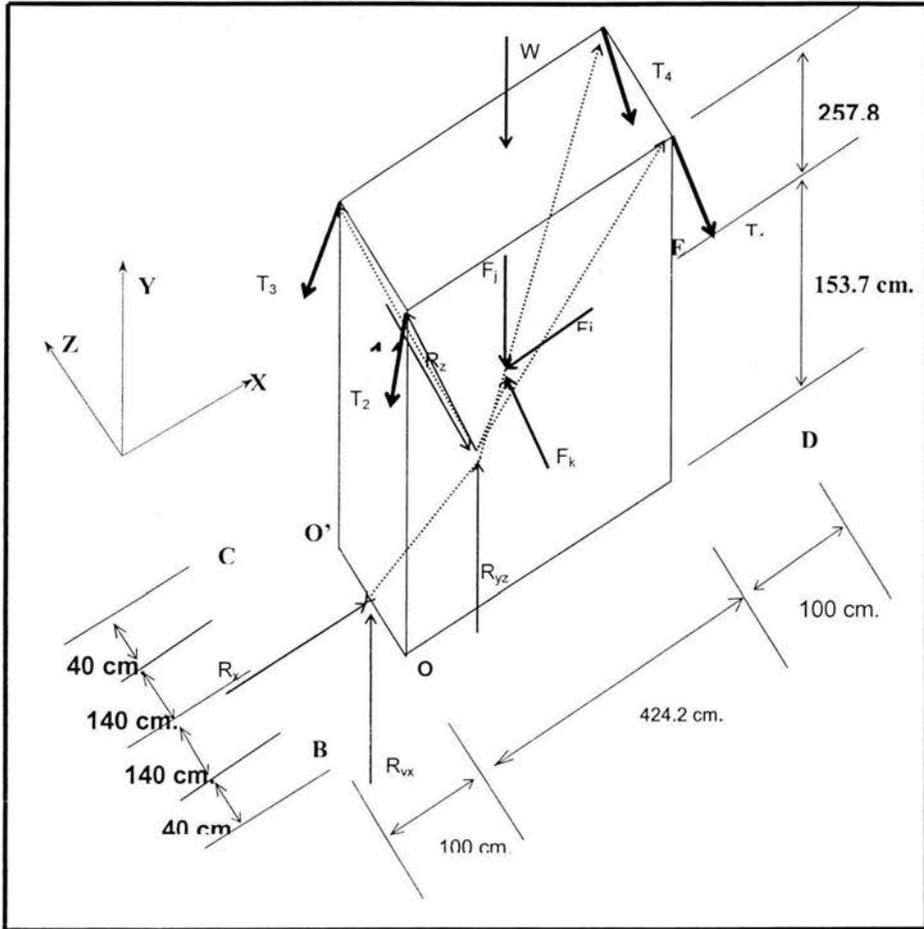


FIGURA 4.5.5 REPRESENTACIÓN DEL RADIO VECTOR A PARTIR DEL PUNTO " O "

$$\sum M_o = 0$$

$$\begin{aligned} & [(-212.1i + 411.5j + 280k) \times (-\cos \beta T_2 i - \operatorname{sen} \beta T_2 j + \cos \beta T_2 k)] + \\ & [(-212.1i + 411.5j) \times (-\cos \beta T_3 i - \operatorname{sen} \beta T_3 j - \cos \beta T_3 k)] + \\ & [(212.1i + 411.5j - 140k) \times (\cos \beta T_4 i - \operatorname{sen} \beta T_4 j - \cos \beta T_4 k)] + \\ & [(212.1i + 411.5j + 280k) \times (\cos \beta T_1 i - \operatorname{sen} \beta T_1 j + \cos \beta T_1 k)] + [(153.7j + 140k) \times (-m \times a_z k)] + \\ & [(153.7j + 140k) \times (-m \times a_x i)] + [(153.7j + 140k) \times (-m \times a_y j)] + [(153.7j + 140k) \times (-Wj)] + \\ & [(-212.1i + 140k) \times (R_x i)] + [(-212.1i + 140k) \times (R_{xy} j)] = 0 \end{aligned}$$

