

Software de Cálculo de Esfuerzos en Sistemas de Contención de Transformadores de Potencia

Hugo Parra Guerrero, José Eulalio Contreras de León, Prolec GE, Apodaca, Nuevo León, México.
Alberto Díaz Díaz, Rubén Castañeda Balderas, CIMAV, Chihuahua, México.

I. INTRODUCCIÓN

Resumen— El objetivo de este trabajo es el cálculo de los esfuerzos generados por un corto-circuito en cada elemento del sistema de contención en transformadores de potencia trifásicos. Para este cálculo se necesita primeramente simular el comportamiento dinámico de las bobinas en un corto-circuito tomado en cuenta las deformaciones de los espaciadores y la viscosidad del aceite. Esta simulación arroja las fuerzas ejercidas por las bobinas sobre los herrajes en cada instante considerado. Después, se modelan los elementos del sistema de contención con vigas y se resuelven las ecuaciones dinámicas para determinar los esfuerzos y desplazamientos en función del tiempo. Las ecuaciones se resuelven por medio de software llamado CODI (Comportamiento Dinámico del sistema de contención) programado en C++ Builder que consta de una interfaz gráfica y de una base de datos amigable que facilitan al usuario la captura de datos y el análisis de resultados. A pesar de la simplicidad que representa el uso de un modelo de vigas, CODI puede servir para realizar un análisis preliminar que puede poner en evidencia defectos en el diseño de cualquier sistema de contención de transformadores de potencia.

Palabras Clave—Corto-circuitos, Sistema de Contención, Bobinas, Fuerzas Electromagnéticas, Esfuerzos, Transformadores de Potencia, Software

La vida de los transformadores puede disminuir a causa de corto-circuitos que provocan esfuerzos considerables en los devanados y en el sistema de contención. El sistema de contención se compone de un conjunto de herrajes horizontales y tirantes verticales cuyo objetivo es confinar a las bobinas en un espacio de altura constante. Cuando ocurre un corto-circuito, se generan fuerzas electromagnéticas en los conductores de los devanados y éstas provocan que las bobinas ejerzan fuerzas mayores sobre los herrajes. El cálculo de los esfuerzos debidos al corto-circuito en el sistema de contención es entonces de vital importancia para su diseño. En este trabajo se desarrolló un software llamado CODI (COMportamiento DINámico del sistema de contención de paquete) para el cálculo de esfuerzos en sistemas de contención de transformadores de potencia trifásicos. Este cálculo se realiza en dos etapas: la primera consiste en calcular las fuerzas ejercidas por las bobinas sobre el sistema de contención y la segunda consiste en la simulación del comportamiento del sistema de contención.

Este trabajo está estructurado en 3 partes. Primeramente, se presenta el método empleado para el cálculo de las fuerzas ejercidas por los devanados sobre los herrajes. Después, se muestra cómo se realizan los cálculos de esfuerzos y desplazamientos en el sistema de contención. Finalmente, se describe brevemente el software CODI que resuelve las ecuaciones presentadas en las 2 partes anteriores.

II. CÁLCULO DE FUERZAS EJERCIDAS POR LAS BOBINAS SOBRE LOS HERRAJES

En los transformadores de potencia, una fase está hecha por dos bobinas coaxiales: una de baja y otra de alta. Estas bobinas están confinadas verticalmente por el espacio fijado por los herrajes y otros elementos del sistema de contención. Cada bobina está hecha de filas de conductores separadas por espaciadores. Las bobinas están inmersas en el aceite utilizado para el enfriamiento. En un corto-circuito se genera una densidad de fuerzas electromagnéticas diferente de una bobina a otra y de una fila de conductores a otra. Estas fuerzas dan lugar a las nociones de fuerzas balanceadas y no-balanceadas calculadas mediante ecuaciones bien establecidas [1] y que son función de las características electromagnéticas del

transformador.

