



INGENIERÍA INDUSTRIAL II

UNIDAD ESPECIAL

**GESTIÓN DE ACTIVOS EN
TRANSFORMADORES**

2021

Introducción.

La provisión de energía eléctrica segura y estable es el factor más crítico en la actividad industrial y civil de nuestra época.

Sin energía eléctrica todas las operaciones de una fábrica se paralizan, los ascensores se detienen, las centrales telefónicas son inútiles, el aire acondicionado no funciona y los sistemas de seguridad entran en una zona de alto riesgo en cuanto a confiabilidad y seguridad.

El transformador es componente imprescindible de los modernos Sistemas de Transporte de Energía eléctrica, se presenta de la más variadas formas y tamaños, todos son importantes para la continuidad del servicio, pero siendo el transformador de potencia, por el tamaño, inversión y costo de las pérdidas que ocasiona cualquier falla del mismo, es por tanto el que merece la dedicación superlativa de los especialistas involucrados.

Los Transformadores de Potencia en general se usan sumergidos en aceite, es un medio que además de proveer aislación a la máquina, le facilita la refrigeración, tanto de los bobinados como del núcleo, además aporta un medio efectivo para extraer el calor al exterior, circulando tanto de un modo forzado como natural.

El Transformador de potencia sumergido en aceite

- Los Transformadores de Potencia en general se usan sumergidos en aceite, es un medio que:
- Provee aislación a la máquina.
- Facilita la refrigeración, (tanto de los bobinados como del núcleo).
- Aporta un medio efectivo para extraer el calor al exterior, (circulando tanto de un modo forzado como natural).
- Los Sistemas de refrigeración, son ONAN, ONAF, OFAF y ODAF.
- Significados O: Aceite A: Aire N: Natural F: Forzado D: Dirigido



Relación de pesos con la potencia nominal

Veamos una relación de componentes en base a un Transformador Monofásico Tipo Shell de 100 MVA.

Relación de pesos con la potencia nominal

Veamos una relación de componentes en base a un Transformador Tipo de 100 MVA.

Base 100 MVA Tipo Core – Columnas Trifásico

- Peso total : 3,73 Tons. /MVA
- FeSi : 1,34 Ton. /MVA
- Cobre : 0,45 Ton. / MVA
- Celulosa: 0,28 Ton. / MVA
- Aceite : 0,95 Ton. / MVA



Como vemos sólo 1,23 Ton./MVA es celulosa y aceite y son los únicos materiales que envejecen

Ciclo de vida de los Transformadores

se realizará una descripción conceptual de la gestión de activos en general y de transformadores en particular. El enfoque se centrará en el concepto de “ciclo de vida”, de acuerdo a lo especificado por las normas PAS 55:2008 e ISO 55000:2014.

Concepto del ciclo de vida de un transformador

La gestión de la vida de los transformadores comienza desde el mismo momento en que se especifican sus características, hasta que se llega al fin de sus vidas útiles (desmontaje, reemplazo, reciclado).

Se la define como el conjunto de actividades y prácticas sistemáticas y coordinadas para gestionar óptimamente los transformadores, así como el rendimiento, riesgos y costos asociados a lo largo del ciclo de vida, de acuerdo a un plan estratégico de la organización.

Durante este ciclo, existe un conjunto de condiciones operativas y ambientales que afectarán al transformador, en especial si las solicitaciones exceden a las de diseño.

La confiabilidad de todos los transformadores será decisiva para establecer la confiabilidad general del sistema.