L

as componentes de la ecuación son:

$$i: 368.83T_2 - 96.68T_3 - 96.68T_4 + 368.83T_1 + 1640100 - 140R_{xy} = 0$$

$$j: -15.93T_2 - 49.9T_3 + 49.9T_4 + 15.93T_1 - 13475000 + 140R_x = 0$$

$$k: 302.83T_2 + 302.83T_3 - 302.83T_4 - 302.83T_1 + 14793625 - 212.1R_{xy} = 0$$

Resolviendo las ecuaciones obtenidas se llega a la solución respecto a las fuerzas tensorial de los cables en la cual la solución de estas fuerzas es la siguiente:

$$\underline{T_1 = 12429.7441 \text{ kg.}}$$

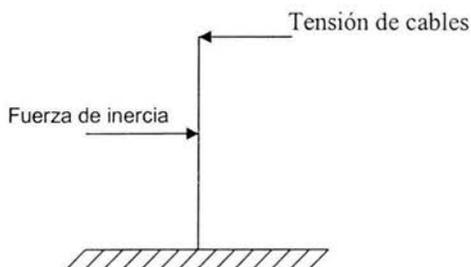
$$\underline{T_2 = 592.8447 \text{ kg.}}$$

$$\underline{T_3 = 1774.76 \text{ kg.}}$$

$$\underline{T_4 = 9300 \text{ kg.}}$$

4.6 ANÁLISIS DEL TANQUE.

El análisis del tanque con respecto al movimiento generado durante su transportación se obtendrá en forma clara en lo cual estos movimientos se presentan dentro de los tres ejes coordenados de aquí que los esfuerzos debido a las deformaciones en el tanque del transformador así como cada uno de sus componentes están relacionados de forma directa con los cambios bruscos de aceleraciones. Analizando el movimiento en el sentido horizontal de la unidad se tiene el siguiente diagrama representativo.



El tanque es considerado de esta forma como una viga empotrada en la parte inferior, por la limitación al movimiento en esta área.

Por lo tanto cuando las fuerzas de inercia provocadas por las aceleraciones actúan en el mismo instante se tiene en la figura 62 el diagrama ilustrativo.

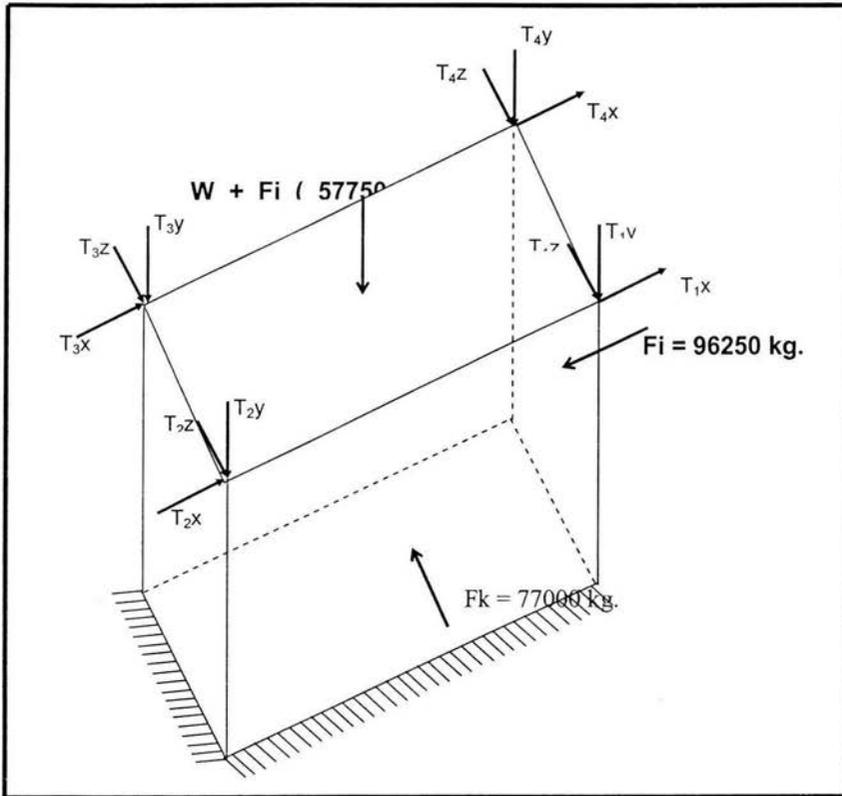


FIGURA 4.6.1 FUERZAS DE INERCIA EN EL TANQUE DEL TRANSFORMADOR.