De un punto de vista mecánico, las densidades de fuerzas electromagnéticas en cada fila de conductores pueden variar tan rápido que no se puede suponer que estas fuerzas se transmiten integralmente a los espaciadores y al sistema de contención. De esta manera, un modelo estático no es el adecuado para calcular las fuerzas ejercidas por las bobinas sobre los herrajes en un corto-circuito. Para efectuar este cálculo, se propone en este trabajo un modelo dinámico que adopta las siguientes consideraciones:

- los espaciadores no pueden transmitir tensión; en compresión su comportamiento es lineal elástico
- el movimiento de cada fila de conductor se amortigua por el efecto del aceite
- al aplicar el apriete por el sistema de contención, se confina la bobina a un espacio vertical constante.

En la figura 1, se muestra un esquema del modelo considerado.

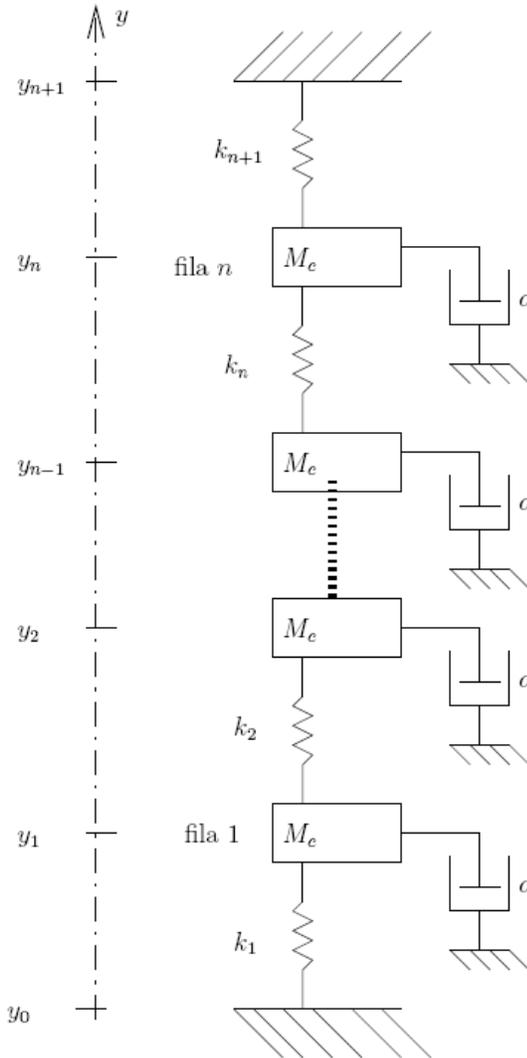


Figura 1. Modelo empleado para el estudio del comportamiento dinámico de las bobinas

Las ecuaciones de la dinámica aplicadas a la fila i conducen a la ecuación:

$$f - a\ddot{y}_i + k_i \langle y_{i-1} - y_i \rangle^+ - k_{i+1} \langle y_i - y_{i+1} \rangle^+ = M_c \ddot{y}_i \quad (1)$$

donde f es una fuerza resultante del peso del conductor y de la fuerza electromagnética (función del tiempo), a es un coeficiente de amortiguamiento [2], y_i es la posición vertical de la fila i , \dot{y}_i y \ddot{y}_i las primera y segunda derivadas de la posición con respecto al tiempo, k_i es la rigidez del espaciador entre las filas i e $i+1$, $\langle . \rangle^+$ es la función parte positiva, M_c es la masa de la fila i . Esta ecuación (1) es no lineal debido a la función "parte positiva" cuyo uso es indispensable para modelar el hecho de que los espaciadores no transmiten tensión. Para resolver la ecuación, ésta es discretizada en el tiempo por medio del método de diferencias finitas. Al aplicar esta ecuación a cada conductor y al considerar las condiciones iniciales se obtiene un sistema de ecuaciones lineales en cada instante que al ser resuelto permite calcular las fuerzas ejercidas por las bobinas sobre los herrajes en cada instante. Las ecuaciones fueron programadas en C++ y su resolución constituye el primer módulo del software CODI.