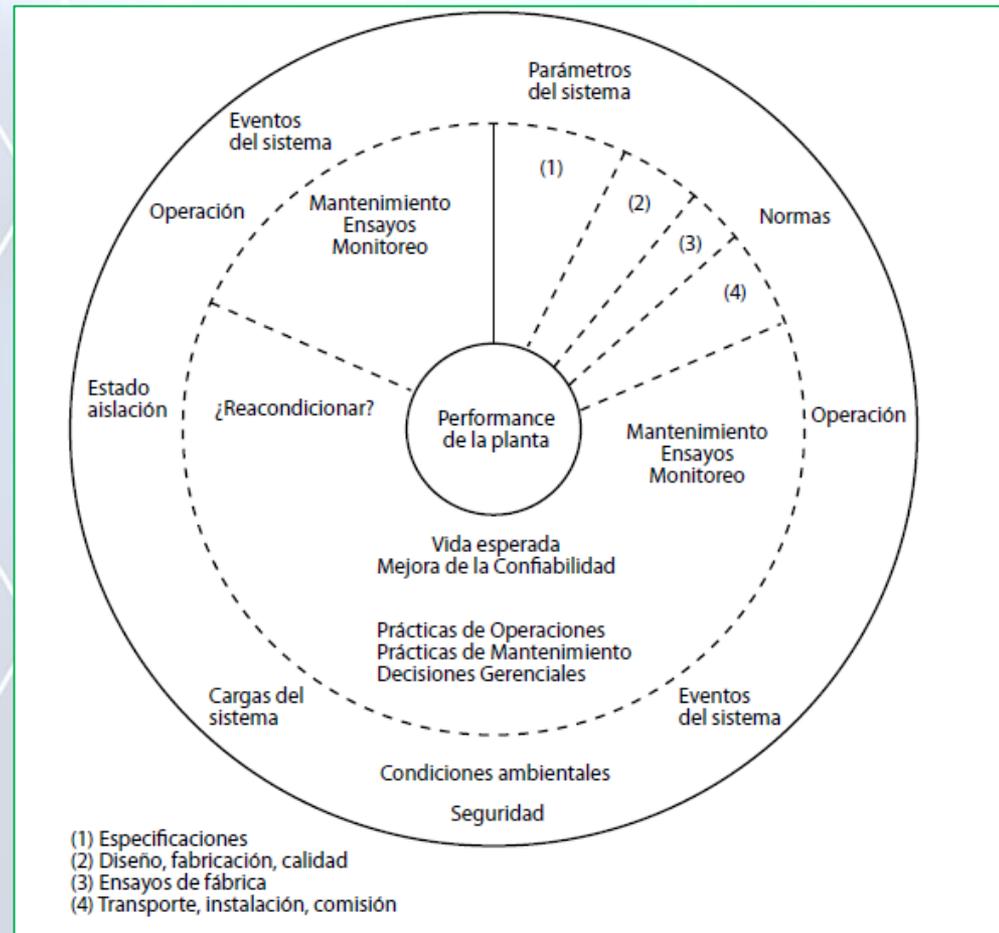
Ciclo de vida de los Transformadores

Se deberá considerar las tácticas de mantenimiento a aplicar antes de que el deterioro se torne severo, así como la frecuencia de aplicación de estas técnicas (ensayos y monitoreo de parámetros).

Se destaca:

- Conocer qué medir.
- Capacidad de entender los procesos físicos involucrados.
- Analizar e interpretar correctamente los resultados.

En la figura se muestra cómo queda determinado el ciclo de vida de los transformadores, así como las diferentes etapas que lo conforman



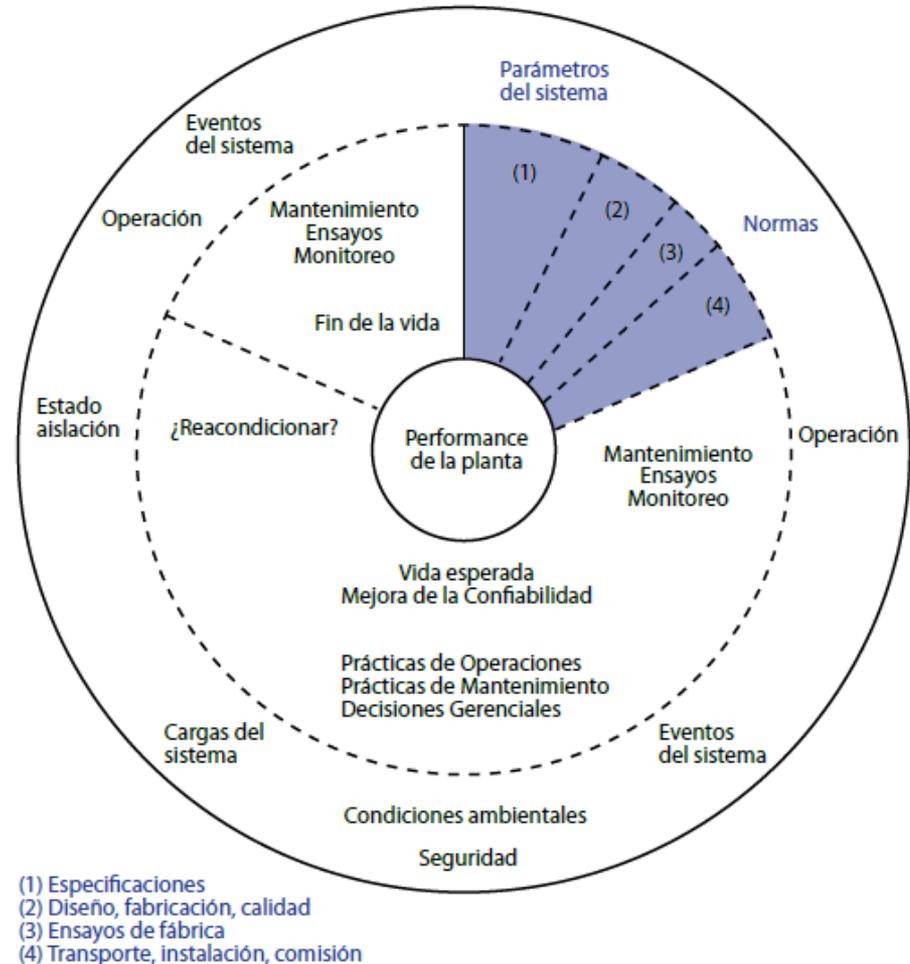
Ciclo de vida de los Transformadores

Se destacan tres etapas, a saber:

