

## EL VALOR AGREGADO DE LA REVISIÓN DE DISEÑO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Enrique Betancourt R.  
PROLEC GE  
División Potencia  
Blvd. Carlos Salinas km 9.25  
Apodaca, Nuevo León, México

### Resumen-

La revisión de diseño es un aspecto importante dentro del concepto de administración del costo total de vida de un equipo. Para el caso de los transformadores de gran potencia, la normativa internacional tiene en proceso una guía, que se limita principalmente a evaluar el diseño y proceso del fabricante. Se mencionan los aspectos más relevantes del diseño de un transformador de potencia y los problemas comunes que pueden evitarse mediante las revisiones de diseño. También se discute el empalme de la revisión de diseño con el sistema de calidad del fabricante.

### I. INTRODUCCIÓN

La Revisión del Diseño es parte del proceso de administración del costo de vida de los equipos. La revisión consiste formalmente en una o más etapas de interacción entre el usuario (comprador) del equipo y el fabricante (vendedor), con la intención de asegurar la adecuación del producto por fabricar a la especificación del usuario. La Fig. 1 ilustra las actividades que influyen sobre el costo de vida de un transformador de potencia.

Dado que los transformadores de potencia son equipos de alto costo y que las fallas son críticas, la utilidad de hacer una revisión como parte formal del proceso de adquisición de los mismos ha sido reconocida a nivel de la normalización internacional. Existe un documento de CIGRE [1] que se está desarrollando para ofrecer una guía que oriente a los usuarios (compradores) en el proceso de la revisión de diseño.

Artículo recomendado y aprobado por el Comité Nacional de CIGRE-México para presentarse en el Segundo Congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en Irapuato, Gto.

### II. ADMINISTRACION DE LA VIDA DEL EQUIPO

La posibilidad de administrar, es decir, tener influencia sobre, el costo total de vida de los equipos es un concepto de aplicación relativamente reciente. Involucra la integración de los costos que el equipo tendrá desde su especificación y adquisición, los costos de operación y mantenimiento, hasta los costos de reciclaje y desecho de materiales, al finalizar su vida útil.

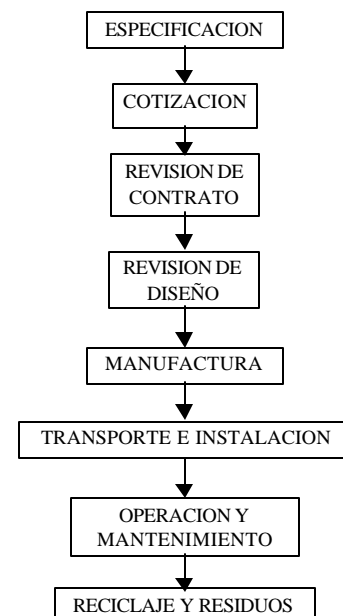


Fig.1 Etapas de mayor influencia sobre el costo de vida de un equipo.

Existen diversas entidades que apoyan al usuario en la tarea de administrar el costo de vida de los transformadores. Para la elaboración de especificaciones, existen estándares y consultores que apoyan al usuario en la tarea de identificar o

definir las condiciones de servicio requeridas y los parámetros de operación deseables.

Otras entidades se ocupan de aspectos muy posteriores a la especificación inicial, como la neutralización parcial de los efectos del envejecimiento, mediante la observación periódica y restitución de propiedades de los componentes más susceptibles. Las compañías de mantenimiento de equipos ejecutan estas tareas.

### III. GUIA DE CIGRE PARA LA REVISION DEL DISEÑO

Este documento [1] está en preparación como una guía para el usuario, para llevar a cabo revisiones de diseño de transformadores de 100 MVA y mayores y 123 kV y mayores. La revisión se entiende como una actividad planeada, en la que se asegura un común entendimiento de los requerimientos del cliente y de la especificación, y que además da al cliente la oportunidad de escudriñar el diseño para asegurarse de que los requerimientos serán cumplidos.

La guía para la revisión de diseño no incluye límites o parámetros de diseño, dejando la adecuación de los mismos bajo la responsabilidad única del fabricante. Se establece que el usuario es responsable de asegurarse de poseer el suficiente conocimiento técnico para entender y evaluar el diseño.

Un propósito particular de la revisión de diseño es el de identificar nuevos desarrollos que se estén aplicando como prototipo y evaluar la confiabilidad y riesgos involucrados. La experiencia demuestra que los usuarios se inclinan por la aplicación de las mismas soluciones de diseño ya probadas por décadas.