Para validar los cálculos, se consideró el caso ideal en el que los espaciadores pueden transmitir tensión y el amortiguamiento a es cero: en ese caso la ecuación (1) es lineal. Al escribir la ecuación (1) para todas las filas de conductor se obtiene el sistema diferencial:

$$\mathbf{f} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{y} = \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{y}} \quad (2)$$

donde \mathbf{f} es el vector de fuerzas (peso y fuerzas electromagnéticas que actúan sobre cada conductor), \mathbf{K} es la matriz de rigideces, \mathbf{y} es el vector de posiciones verticales de los conductores y \mathbf{M} es la matriz de masas. La resolución en este caso es analítica y se lleva a cabo por medio de una descomposición de la solución en una serie finita de los eigenvectores (\mathbf{e}^i) de la matriz \mathbf{K} [3]:

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^n c^i \mathbf{e}^i \quad (3)$$

donde los c^i son escalares (dependientes del tiempo) por determinar. El cálculo de eigenvectores (\mathbf{e}^i) y eigenvalores (λ^i) de la matriz de rigidez del problema se hace con el software MATLAB. Para determinar los escalares c^i primero se determinan las componentes h^i de \mathbf{f} en la base (\mathbf{e}^i):

$$\mathbf{f} = \sum_{i=1}^n h^i \mathbf{e}^i \quad (4)$$

y después se resuelve la ecuación diferencial

$$h^i + \lambda^i c^i = m \ddot{c}^i \quad (5)$$

utilizando como condiciones iniciales el hecho que los devanados están en la condición de apriete y los conductores sin velocidad. En la figura 2, se muestran las fuerzas ejercidas sobre el herraje superior de un transformador calculadas con MATLAB y con el método numérico de diferencias finitas. Se

aprecia una excelente correlación de resultados.

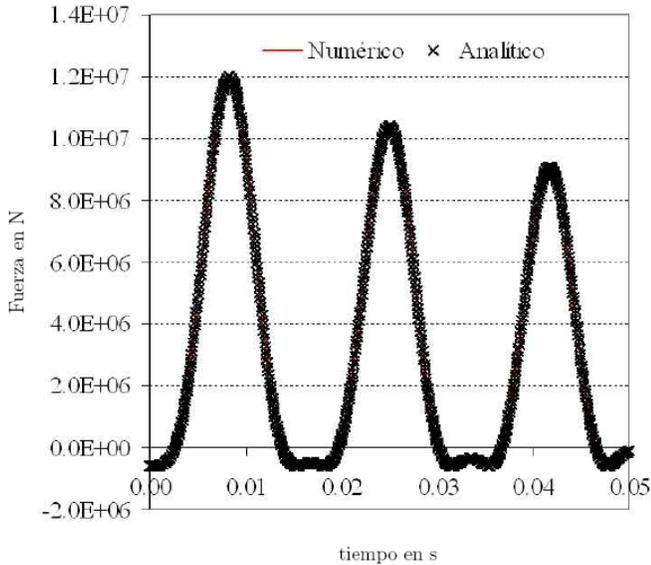


Figura 2. Fuerza ejercida sobre el herraje superior (comparación analítico-numérico en el caso ideal).

Veamos ahora un ejemplo real, en el cual los espaciadores no transmiten tensión. En la figura 3, se muestra la gráfica de fuerzas ejercidas en una fase por las bobinas sobre los herrajes superior e inferior. Se puede apreciar un régimen transitorio (de 0 a 0.2 s) y una región periódica (de 0.2 a 1s). En el régimen transitorio graficado en la figura 3, se pueden apreciar discontinuidades de la derivada de las fuerzas. Por ejemplo a 0.002 s, la discontinuidad se debe a que una de las bobinas deja de estar en contacto con un herraje (los espaciadores no transmiten tensión).