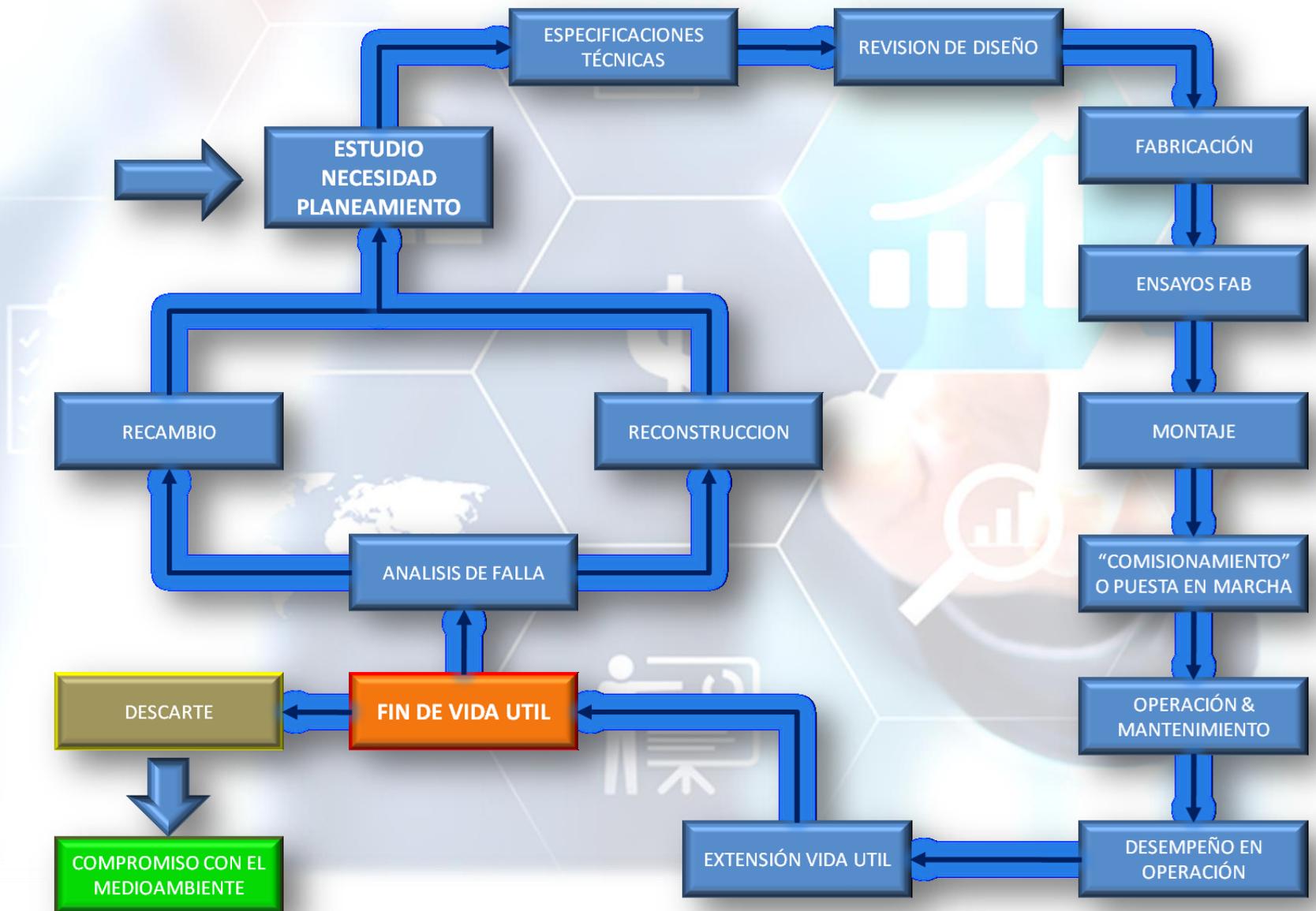
- Prepuesta en servicio.
- Vida esperada.
- Fin de la vida.

En la figura se observan las fases que componen esta etapa. Podemos realizar el siguiente detalle.

- 1.- Especificaciones**
- 2.- Diseño, fabricación, calidad**
- 3.- Ensayos de fábrica.**
- 4.- Transporte, instalación, comisión**



Ciclo de vida de los Transformadores



Estudios de Planeamiento

- Este es el inicio del proceso de vida de la unidad (nace con la evaluación de las necesidades operativas).
- El parámetro directriz de este estudio es la Potencia Nominal de la unidad a ser adquirida, los valores de las tensiones, sus entornos de operación son muy importantes .
- La compra se ajuste a la necesidades operativas, siendo a su vez económicamente viable.

La publicación de CIGRE #248 2004 (WG A2.20) **Economics of Transformer Risk Management, Specification and Purchase, Operation and Maintenance, Repair versus Replacement** decisión process.

Puede ser un gran aporte a las Especificaciones Técnicas del transformador, Planilla de Datos Garantizados (PDG), son de gran importancia para el desempeño futuro de la unidad, en su proceso de compra.

Estudios de Planeamiento

- Este es el inicio del proceso de vida de la unidad (nace con la evaluación de las necesidades operativas).
- El parámetro directriz de este estudio es la Potencia Nominal de la unidad a ser adquirida, los valores de las tensiones, sus entornos de operación son muy importantes .
- La compra se ajuste a la necesidades operativas, siendo a su vez económicamente viable.

La publicación de CIGRE #248 2004 (WG A2.20) **Economics of Transformer Risk Management, Specification and Purchase, Operation and Maintenance, Repair versus Replacement** decisión process.

Puede ser un gran aporte a las Especificaciones Técnicas del transformador, Planilla de Datos Garantizados (PDG), son de gran importancia para el desempeño futuro de la unidad, en su proceso de compra.

Especificaciones técnicas

- Las especificaciones técnicas del transformador, son de gran importancia para el futuro desempeño de la unidad, en ellas, el operador debe explicitar además de todas las exigencias del sistema eléctrico, las condiciones ambientales a las que se someterá a la unidad durante la vida de la misma.
- Básicamente está compuesta por las propias especificaciones técnicas generales y particulares, además es conveniente el uso de la Planilla de Datos Garantizados donde se explicitarán todas las exigencias técnicas requeridas por el comprador de la unidad.