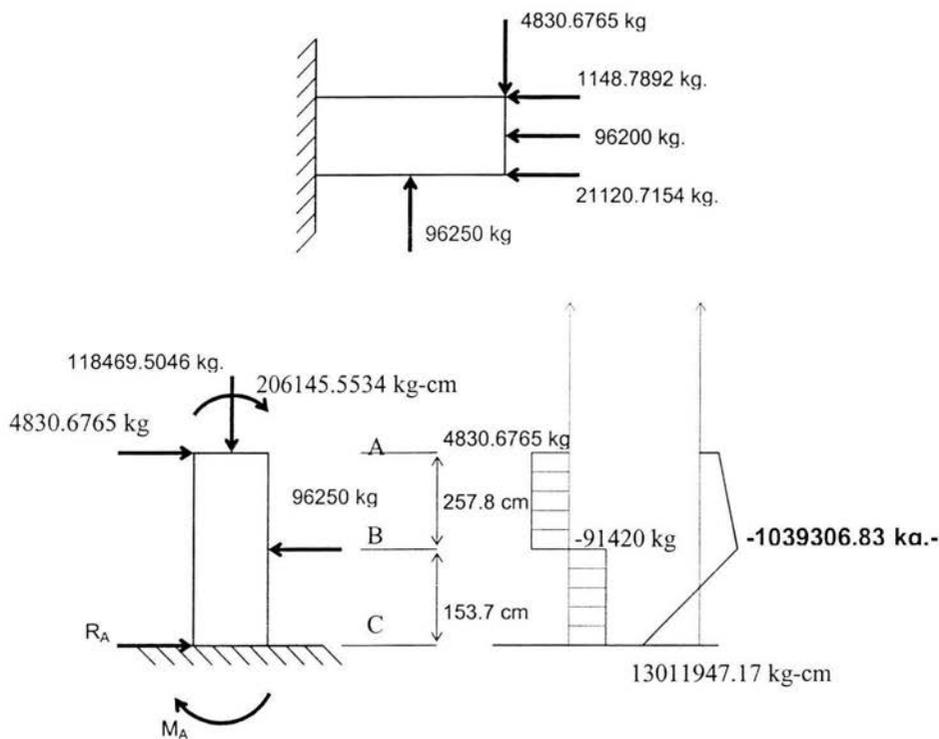
Máximo esfuerzo presentado en la estructura del tanque del transformador.

$$\sigma = \sigma_A + \sigma_F$$

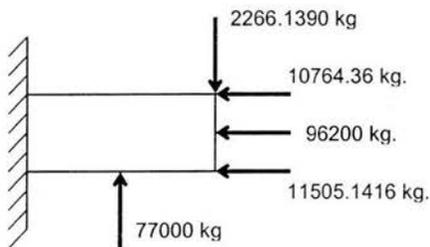
Donde:

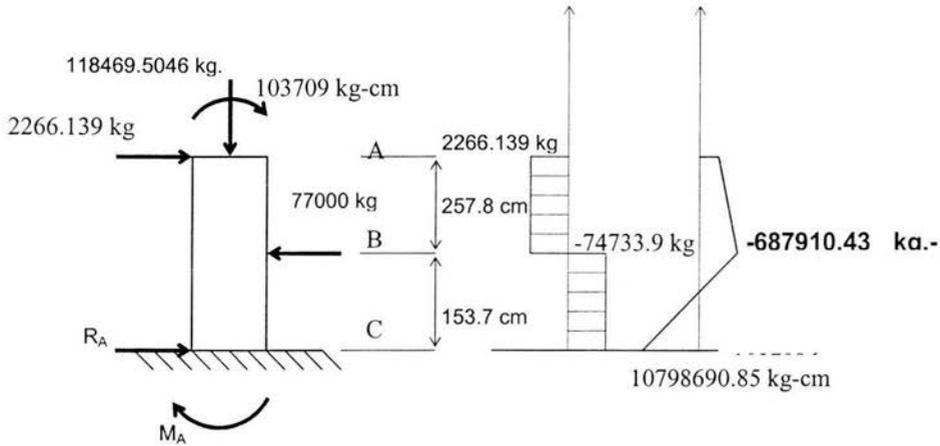
$$\sigma_A = \frac{P}{A} \quad \text{y} \quad \sigma_F = \frac{M_F \times C}{I}$$