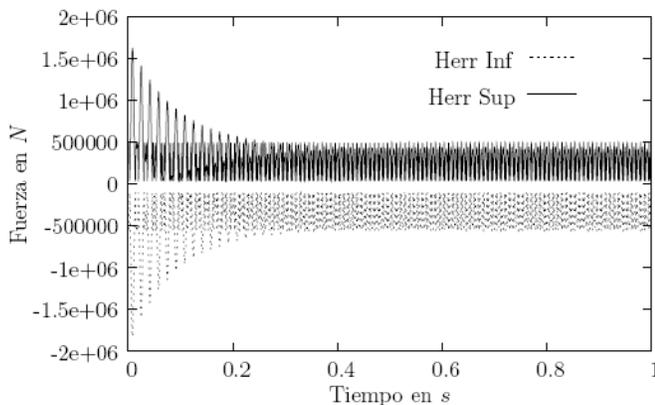


Figura 3. Fuerzas ejercidas sobre los herrajes (caso real, de 0 a 1s)

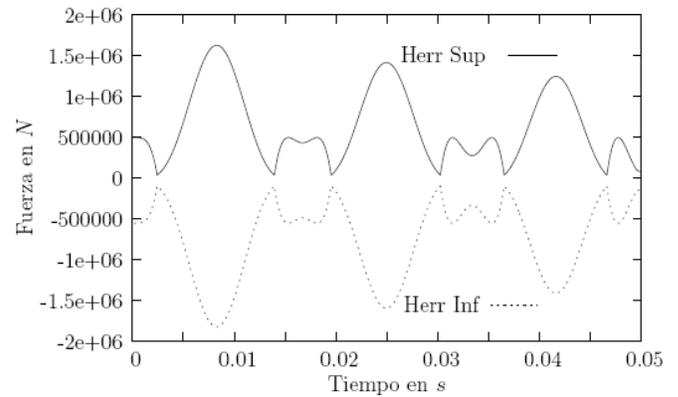


Figura 3. Fuerzas ejercidas sobre los herrajes (caso real, de 0 a 0.05s)

Gracias a este primer módulo de CODI, se puede conocer el valor de las fuerzas ejercidas sobre los herrajes en cada instante durante un corto-circuito y se puede entonces proceder al cálculo de esfuerzos provocados por estas fuerzas en el sistema de contención.

III. CÁLCULO DE ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS EN EL SISTEMA DE CONTENCIÓN

El sistema de contención está hecho de dos herrajes inferiores, dos herrajes superiores y de tirantes en cada fase. Los herrajes están apoyados sobre el fondo del tanque en zonas bien definidas. Los herrajes pueden estar conectados con las paredes del tanque. Las bobinas aplican la carga al herraje inferior a través de soportes y al herraje superior a través de opresores. Existen placas transversales sobre las cuales apoya el yugo y que unen a dos herrajes (ambos superiores o ambos inferiores). Además, es necesario tomar en cuenta una eventual fricción entre los herrajes y el yugo.

Los herrajes y los tirantes son modelados por medio de vigas. Las acciones del tanque, de las placas transversales y de los opresores son modeladas por cargas puntuales. Las acciones de los soportes y de la fricción son modeladas por una distribución lineal de fuerza. En la figura 5, se muestra un diagrama de cuerpo libre del herraje inferior con algunas de las fuerzas ejercidas sobre éste. En este diagrama, las fuerzas ejercidas por los tirantes corresponden a las fuerzas F_i^{inf} , las fuerzas ejercidas por las bobinas a través de los soportes por ejemplo del lado izquierdo del tirante son en total N_2^{inf} fuerzas.

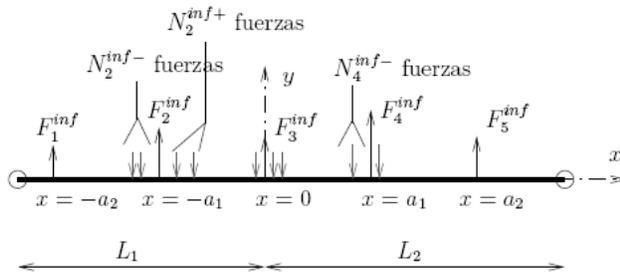


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre del herraje inferior (sólo algunas fuerzas aparecen para simplificar el esquema).