Verificación del diseño

- Está probada la utilidad de especificar y realizar una “revisión del diseño” por un especialista experto en el proyecto y diseño de transformadores, en ella se verifican todos los parámetros que se puedan analizar, tanto los ofrecidos como los garantizados en la planilla de oferta, como aquellos que permiten verificar los parámetros ofrecidos.

Inspección del proceso de fabricación

- Las instalaciones donde se fabrica la unidad, así como la pericia técnica de los operarios de la planta para ejecutar la manufactura del transformador, deben ser verificadas apropiadamente las tareas básicamente son:
- Revisión del programa de control de calidad según ISO 9000 o similar
- La trazabilidad de los materiales
- Los Controles de Calidad y las Verificaciones que se realizan en cada etapa del proceso de fabricación.

Ensayos de Recepción

Las unidades antes de salir de fábrica deben ser ensayadas convenientemente de acuerdo a la norma IEC N 60076, especialmente para verificar si el espécimen responde a las características técnicas pactadas en la compra, también será un efectivo control, para cuando se realice el transporte y el montaje en sitio. Es por ello, que el resultado de algunos ensayos de rutina, permite su uso como referencia para asegurar que el montaje en el emplazamiento fue bien realizado.



Estos ensayos son:

- **Ensayos Tipo**
- **Ensayos de Rutina**
- **Ensayos de comisionamiento**
- **Controles de Montaje**
- **Ensayos en Sitio (In Situ)**

Ensayos de Tipo

Son especiales para homologar una serie o modelo tipo

- 1) Calentamiento
- 2) Impulso atmosférico tipo
- 3) Impulso maniobra tipo
- 4) Soportabilidad de cortocircuitos
- 5) Codo de saturación
- 6) Temp. núcleo 24hs
- 7) Temp. bobinado 24hs

Ensayos de Rutina

Son aquellos que se realizan a todas las unidades antes de salir de Fábrica

- 1) Relación de transformación
- 2) Polaridad
- 3) Resistencia de bobinados
- 4) Tensión o impedancia de cortocircuito
- 5) Perdidas en el cobre
- 6) Corriente excitación a Tensión nominal $\pm 10\%$
- 7) Perdidas en el hierro a Tensión nominal $\pm 10\%$
- 8) Impulso atmosférico
- 9) Impulso maniobra
- 10) Tensión aplicada
- 11) Tensión inducida con medición de Descargas Parciales (DP)
- 12) Tangente delta
- 13) Aislación de bobinados
- 14) Corriente de excitación en 380 v
- 15) Aislación de núcleo
- 16) Circuitos auxiliares
- 17) Nivel sonoro y rlv
- 18) Respuesta en Frecuencia. (FRA) en el origen
- 19) Accesorios y sus sistemas auxiliares
- 20) Protecciones propias del transformador

Ensayos de comisionamiento

Los ensayos de comisionamiento, o de puesta en marcha, se realizan en el sitio ya montado, son en general, los que verifican el funcionamiento correcto y seguro de la máquina, sus accesorios y las protecciones, pero también muchas mediciones servirán como dato de partida para el historial que el responsable de la explotación deberá recurrir, para evaluar cualquier cambio de valor que se aprecie fuera de lo normal.

Controles de Montaje

- 1) **Funcionamiento de refrigeración, bombas y ventiladores**
- 2) **Funcionamiento de auxiliares**
- 3) **Funcionamiento de las protecciones**
- 4) **Funcionamiento de alarmas y señales**
- 5) **Sistema de puesta a tierra**
- 6) **Conexión de potencia**
- 7) **Funcionamiento del R:B:C en todos sus puntos verificando los enclavamientos.**

Ensayos en Sitio

1) Relación de Transformación , 2) Polaridad , 3) Resistencia de bobinados, 4)Tangente delta , 5) Aislación de bobinados , 6) Corriente de excitación en 380 V , 7) Aislación de núcleo , 8) Circuitos auxiliares , 9) Protecciones propias y del sistema , 10) Respuesta. en Frecuencia. (FRA) en el sitio de destino.

La operación

Existen una serie de datos que por sus características deben ser tenidos en cuenta y acciones a ser realizadas para operar el transformador en forma confiable, también poder detectar una variación en la performance de desempeño de la unidad.

- 1) Históricos de temperaturas de operación equipos**
- 2) Las temperaturas ambientales de las SSEE.**
- 3) Ciclos anuales de cargas máximas.**
- 4) Ciclos de cargas diarias.**
- 5) Operaciones en sobrecarga.**
- 6) Ocurrencia de corto-circuitos cercanos**
- 7) Solicitación por sobretensiones**