EJE "Z - Y"



EJE "X - Y"





Momento flexionante máximo.

$$M_F = \sqrt{(10798690.85)^2 + (13011947.17)^2}$$

$$M_F = 16909242.61 \text{ kg} - \text{cm}.$$

Momento de inercia del tanque:

$$I_{xx} = \left(\frac{2}{12} \times 374.65 \times (0.9525)^3 \right) + \left(\frac{2}{12} \times 0.9525 \times (196.85)^3 \right)$$

$$I_{xx} = 1210986.616 \text{ cm}^4$$

$$I_{zz} = \left(\frac{2}{12} \times 343.8525 \times (0.9525)^3 \right) + \left(\frac{2}{12} \times 0.9525 \times (374.65)^3 \right)$$

$$I_{zz} = 8348191.826 \text{ cm}^4$$

$$\sigma = \frac{M_F \times C}{I_{xx}} + \frac{M_F \times C}{I_{zz}} + \frac{P}{A}$$

- Esfuerzo máximo a tensión en el tanque.

$$\sigma = \frac{10798690.85 \times 140}{1210986.616} + \frac{13011947.17 \times 212.1}{8348191.826} + \frac{118469.5046}{1087.75}$$

$$\sigma = 1687.925432 \frac{kg}{cm_2}$$

- Esfuerzo de trabajo máximo en el tanque.

$$\sigma = \frac{10798690.85 \times 140}{1210986.616} + \frac{13011947.17 \times 212.1}{8348191.826} - \frac{118469.5046}{1087.75}$$

$$\sigma = 1470.1 \frac{kg}{cm_2}$$

- Esfuerzo máximo a compresión.

$$\sigma = -\frac{10798690.85 \times 140}{1210986.616} + \frac{13011947.17 \times 212.1}{8348191.826} - \frac{118469.5046}{1087.75}$$

$$\sigma = -808.9093 \frac{kg}{cm_2}$$

- Esfuerzo de trabajo del tanque.

$$\sigma = \frac{10798690.85 \times 140}{1210986.616} - \frac{13011947.17 \times 212.1}{8348191.826} - \frac{118469.5046}{1087.75}$$

$$\sigma = 1026.7441 \frac{kg}{cm_2}$$

Verificación del factor de seguridad.

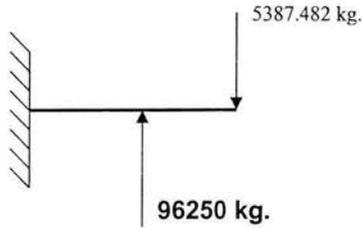
$$\sigma = \frac{\sigma_{Max.Per}}{F.S.}$$

$$\therefore F.S. = \frac{\sigma_{Max.Per}}{\sigma}$$

$$F.S. = \frac{2531.0764}{1687.9254}$$

$$F.S. = 1.5$$

- Análisis del tanque en sentido longitudinal.



Por lo tanto el momento flexionante y los esfuerzos que se presentan en este plano son:

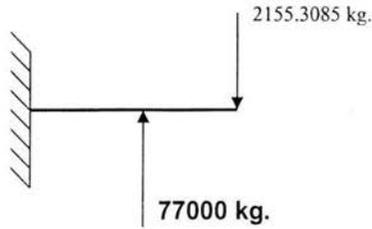
$$M_F = 12576676 \text{ kg} - \text{cm}$$

$$\sigma = \frac{M_F \times C}{I_{zz}}$$

$$\sigma = \frac{12576676 \times 212.1}{8348191.826} = 319.5318 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\therefore F.S. = \frac{1687.3721}{319.5318} = 5.28$$

Análisis del tanque en sentido transversal.