Dado que el usuario y sus consultores tendrán acceso a información confidencial del fabricante y en algunos casos clasificada como estratégica (nuevos desarrollos, ventajas competitivas, políticas de diseño, por ejemplo), el control de la información y la definición de las responsabilidades legales de los participantes son de capital importancia.

Los consultores se califican como tales por su experiencia en determinado ambiente de manufactura u operación. La exposición a otras formas de manufactura amplía su conocimiento, que puede a su vez pasar a otros fabricantes, y no es fácil deslindar responsabilidades de confidencialidad.

#### III.1 OPORTUNIDAD DE LAS REVISIONES

Se recomiendan al menos dos etapas en el proceso de la revisión del diseño. La primera es la llamada Revisión de Contrato, que debe seguir inmediatamente a la concesión del pedido. En esta revisión se confirma que la especificación del

usuario y los estándares relacionados están claramente definidos y entendidos por ambas partes. En esta etapa es responsabilidad crítica del usuario resaltar cualquier requerimiento especial que pueda tenerse sobre el equipo, en base al sistema de potencia y al tipo de proyecto involucrados. El fabricante colabora con su experiencia en aplicaciones similares y con el mismo cliente.

Es muy común que en esta etapa se reconozcan requerimientos no indicados originalmente en la especificación contractual, o que por primera vez se hagan resaltar requerimientos vagamente expresados en la especificación. Se discuten en ambos casos las acciones a tomar y las responsabilidades que aplican.

La segunda etapa consiste propiamente en la llamada Revisión de Diseño y se debe llevar a cabo al terminar el diseño eléctrico del equipo (núcleo y bobinas), antes de empezar la manufactura, y teniendo además información de la placa de características y el dibujo de dimensiones generales.

El propósito de esta segunda etapa es el de revisar a detalle los conceptos del diseño. Es recomendable que la revisión se efectúe en las instalaciones del fabricante, donde se tiene acceso a toda la información de respaldo.

Puede haber una tercera etapa donde se revisen detalles del diseño mecánico: requerimientos sísmicos, diseño del tanque, colocación de accesorios. Un hecho bien conocido es que mientras más adelante se reconozcan los problemas potenciales, menor será el costo de resolverlos y mayor la probabilidad de cancelarlos por completo.

#### III.2 LOS CONCEPTOS DEL DISEÑO

Se recomienda la revisión de los aspectos enlistados a continuación.

##### DATOS TECNICOS

Parámetros de operación (especificación).

- Niveles de aislamiento
- Impedancia (s)
- Pérdidas
- Sobreelevación de temperatura
- Dimensiones y pesos
- Corriente de excitación
- Parámetros especiales
- Corrientes de arranque
- Capacidad sísmica.

##### NUCLEO

- Cálculo de pérdidas.
- Capacidad de sobreexcitación.
- Tolerancias de manufactura.
- Control del material laminado.

##### DEVANADOS

- Proceso de devanado.
- Proceso de estabilización.
- Tolerancias.

Balance magnético.  
Esfuerzos de corto circuito.

**DISEÑO DE AISLAMIENTOS**  
Márgenes de seguridad.  
Control de tolerancias y holguras.  
Control de descargas parciales.

**PERDIDAS Y ENFRIAMIENTO**  
Efectos de corrientes parásitas.  
Cálculo de pérdidas bajo carga.  
Cálculo de la distribución de pérdidas y puntos calientes.  
Control de pérdidas extrañas

**PARTE VIVA**  
Proceso de secado.  
Sistema de apriete de bobinas.  
Sistema de apriete del núcleo.

**TANQUE Y ACCESORIOS**  
Aplicación de soldaduras.  
Anclaje.  
Empaques  
Tipo de válvulas.  
Preservación del aceite.  
Sistema de recolección de gases.  
Pruebas de proceso a la pintura.  
Tipo de boquillas.  
Tipo del cambiador bajo carga.  
Aplicación de varistores.

**OTROS**  
Sistema de control de calidad del diseño.  
Consideración de reglamentos locales.  
Reglas de protección al ambiente.  
Procedimientos para la introducción de nuevos desarrollos.

#### **IV. CONDICIONES NORMALES DE OPERACION**

Las condiciones normales de operación establecen una capacidad básica de servicio del equipo. Esas condiciones están documentadas en los estándares internacionales y nacionales y pueden ser extendidas por el usuario en su especificación particular.