ETAPAS DE VIDA ESPERADA

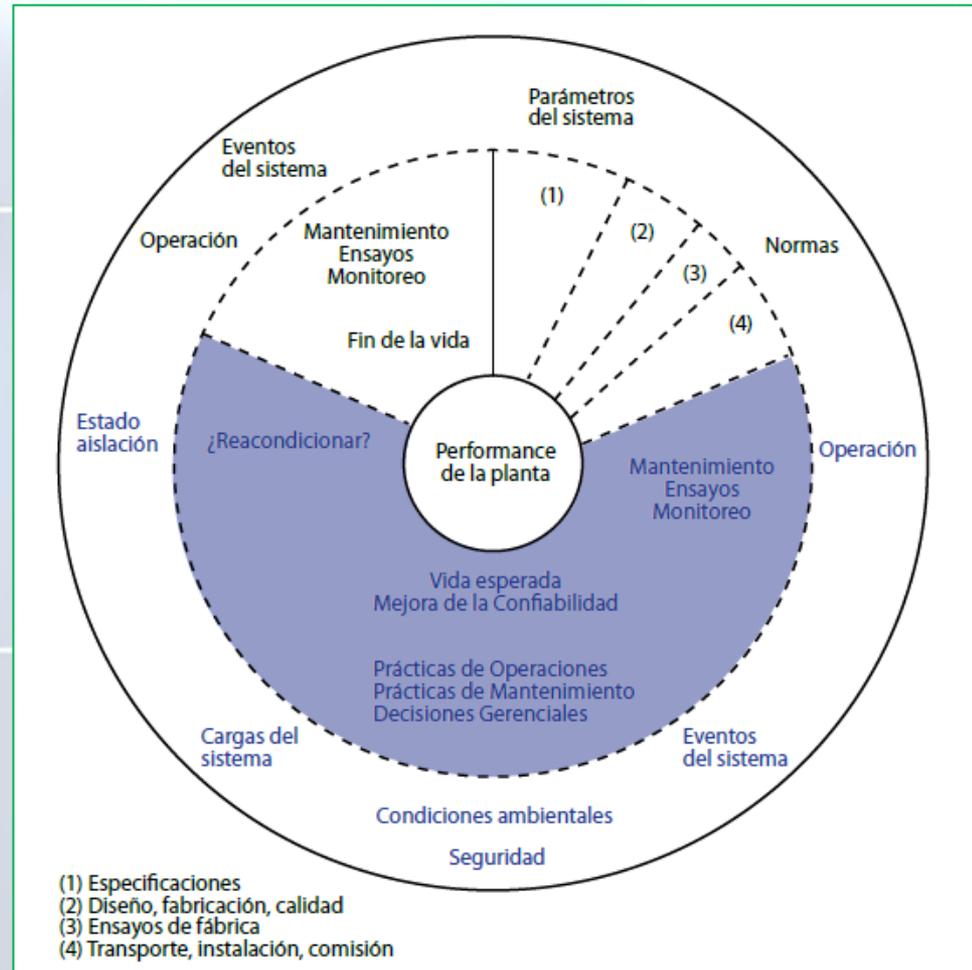
Operación y Mantenimiento

En la figura se observan las fases que determinan esta etapa del ciclo.

A estos fines, se define la vida esperada como el tiempo desde el inicio del servicio del transformador hasta el punto en donde el régimen de mantenimiento periódico necesita cambiarse por uno que requiera considerar el reacondicionamiento o bien el reemplazo de este, con el fin de evitar fallas significativas.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Refiere a todas aquellas decisiones y tareas que involucran a las áreas mencionadas, cuyo objetivo será el de determinar el estado de condición del transformador, mejorando su confiabilidad operativa, extendiendo así su vida esperada.



- (1) Especificaciones
- (2) Diseño, fabricación, calidad
- (3) Ensayos de fábrica
- (4) Transporte, instalación, comisión

MANTENIMIENTO

Se deberá establecer un plan de ciclo de vida, el cual deberá contemplar:

- Diagnosticar el estado de los transformadores y estimar el riesgo de falla.
- Análisis de las causas raíces.
- Análisis de la obsolescencia.
- Requerimientos de repotenciación, incrementos de la carga e impacto en la vida esperada.
- Evaluación de la confiabilidad, mantenimiento del transformador en servicio.
- Seguimiento del estado del sistema de aislación, implementar técnicas de diagnóstico, seguimiento del envejecimiento.
- Implementación de técnicas de diagnóstico.
- Establecer/revisar tareas de MP, MPd.
- Minimizar las acciones correctivas y adoptar las más efectivas y eficientes.
- Establecer un programa de reacondicionamiento.

Existen una serie de ensayos, que pueden ser realizados tanto en laboratorio como en campo, y además, ser repetidos sin mayor costo; estos son importantes, dado que es el único método que se dispone para evaluar si el transformador aún es confiable, o si se detecta una variación que indique probabilidad de falla durante el servicio.

LAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

Es la combinación de diferentes filosofías de mantenimiento logrando en el sistema la confiabilidad requerida, para distintos componentes del transformador.

Mantenimiento Preventivo Eléctrico (EPM)

El propósito del (EPM) es reconocer ciertos factores, que puede ser la causa de fallas eléctricas y funcionamientos defectuosos, corrigiendo de sus apartamientos.