Para los herrajes, las ecuaciones de comportamiento en flexión y de “equilibrio” dinámico conducen a ecuaciones de tipo [3]

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - f + (\rho S + m) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

donde E es el módulo de Young, I es el momento de inercia en flexión, v es la deflexión, f es la densidad lineal de fuerzas, ρ es la densidad del material con el cual está hecho el herraje, m es la densidad de masa hidráulica que acompaña el movimiento del herraje a causa de la viscosidad del aceite. Las condiciones de frontera de esta ecuación son cero momentos y cero desplazamientos verticales en las extremidades (conexiones con la pared del tanque). Las condiciones iniciales son cero velocidades y desplazamientos iguales a los obtenidos por un cálculo estático en la condición de apriete. Para los tirantes se obtienen ecuaciones similares pero esta vez la ecuación de comportamiento considerada es la de tensión axial. Se obtienen en total $2+N$ ecuaciones diferenciales acopladas (N es el número de tirantes). Para resolverlas, se aproximan las soluciones por medio de series de eigenvectores [3] y debido al acoplamiento se necesita resolver un sistema de ecuaciones lineales. Las ecuaciones fueron programadas en C++ Builder y su resolución constituye el segundo módulo del software CODI.

Para validar los cálculos, se consideró la geometría sencilla de la figura 6 con la excitación F_1 : una señal periódica de alta frecuencia. Se resolvió el problema con CODI y con el software COMSOL. En la figura 7, se muestra la evolución en el tiempo de los desplazamientos verticales en los puntos A, B y C. Se puede apreciar una excelente concordancia de resultados.

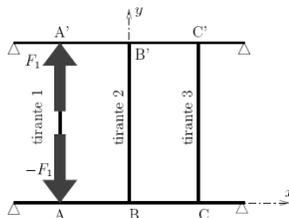


Figura 6. Problema considerado para la validación

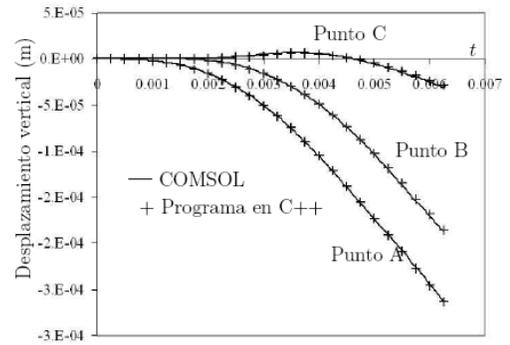


Figura 7. Desplazamientos en A,B y C calculados con COMSOL y con CODI

Consideremos el caso de un sistema de contención real, sometido a las fuerzas graficadas en la figura 3. En el herraje superior, el instante más crítico es $t=0.0194s$, un instante diferente de aquel cuando se presenta el máximo de las fuerzas ejercidas por los devanados (0.008s aproximadamente): esto es un claro reflejo de los efectos dinámicos. En la figura 8, se muestra una gráfica de los esfuerzos por flexión en el herraje superior en el instante crítico. Estos esfuerzos son inferiores a 230 MPa, lo que comprueba la pertinencia del diseño.

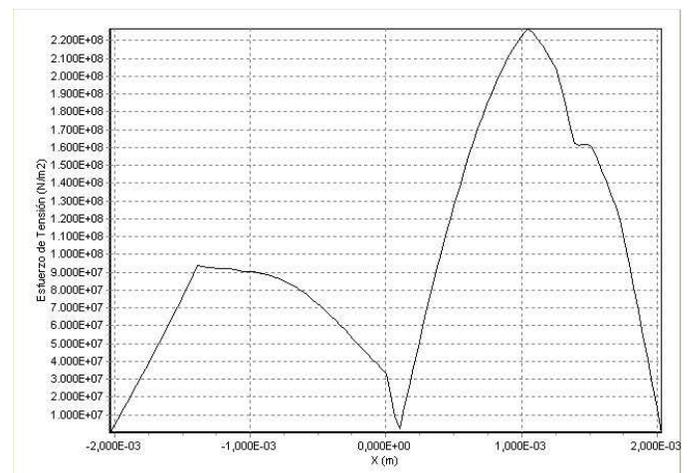


Figura 8. Esfuerzos por flexión en el herraje superior ($t=0.0194s$).