A continuación se especifican las condiciones consideradas normales, siendo obligación del usuario especificar si el equipo ha de trabajar en otras condiciones. Es importante aclarar que la no especificación temprana de una condición de operación fuera de los límites normales no implica necesariamente la incapacidad total de servicio del equipo; es posible en muchos casos determinar una reducción parcial de capacidad.

#### **IV.1 CONDICIONES NORMALES DE ACUERDO A ANSI.**

Se establecen en [2] las siguientes condiciones:

El aire (ambiente) de enfriamiento tendrá una temperatura máxima de 40oC y no más de 30oC como promedio diario (30 y 25oC si es enfriado por agua).

La temperatura mínima de operación del aceite superior será de -20oC.

La altitud máxima de operación es de 1000 MSNM.

El voltaje de alimentación será "aproximadamente" senoidal y balanceado, si es polifásico.

El factor armónico de la corriente será de máximo 5%.

Se tendrá capacidad de operación continua sin carga a un máximo del 110 % del voltaje nominal o de los Volts/Hz nominales.

Se tendrá capacidad de operación continua a plena carga con un voltaje secundario máximo del 105%, a factor de potencia del 80%, volts/Hz mínimo del 95% y frecuencia mínima del 95%.

Se deberá definir la aplicación como reductor, elevador o ambas.

La pintura exterior será de acabado no metálico.

Otros aspectos de la especificación de ANSI son:

Los voltajes de operación continua están estandarizados, así como los niveles de aislamiento al impulso.

Se definen también tolerancias de aceptación para los principales parámetros de operación.

#### **IV.2 Comparación ANSI vs. IEC**

La tendencia en ANSI a mediano plazo es armonizar sus estándares con los de IEC. ANSI, sin embargo, tiende a conservar el carácter normativo sobre aspectos de diseño que IEC prefiere dejar al común acuerdo entre el usuario y el fabricante.

En IEC [3], la temperatura ambiente de referencia es de 20oC, contra 30oC de ANSI; se amplían brevemente las tolerancias para las pérdidas e impedancias y las pérdidas se reportan a 75oC, en lugar de 85oC. En IEC, la elevación de temperatura del aceite más caliente se limita a 60oC, cuando en ANSI es de 65oC. Las pruebas de impulso con onda cortada son opcionales y al 100% del valor de onda plena. Los estándares de NBI son diferentes en ambas normativas. En IEC, el impulso de maniobra debe probarse con el neutro aterrizado y los parámetros de operación se refieren a la capacidad máxima, en lugar de la capacidad de enfriamiento natural.

### IV.3 Recomendaciones respecto a la Normativa

La comparación ANSI vs. IEC indica que las diferencias en los estándares son siempre una fuente de posibles errores de interpretación. El fabricante debe intensificar sus controles internos (revisiones de concepto, revisiones de diseño, planes de calidad) cuando se recibe una orden bajo estándares que le son poco frecuentes. De aquí también se aprecia la necesidad absoluta del fabricante de mantener una participación activa y constante en los comités de normalización.

La guía para la revisión del diseño debe hacer un mayor énfasis en los requerimientos del cliente y la interpretación unívoca de la especificación. El documento actual de CIGRE se concentra en muchos aspectos que son de responsabilidad exclusiva del fabricante, para los cuales, generalmente, la normativa misma no define criterios claros.

### IV.4 LA CONTRIBUCION DE ISO 9000

La certificación ISO 9000 de un proveedor implica la aplicación de un sistema de calidad que asegura el cumplimiento de los requerimientos del cliente. ISO 9001 [4] aplica para fabricantes que diseñan su producto. En la normativa actual se considera responsabilidad del sistema de calidad del fabricante el cumplimiento del diseño con la especificación y expectativas de calidad del cliente. No se mencionan lazos intermedios de realimentación una vez que se aprueba la especificación de un contrato, ni tampoco se menciona responsabilidad alguna atribuible al usuario por decisiones o preferencias de diseño.

### V. EL VALOR DE LAS REVISIONES Y LA PRACTICA ACTUAL

La revisión de diseño como formalidad concomitante de un pedido importante, ya sea por costo inicial o de operación, forma parte de una práctica ya antigua en el mercado de los transformadores de gran potencia. Muchos usuarios desarrollaron su propia práctica, en base a la experiencia, y especifican una o más sesiones de revisión dentro del proceso de una orden. Los fabricantes cumplen estos requerimientos de diversas formas, unos simplemente ofrecen un vistazo a su sistema de calidad, otros entregan un manual descriptivo de diseño.