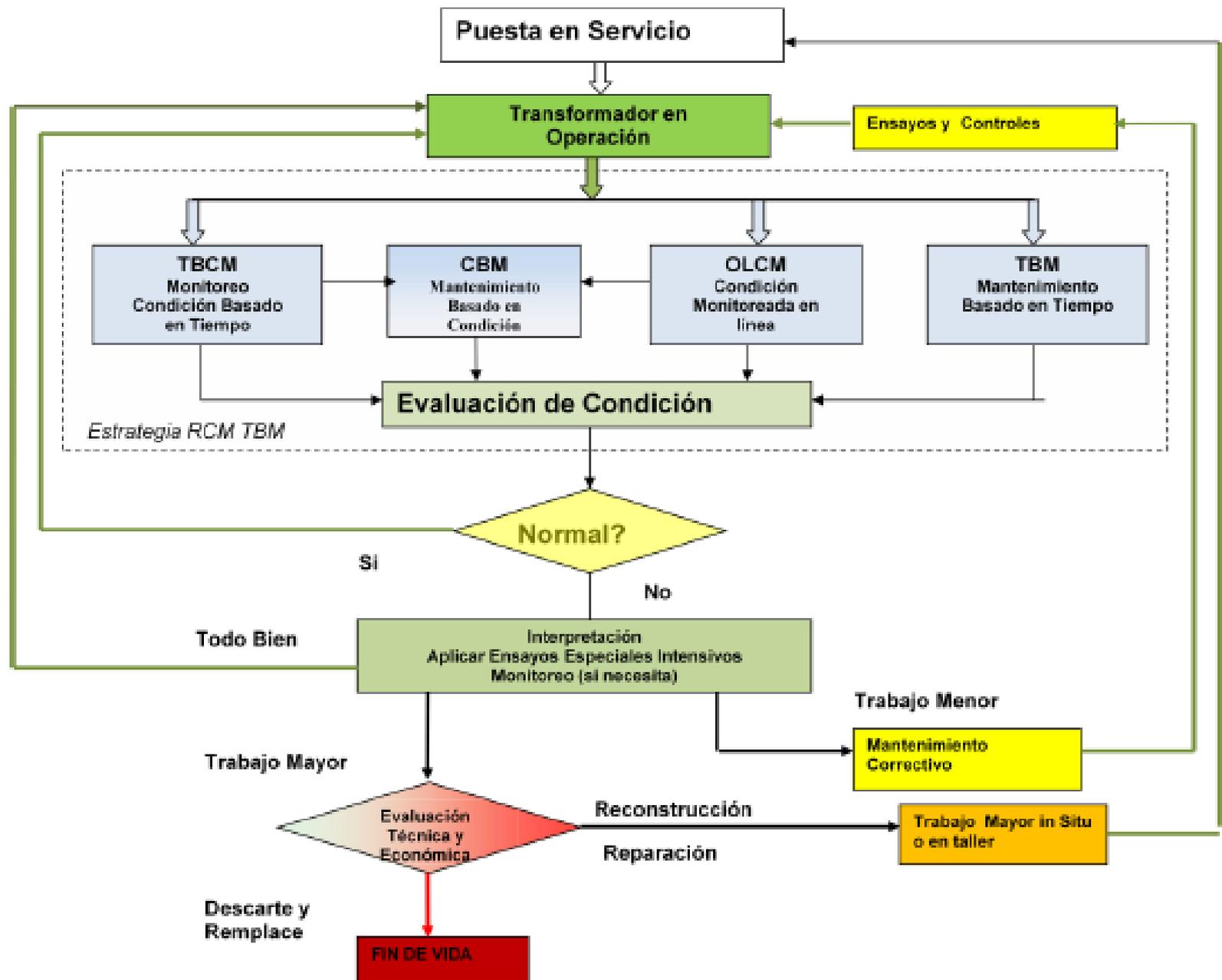
El propósito de la mayoría de las actividades de EPM es prevenirlos, retardarlos, o mitigar sus efectos.

la combinación de diferentes filosofías de mantenimiento además de tecnologías muy modernas, generan el desarrollo de la propuesta del **Grupo de Trabajo A2-34 de CIGRE en la Guía de Mantenimiento de Transformadores doc. # 445.**

Logrando para el sistema la confiabilidad requerida .

Para aplicar esta estrategia de mantenimiento, cada transformador tiene factores de criticidad de seguridad, los medioambientales y operacionales combinados :

- 1) Mantenimiento Basado en Tiempo (TBM)**
- 2) Mantenimiento Basado en Condición (CBM)**
- 3) Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM)**



Ensayos y Monitoreo

El objetivo es diagnosticar el estado del transformador.

Muchos ensayos y monitoreo miden síntomas y no la causa de la falla. Se requiere de la intervención del especialista para correlacionar los resultados de los distintos ensayos y monitoreo, y es importante el aporte experto en las inspecciones del transformador.

Tener en cuenta que no existe un único ensayo y monitoreo que permita establecer un diagnóstico integral del estado del transformador, y considerar que existen al menos cuatro razones para justificar los ensayos y monitoreo:

- Determinar la condición del transformador y estimar el riesgo de falla.
- Priorización del mantenimiento.
- Ensayos de comisión y garantía.
- Determinación de las causas raíces.

Análisis de fallas y Diagnósticos

Se deberá tener en cuenta tres clases de falla:

- Relacionadas con el envejecimiento: la probabilidad de falla se incrementa en algún punto en el tiempo.
- No relacionadas con el envejecimiento: no existe un punto cierto en el tiempo en donde la probabilidad de falla se incremente.
- Ocultas: no se manifiestan bajo condiciones normales de operación.

Importante: Los transformadores poseen una mayor probabilidad de fallar por problemas derivados en el sistema de aislación.

No se puede predecir el tiempo de falla ni la vida remanente.