IV. BREVE DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE CODI

CODI fue programado en C++ Builder. El software cuenta con una base de datos que el usuario puede modificar para facilitar la captura de datos. Las ventanas desarrolladas para esta captura hacen a CODI un software amigable (ver ejemplo en la figura 9).

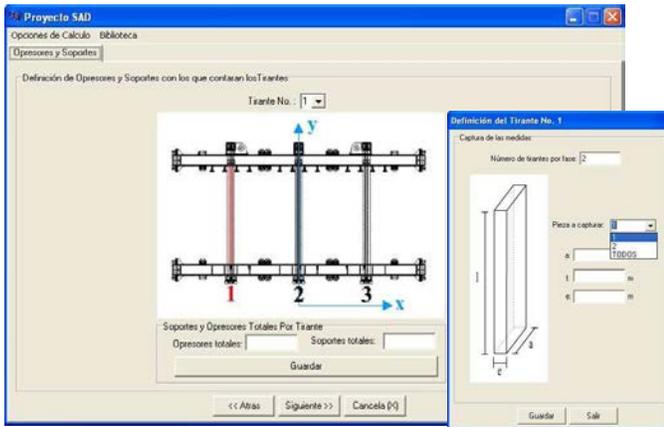


Figura 9. Ejemplos de ventanas de captura de geometría del sistema de contención

Los cálculos de CODI se efectúan en dos etapas o módulos. En la primera se calculan las fuerzas ejercidas por las bobinas sobre los herrajes y en la segunda se calculan los esfuerzos y desplazamientos en el sistema de contención. Para cada cálculo, además de las geometrías, propiedades de materiales y características del transformador, el usuario debe definir el paso de tiempo, el error relativo máximo permisible y el número de eigenvectores deseado para aproximar las soluciones (mientras mayor sea el número, mayor la precisión).

Para analizar los resultados de cálculo en cada elemento del sistema de contención, CODI crea gráficas flexibles que facilitan el post-procesamiento. En la figura 10, se encuentra un ejemplo de gráfica de esfuerzos en el herraje superior en tres instantes seleccionados por el usuario. Además, CODI permite visualizar un video de la deformación del sistema de contención durante el corto-circuito para dar al usuario una idea de la magnitud de desplazamientos en el sistema.