Por lo tanto el momento flexionante y los esfuerzos que se presentan en este plano son:

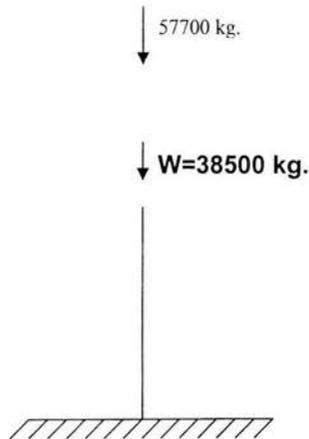
$$M_F = 10947990 \text{ kg} - \text{cm}$$

$$\sigma = \frac{M_F \times C}{I_{zz}}$$

$$\sigma = \frac{10947990 \times 40}{1210986.616} = 361.6221 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\therefore F.S. = \frac{1687.3721}{361.6221} = 4.66$$

Análisis del tanque en sentido vertical.



Por lo tanto el esfuerzo debido a la fuerza axial que se presenta sobre el transformador es:

$$\sigma = \frac{F_A}{A}$$

$$\sigma = \frac{96200}{1087.75} = 88.4394 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\therefore F.S. = \frac{1687.3721}{88.4394} = 19$$

CONCLUSIONES

En el caso de transportación de transformadores de potencia por carretera se puede afirmar que las variaciones de aceleraciones son muy amplias y esto nos conduce a un mayor margen de error en el diseño de cualquier equipo o maquinaria . El análisis de transportación para este transformador se realizo cubriendo los siguientes parámetros de verificación en pruebas de prototipo y diseño referente a Comisión Federal de electricidad, donde dichas pruebas y revisión de diseño se refieren a la verificación de transformadores de potencia, de acuerdo al diseño, tengan al menos un margen de seguridad de 2.5 veces el esfuerzo máximo producido por una aceleración de 2.5g en sentido longitudinal, 2.0g en sentido lateral y 1.5g en sentido vertical. Los valores de aceleración indicados son validos únicamente para transporte por carretera.

Por lo tanto de acuerdo a las especificaciones antes mencionadas y analizando el transformador de la orden de trabajo 261302, tipo columnas Core de 3 fases con una capacidad de 12/16/20 MVA, 115/13.8 KV. 550/110 KV Bil, cuenta con un enfriamiento OA/FA/FA conexión "Delta" en alta tensión y conexión "Y" para baja tensión, con un cargador de carga para alta tensión de (+1,-3 × 2.5%), 55oC temperatura de aceite y frecuencia de 60 Hz. donde este transformador es analizado involucrando las fuerzas que actúan en el periodo de transportación.

En el análisis de este transformador se pueden encontrar varios resultados favorables de acuerdo a las especificaciones requeridas además se observa que las variaciones

que se presentan durante la transportación de transformadores depende del tipo de transformador que se desee embarcar por lo cual para cada unidad específica es necesario considerar este punto, el procedimiento para realizar este proceso es muy importante dentro de la estructura de manufactura de transformadores por lo cual debido a esta importancia este proceso se debe realizar con personal debidamente capacitado y considerándolo desde el diseño de aparato ya que si algún transformador requiere de un aditamento especialmente diseñado para el proceso de transportación, como en el caso de algún soporte para miembros estructurales dicho soporte contara con el diseño apropiado para la función específica a desarrollar, y considerar el retiro del soporte al desembarcar la unidad o colocarlo como una parte constitutiva del transformador tomando las debidas precauciones que causaría dicho aditamento para el funcionamiento en condiciones normal del transformador, se pueden considerar muchos aspectos en la transportación de transformadores desde el diseño de bridas ciegas para mantener en un ambiente adecuado al transformador hasta la realización de aditamentos especiales para soporte de guías a algunos otros accesorio.