Las inspecciones visuales son decisivas en la determinación del estado de condición del transformador. Para esto, se deberá tener en cuenta lo siguiente:

- El éxito de la gestión del transformador está asociado a las inspecciones eficientes realizadas.
- Las inspecciones deberán ser efectuadas, por lo menos, por un especialista.
- La planificación de las inspecciones está determinada por la táctica de mantenimiento adoptada.
- La inspección planificada debe identificar los recursos necesarios y el tiempo disponible (transformador fuera de servicio).

CONTROL DE VIDA DE AISLACIONES EN PAPEL ACEITE

Para evaluar el desarrollo de la vida de las aislaciones combinadas sólida, líquida tipo papel-aceite, se deberán tener en cuenta un determinado número de datos, de "efectos y acciones", entre los cuales a primera vista se pueden plantear los siguientes enfoques:

- **Vectores de degradación**
- **Evaluación de la degradación.**
- **Acciones para atenuar el envejecimiento**

Vectores de degradación

Vale resaltar la importancia de los registros de operación para la investigación del comportamiento del equipo o para el análisis de las fallas que hubieran ocurrido.

Se engloba en estos vectores a los datos históricos de la operación del equipo:

- **Datos históricos de las temperaturas de operación de los equipos .**
- **Seguimiento de las temperaturas ambientales máximas de las Subestaciones.**
- **Ciclos anuales de cargas máximas.**
- **Ciclos de cargas diarias**
- **Operación en vacío.**
- **Solicitud por sobretensiones.**
- **Operación en sobrecarga.**
- **Ocurrencia de corto-circuitos cercanos.**
- **Transitorios de energizaciones , arranques con gran corriente de Inrush.**
- **Calidad del aceite. Contenido de Agua. Oxígeno, Gases y Contaminantes.**

El mantenimiento y la evaluación de la degradación

La medición de parámetros de naturaleza fisicoquímica, permite obtener un amplio panorama, tanto de las situaciones de carácter histórico, como de aquellos problemas de naturaleza evolutiva.

El menú de posibilidades es muy grande, se enumeran aquí algunos de ellos, quedando al buen criterio del especialista la administración, además de la selección de los mismos.

Por lo general, tenemos dos tipos de ensayos, los que se realizan sobre la máquina: que para ejecutarlos se necesita disponerla fuera de servicio y los que se realizan sobre el aceite, dado la facilidad de realizar que se tiene para la extracción con la máquina en servicio, esto ofrece un menú amplio de posibilidades.

- **Ensayos sobre la unidad y la Aislación sólida**
- **Análisis fisicoquímicos en el Aceite**

Ensayos sobre la unidad y la Aislación sólida

- 1) Angulo de pérdida en aislación. Tang. δ .
- 2) Resistencia de aislación R_a
- 3) Índice de polarización IP
- 4) Relación de absorción dieléctrica RAD
- 5) Polarización y depolarización dieléctrica en C.C. - PDC.
- 6) Linealidad de resistencia de aislación con la tensión.
- 7) Índice de tensión residual de la polarización del aislante.
- 8) Descargas parciales.
- 9) Medición de la corriente de magnetización en B.T.
- 10) Respuesta en frecuencia F.R.A.
- 11) Tang. Delta en barrido de frecuencia y/o Espectrografía Dieléctrica.
- 12) Grado de polimerización del papel

Análisis fisicoquímicos en el Aceite

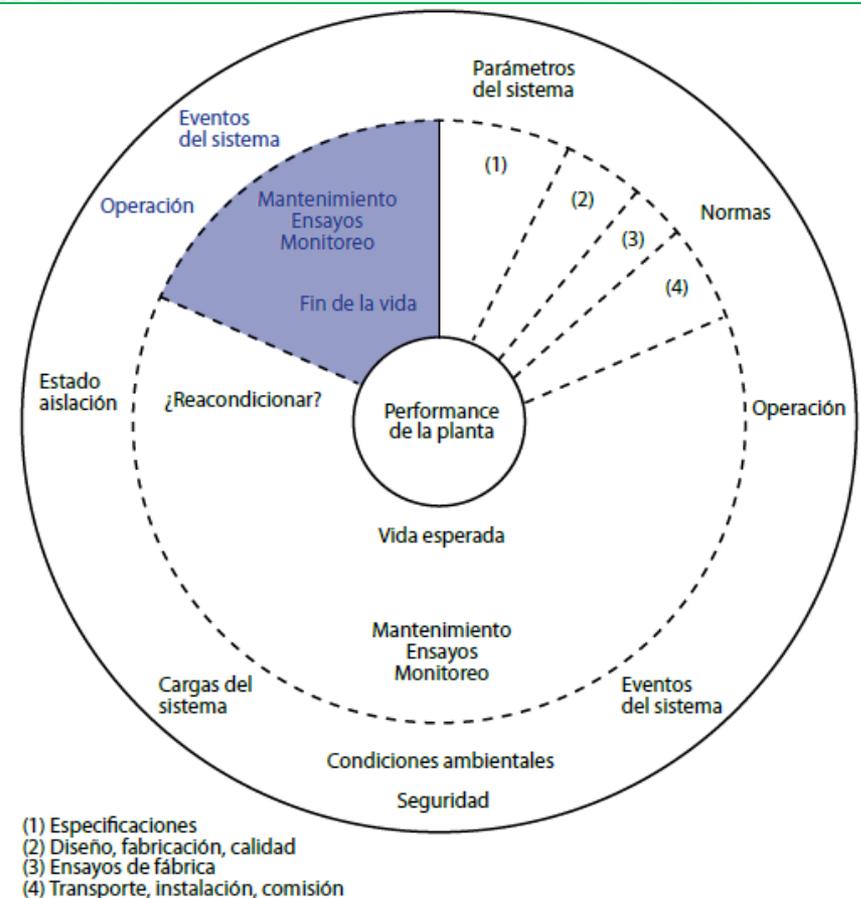
- 1) Contenido de humedad
- 2) Acidez (índice de neutralización)
- 3) Concentración de oxígeno en el aceite
- 4) Contenido de gases combustibles.
- 5) Tensión interfasial.
- 6) Colorimetría y espectrofotometría
- 7) Contenido de inhibidores (DBPC o BTH).
- 8) Presencia de barro.
- 9) Partículas cuantificación y clasificación.
- 10) Estabilidad a la oxidación.
- 11) Cromatografía en fase líquida contenido de furanos.
- 12) Cantidad de PCB.
- 13) Rigidez dieléctrica
- 14) Factor de pérdidas Tang δ .
- 15) Medición de resistividad volumétrica.
- 16) Contenido de contaminantes Azufre Cobre etc.
- 17) Azufre corrosivo