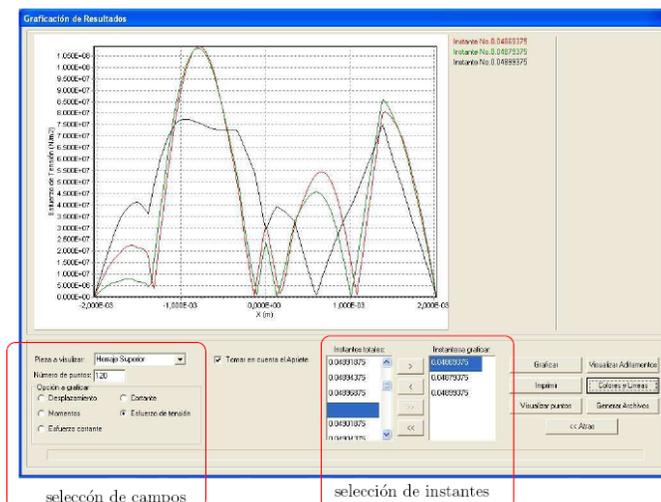


Figura 10. Ejemplo de ventana para el post-procesamiento

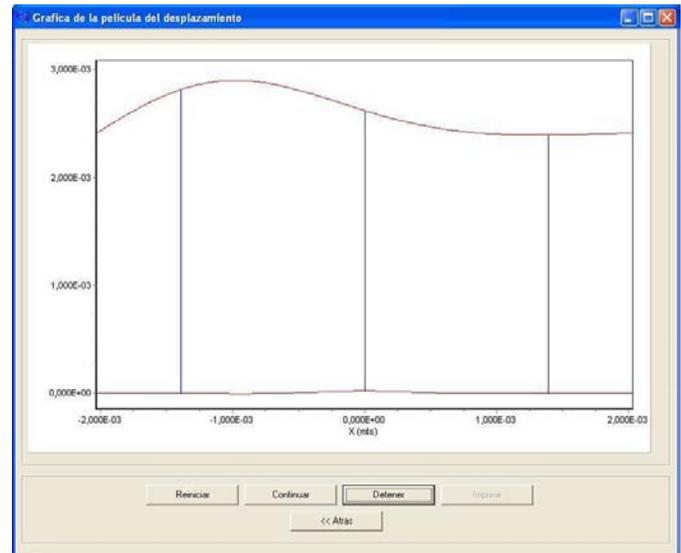


Figura 11. Imagen en un instante del video de deformación del sistema de contención.

V. CONCLUSIONES

En conclusión, en este trabajo se presentó el desarrollo de un software llamado CODI que permite calcular en un corto-circuito las fuerzas ejercidas por los devanados sobre los herrajes y los esfuerzos generados en el sistema de contención. Las principales cualidades del software son:

- la facilidad para adquirir los datos de entrada y para almacenarlos
- la flexibilidad de los datos de entrada
- la comodidad para visualizar los resultados y almacenarlos.

El software CODI puede verse limitado en el caso en el que no se puedan modelar los herrajes por vigas. En ese caso se requeriría un modelo de cascarones por ejemplo y se obtendrían así resultados más precisos. Sin embargo, CODI, con su modelo de vigas, puede ser ya de gran utilidad para hacer un primer análisis de pertinencia del diseño de sistemas de contención.

VI. REFERENCIAS

- [1] M. Waters : The short-circuit strength of power transformers. Londres, Macdonald & Co, 1966.
- [2] M.R. Patel : Dynamic response of power transformer windings and clamps under axial short circuit forces. Tesis de doctorado, Facultad de "Rensselaer Polytechnic Institute", 1973.
- [3] C.F. Beards : Structural Vibration: Analysis and Damping. New York-Toronto, Elsevier, 1996.

VII. BIOGRAFÍAS

Hugo Parra Guerrero nació en Nuevo Laredo, Tamaulipas, en 1963. Se graduó de Ingeniero Mecánico Electricista en la Facultad de Ingeniería de la UANL en 1985 y recibió el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Aachen, RFA, en 1989. Desde 2005 ha sido miembro del equipo de desarrollo tecnológico de Prolec GE. Actualmente es Líder de Tecnología Mecánica y Proyectos de Investigación, dentro de la Dirección de Tecnología de la misma empresa.

José Eulalio Contreras de León nació en San Nicolas de los Garza, Nuevo León, en 1978. Se graduó de Ingeniero Mecánico Electricista en la Facultad de Ingeniería de la UANL en 2000 y recibió el grado de Maestría en Ingeniería en Ciencia de Materiales en la UANL. Desde 2006 ha sido miembro del equipo de desarrollo tecnológico de Prolec GE. Actualmente es Ingeniero de Desarrollo y enlace, dentro de la Dirección de Tecnología de la misma empresa.

Alberto Díaz Díaz nació en México, D.F., en 1973. Se graduó de Ingeniero Civil, Maestro y Doctor en Ciencias de Materiales y Estructuras en la "Ecole Nationale des Ponts en Chaussées" de París, Francia. Desde 2002 es investigador titular del CIMAV S.C. encargado del área de Integridad Mecánica.

Rubén Castañeda Balderas nació en Gómez Palacio, Durango, en 1981. Se graduó de Ingeniero en Sistemas en el Instituto Tecnológico de Chihuahua II, en el año 2004. Desde 2006 es técnico asociado del CIMAV S.C. adscrito al área de Integridad Mecánica.