

# NOVA MIRON

## Nota técnica: “Modelo del Costo del Ciclo de Vida para Transformadores. Parte 5”

### 1. Introducción

La adquisición de un transformador (de potencia o de distribución), representa un proceso de toma de decisiones de características complejas, en la etapa inicial del Ciclo de Vida.

Así también, ocurre para todas aquellas actividades pertenecientes al Ciclo de Vida (Operación, Mantenimiento), que se desarrollan a lo largo del tiempo, hasta la disposición de la máquina.

Por lo general, para abordar este problema, se implementan métodos convencionales, cuyas bases se sustentan en adoptar, como parámetro, al correspondiente costo inicial del transformador.

En tal sentido, no se incorpora en el análisis, la evaluación integrada de los aspectos tecnológicos y económicos.

En el presente artículo, vamos a implementar un método, enfocado en el Costo del Ciclo de Vida (LCC), que permita, una vez determinada la estructura de costos de la máquina, poder adoptar criterios de decisión más precisos, en la toma de decisiones de la Gerencia de Activos, .

### 2. Modelo LCC del transformador

Sabemos que el transformador, ya sea de potencia o de distribución, es uno de los activos más importantes y críticos en los sistemas eléctricos de potencia.

También sabemos, que los riesgos asociados al mismo, poseen un gran impacto en los costos y la confiabilidad integral del sistema.

El desarrollo y aplicación del método del Análisis del Costo del Ciclo de Vida (ALCC), ha permitido estimar y abordar, en una forma estructurada, todos los elementos de costos (Estructura de Costos), con el objetivo de generar un perfil de costos anticipados, que constituya la base de especificación de criterios, para la toma de decisiones en la Gerencia de Activos.

En tal sentido, se impone la gestión del activo transformador, a través de la gestión del Costo del Ciclo de Vida, la cual se encuentra ampliamente documentada en diferentes normas (por ej., y como ya habíamos detallado en partes previas, la norma IEC 60300-3-3).

A tales fines, se han desarrollado un conjunto de modelos LCC para transformadores, de base determinista, en relación a la vida útil asociada y a la estructura de costos derivada.

La utilidad de los mismos, se encuentra en la capacidad de poder estimar el costo del ciclo de vida, como un criterio de decisión fundamental para implementar la compra de nuevos transformadores, o bien el reemplazo de unidades, las cuales se encuentran operando en el sistema eléctrico de potencia.

Si bien no es el objetivo del presente trabajo, será importante destacar que la precisión en los resultados del modelo LCC, dependerá de considerar a los elementos de costos como variables aleatorias, con alguna distribución estadística asociada, teniendo en cuenta la base práctica del análisis.

En este trabajo adoptaremos un modelo determinista, para la estimación de los elementos de costos del ciclo de vida del transformador.

---

## NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • [www.novamiron.com.ar](http://www.novamiron.com.ar)

**SERVICIO DE ATENCION PERMANENTE** Cel.: 15 4945 1170 / 71/ 72

# NOVA MIRON

### 3. Estructura de costos del transformador

Recordemos que un modelo LCC es una representación simplificada de la realidad, a través del cual podemos extraer características primarias del mundo real y sintetizarlas en características de estimación de costos.

Como ya detallamos en partes previas, el modelo LCC deberá representar lo más fielmente posible, las características del sistema, junto al alcance y el objetivo de uso, la operación, las tácticas de mantenimiento establecidas y los eventuales escenarios de soporte, así como cualquier restricción y limitación sobre el transformador bajo análisis.

El modelo propuesto se basa en la siguiente fórmula:

$$LCC = CA + CP + CD$$

Siendo:

LCC = costo del ciclo de vida del transformador.

CA = costo de Adquisición o de Inversión (comprende la compra del transformador y el capital requerido para operar adecuadamente la máquina).

CP = costo de Propiedad

CD = costo por Disposición.

A su vez, el costo de Propiedad podemos expresarlo en las siguientes componentes:

$$CP = CO + CM + CF$$

CO = costo de Operación (fundamentalmente es el costo de pérdida del transformador).

CM = costo de Mantenimiento.

CF = costo por Falla del transformador.

Quedando la expresión general del LCC:

$$LCC = CA + CO + CM + CF + CD$$

Conviene aclarar que, la aplicación de este método requiere de una comprensión detallada del ciclo de vida del transformador, junto a las actividades a implementar en cada una de sus etapas.

Lo anterior también exige conocer las distintas relaciones entre actividades del ciclo, con el fin de asegurar un correcto desempeño operativo del transformador, así como los aspectos de seguridad, mantenibilidad y otras características del mismo y que en definitiva aportan a los costos del ciclo de vida.

Podemos decir que, el transformador óptimo, en un conjunto de alternativas especificadas, será aquel que minimiza la función LCC.

---

## NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • [www.novamiron.com.ar](http://www.novamiron.com.ar)

**SERVICIO DE ATENCION PERMANENTE** Cel.: 15 4945 1170 / 71/ 72

# NOVA MIRON

Tendremos:

## a) Costo de Adquisición

El costo de Adquisición o de Inversión inicial, contiene todos los costos antes de la puesta en servicio del transformador, el cual abarca la etapa de Pre Puesta en Servicio del Ciclo de Vida. Incorpora la compra (especificaciones, diseño, fabricación, ensayos de fábrica), el costo del transporte, el costo de instalación y montaje, el costo del comisionamiento y la puesta en servicio.

Podemos expresar este costo de la siguiente forma:

$$CA = CA_E + CA_{TI} + CA_{CPS}$$

Donde:

$CA_E$  = costo de Adquisición por especificaciones, diseño (Ingeniería), proyecto del transformador (PMO), fabricación, ensayos.