ETAPA DE FIN DE VIDA

En esta etapa, el transformador posee un alto riesgo de falla debido a un proceso de envejecimiento ya avanzado.

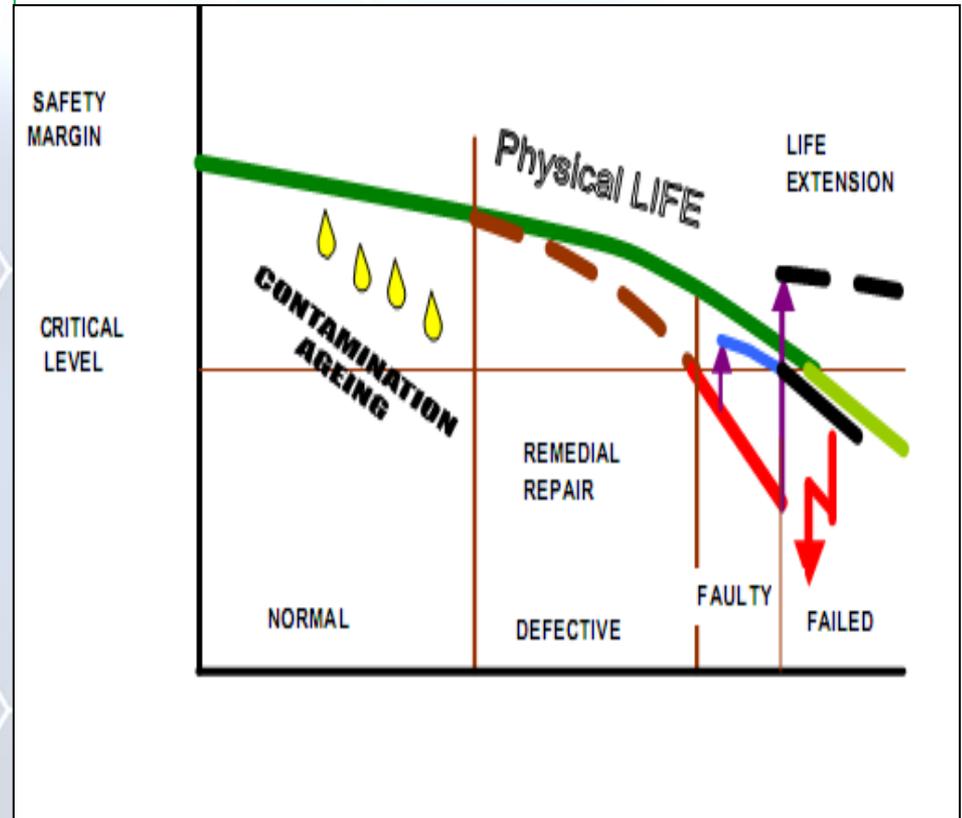
Por lo tanto, el sistema de operación y mantenimiento convencional, definido en la etapa de vida esperada, deberá modificarse a uno que requiera tener en cuenta la adaptación de los estados de carga, el reacondicionamiento o bien el reemplazo del transformador.

Es en esta fase que se deberá ejecutar el plan de reacondicionamiento previsto en la vida esperada.



Extensión de la vida útil, Evaluación del Riesgo de falla

El Gerenciamiento de la extensión de la vida útil de un Transformador debe ser realizada cuando su aislamiento sólido tiene aún suficiente rigidez mecánica y aún es confiable, o si se detecta un aumento en el índice de falla durante el servicio, entramos en la zona roja.



Sin Historial y Análisis Sistemático del mismo, la batalla contra el deterioro es una utopía, desde el punto de vista técnico rentable cuando el mantenimiento debe estar alineado al negocio. Serán solo esfuerzos puntuales y victorias efímeras sobre el deterioro.

Bibliografía

- Programa de Gestión del Mantenimiento – 2014- propimes Techint.
- Gestión de Activos, Operación y Mantenimiento de Transformadores Universidad Tecnológica Nacional – Autor: Ing. Elect. FERNANDO MARULL Concordia 2013
- CICLO DE VIDA DE TRANSFORMADORES Revista: Ingeniería Eléctrica Ing. Ernesto Zelaya Nova Miron S.A: Noviembre 2015