La experiencia de los fabricantes es que, en general, una revisión temprana del contrato es de gran valor para asegurar el entendimiento de la especificación. Sin embargo, una vez que inicia el proceso de diseño y manufactura del fabricante, las revisiones externas entran en franca redundancia con el sistema de aseguramiento de la calidad del fabricante.

De particular importancia es el hecho de que hay usuarios que, por convicción propia o por convencimiento de sus consultores, deciden hacer respetar criterios de diseño particulares, sin conexión directa con estándares de validez contractual. Es deber del usuario el incluir dichos criterios en su especificación contractual, a fin de evitar controversias en las etapas de revisión.

También es importante reconocer en la normativa la preocupación del fabricante por la preservación de su capital intelectual y definir una proyección a largo plazo del proceso de revisiones de diseño: ¿Se calificará a los fabricantes de acuerdo a los resultados? ¿Realimentará el usuario las divergencias en su especificación? ¿Se definirán criterios de validez para requerimientos de diseño que trascienden la normativa actual? ¿Es posible que el usuario forme su base de datos de "criterios establecidos", que entren en conflicto con posteriores desarrollos a la tecnología del producto?

Ejemplos de aspectos importantes de un contrato que pueden trascender a la especificación del usuario son,

Especificar la naturaleza de la carga. Los transformadores que alimentan transformadores de horno pueden requerir provisiones especiales.

Hacer referencia a estándares con requerimientos contradictorios.

Especificar pruebas especiales que sirvan de referencia a pruebas posteriores de mantenimiento.

Efecto de voltajes transferidos capacitiva o inductivamente, durante condiciones especiales de servicio.

Especificar pruebas para las que no existe una forma definida en los estándares.

Errores en la transcripción de la especificación del usuario final, por parte de un contratista.

### VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La revisión de diseño es un ejercicio provechoso para usuarios y fabricantes, al promover un entendimiento claro de la especificación.
2. La revisión de diseño no debe tomarse como una segunda etapa de la especificación del usuario, ya que los costos involucrados con los cambios pueden ser desproporcionados.
3. La revisión de diseño debe llevarse a cabo en la planta del fabricante, dando acceso al usuario a la información de respaldo para las decisiones de diseño del fabricante.

4. La emisión de formatos impresos de los criterios de diseño empleados en un diseño particular implica riesgos muy altos para los fabricantes, que pueden lesionar su competitividad.
5. La revisión de diseño no puede resolver problemas que, reconocidamente, trascienden el estado del arte documentado en estándares y textos. Los trabajos de desarrollo que respaldan las soluciones del fabricante son responsabilidad del mismo y deben documentarse.
6. La revisión de diseño no otorga responsabilidad al usuario sobre la adecuación del diseño. Esa responsabilidad pertenece al fabricante y es la base para las garantías contractuales.
7. El documento actual de CIGRE desvirtúa parte importante del espíritu de la revisión del diseño, al concentrarse en la revisión exhaustiva de los parámetros de diseño. No hay criterios universalmente aceptados para muchos de esos parámetros.

## VII. REFERENCIAS

- [1] CIGRE WG 12.22 , Draft: "Guidelines for Conducting Design Reviews for Transformers 100 MVA and 123 kV and above", CIGRE, 1999.
- [2] ANSI/IEEE C57.12.00-2000, "General Requirements for Oil Immersed Power Transformers and Shunt Reactors", 2000.
- [3] IEC 76, "Power Transformers", 1993.
- [4], ISO 9001, "Quality Management Systems-Requirements", International Standards Organization, tercera edición, 2000-12-15.

## VIII. BIOGRAFÍAS

**Enrique Betancourt Ramírez** nació en Torreón, Coahuila, en 1959. Se graduó de Ingeniero Mecánico Electricista en la Facultad de Ingeniería de la UANL en 1983 y recibió el grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Técnica de Aachen, RFA, en 1988. Desde 1989 trabaja como miembro del equipo de soporte tecnológico de la empresa Prolec GE. Actualmente es responsable del departamento de Desarrollo Tecnológico. Desde 1991 a la fecha colabora como profesor adjunto de la Maestría en Potencia Eléctrica de la Escuela de Graduados de FIME-UANL. Imparte las materias de Ingeniería de la Alta Tensión y Simulación de Transitorios Electromagnéticos. Es miembro de diversos comités de normalización dentro del Comité de Transformadores de IEEE.