Por lo cual de acuerdo al análisis de rigidez mecánica para el transformador antes mencionado se presentan dos resultados concernientes a la división del estudio realizado.

1.- Análisis externo.

El análisis externo involucra todos los esfuerzo que se presentan en los materiales que no influyen directamente en el funcionamiento del transformador pero son partes

importante de su constitución física. Dentro de estos términos los esfuerzos que se presentan en dicho análisis corresponde en gran medida de la forma de actuar de cada aceleración en donde esta forma es la siguiente:

Actuación instantánea de las aceleraciones en diferentes sentidos.

Este es un punto muy remoto de presentarse en donde debido a la presencia de las tres cargas y si estas se presentadas en el mismo instante los esfuerzos en los materiales que constituyen al transformador como son la base de este respecto a la posición de los lados "X", "Y", "Z" y "W" en donde dichos esfuerzos presentados en estos puntos llegan a alcanzar grandes magnitudes como se puede apreciar en los cálculos realizados para este análisis, pero sin exceder el punto de cedencia de estos material por lo cual como se demostrado en los cálculos en estos puntos del transformador y con el caso presentado el margen de seguridad es de 1.14.

NOTA. El análisis de este punto se realizo de una forma tal que se considero únicamente de forma sencilla y clara para poder determinar dichos esfuerzo esto se aclara de esta forma para tener en cuenta que se requiere de un calculo mas completo para este caso.

Actuación de aceleraciones en diferentes instantes.

En este caso al realizar el análisis externo del transformador y posterior al calculo del caso anterior los esfuerzos presentados en forma independiente debido a la actuación

de las aceleraciones se presentan nuevamente de grandes magnitudes pero nuevamente sin superar los esfuerzos de cedencia de los materiales. En donde el margen de seguridad en sentido vertical es de 19, en sentido longitudinal 5.28 y en sentido transversal 4.66.

2.- Análisis interno.

El análisis interno fue determinado de acuerdo a los componentes mas importantes del transformador que involucra las partes principales de funcionamiento como es apreciado en los cálculos de este caso una de las principales partes que involucra la mayor concentración de esfuerzos son los bastidores donde un daño a estos provoca una alteración al funcionamiento del transformador por lo cual después de realizar dicho análisis se encontró con margen de seguridad aceptable para el periodo de transportación del transformador donde este es de 5 y una frecuencia natural de 1.698 Hz.

Por lo cual después de haber concluido el análisis de transportación del transformador según los parámetros recomendados por Comisión Federal de Electricidad y al presentarse los resultados anteriores se puede afirmar que en el caso del análisis interno con la actuación de las aceleraciones en el mismo instante no cumple con los parámetros recomendados por Comisión Federal de Electricidad pero ninguna parte del

transformador sufre algún tipo de deterioro permanente debido a lo mencionado anteriormente en donde los límites de cedencia de los materiales no son rebasados por los esfuerzos presentados, si se realiza un análisis en forma independiente, se crea un criterio más amplio referente a la transportación de este transformador en cuanto al margen de seguridad adecuado para que esto sea posible, como todo esto es referente a un análisis externo que es donde se prevén los daños, en cambio en los componentes internos del transformador los daños son menores como se pueden apreciar en los cálculos obtenidos de este análisis, por lo cual una transportación en las condiciones de diseño de este transformador es aceptable y no sufrirá algún daño permanente dentro de todos y cada uno de los componentes del transformador.

Por lo tanto de acuerdo a este análisis y en las condiciones en las cuales se transporta esta unidad principal esta no presenta daño alguno en la estructura y partes principales durante este periodo.

BIBLIOGRAFÍA

--THE ELECTRIC POWER ENGINEERING, L.L GRIGSBY

--TRANSFORMER DESIGN PRINCIPLES, ROBERT M DEL VECCHIO

--DIELECTRIC RELAXATION IN SOLIDS, AK JONSCHEK

-- MECÁNICA DE MATERIALES, HEBBEL

-- EL ABC DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS, GILBERTO HARPER

-- MAQUINAS ELECTRICAS, CHAPMAN.