$CA_{TI}$  = costo de transporte, instalación y montaje del transformador.

$CA_{CPS}$  = costo de comisionamiento y puesta en servicio. Además, incorpora el costo de repuestos, el costo por servicios en el lugar de trabajo, así como el costo de capacitación del personal de Operación y Mantenimiento.

Por lo general y atendiendo a un enfoque práctico, este costo puede estimarse a partir de las cotizaciones del proveedor.

## b) Costo de Operación

Los costos de operación comprenden, principalmente, a los derivados de las pérdidas del transformador.

Un enfoque para la estimación del cálculo, puede establecerse a partir de la siguiente expresión:

$$CO = \mu \times CE \times (P_0 + k^2 P_{cc}) \times 8760$$

Siendo:

CO = costo anual de pérdida del transformador.

$\mu$  = tasa anual de pérdida de carga.

CE = costo de la energía eléctrica (\$/kWh).

$P_0$  = pérdida en vacío del transformador (kW).

$P_{cc}$  = pérdida en cortocircuito del transformador (kW).

k = factor de carga del transformador.

---

## NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • [www.novamiron.com.ar](http://www.novamiron.com.ar)

**SERVICIO DE ATENCION PERMANENTE** Cel.: 15 4945 1170 / 71 / 72

# NOVA MIRON

El parámetro  $\mu$  viene dado por:

$$\mu = \epsilon \times \frac{T_{\max}}{8760} + (1 - \epsilon) \times \left(\frac{T_{\max}}{8760}\right)^2$$

Donde:

$\epsilon$  = coeficiente empírico a determinar, en función de la red eléctrica.

$T_{\max}$  = cantidad anual de horas operando el transformador en carga máxima.

Otro enfoque viene dado por:

$$CO = C_{pv} + C_{pc} = aP_0 + bP_c$$

Siendo:

$C_{pv}$  = Costo por pérdidas en vacío del transformador.

$C_{pc}$  = Costo por pérdidas en carga del transformador.

$P_0$  = Pérdidas en vacío del transformador, certificada por el fabricante.

$P_c$  = Pérdidas en carga del transformador, certificada por el fabricante.

$a$  = Costo específico equivalente de las pérdidas en vacío.

$b$  = Costo específico equivalente de las pérdidas en carga.

Con el fin de dar una aproximación sencilla al desarrollo y aplicación del modelo LCC, se suele considerar el costo de mayor peso, en la evaluación a lo largo de todo el ciclo de vida del transformador. Este costo corresponde al de Propiedad.

El Costo de Propiedad, en esta versión simplificada del modelo, se puede asignar al Costo de Operación, junto al Costo de Mantenimiento (ítem c) del transformador.

## c) Costo de mantenimiento

Esta componente de costo vendrá dada por:

$$CM = CO_I + CO_{PV} + CO_{PD}$$

Siendo:

$CO_I$  = costo de inspección (especializada o no especializada).

$CO_{PV}$  = costo de mantenimiento preventivo.

$CO_{PD}$  = costo de mantenimiento predictivo.

---

## NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • [www.novamiron.com.ar](http://www.novamiron.com.ar)

**SERVICIO DE ATENCION PERMANENTE** Cel.: 15 4945 1170 / 71 / 72

# NOVA MIRON

El CM se establece a través de un modelo lineal, en donde se deberá tener en cuenta el envejecimiento y el riesgo de falla consecuente del transformador.

## d) Costo de falla

El costo de falla comprende al costo de pérdida al momento en que el transformador entra en un estado de falla y es retirado del servicio. También se incorpora el correspondiente costo de reparación/restauración de la unidad.

Se basa en el modelo de seguridad de los sistemas de potencia eléctricos, del tipo  $(n - 1)$ , es decir, el diseño de la red debe contemplar que, ante la pérdida de una unidad, se garantice que no se pierda la capacidad de la misma.

Se asume, en este modelo de costos, que un solo transformador tenga asociada una baja probabilidad de perder carga y el costo de pérdida, por tal motivo, se puede omitir en el cálculo. Se expresa de la siguiente forma:

$$CF = S_n \times \cos(\varphi) \times T_{cm} \times T_{ip} \times bf + \lambda \times MTTR \times Cr$$

Donde:

$S_n$  = potencia nominal del transformador.

$\cos\phi$  = factor de potencia promedio.

$T_{cm}$  = tasa de carga promedio.

$T_{ip}$  = tiempo de interrupción en la operación del transformador.

$bf$  = beneficio específico obtenido de la operación del transformador.

$\lambda$  = tasa de falla del transformador.

$MTTR$  = tiempo medio de reparación/restauración del transformador.

$Cr$  = costo medio de reparación/restauración por hora.

## e) Costo de disposición

El costo de disposición del transformador se puede expresar de la siguiente manera:

$$CD = CD_T - CD_R$$

En donde:

$CD$  = costo de disposición.

$CD_T$  = costo de gestión de la disposición (incluye principalmente mano de obra, transporte, costo de protección del medio ambiente, etc.). Comprende a todos aquellos elementos de

---

## NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • [www.novamiron.com.ar](http://www.novamiron.com.ar)

**SERVICIO DE ATENCION PERMANENTE** Cel.: 15 4945 1170 / 71/ 72

# NOVA MIRON

costos que se encuentran directamente asociados a las actividades de disposición del transformador.

$CD_R$  = valor de residuo obtenido de la disposición.

Por lo general, el costo de disposición se puede obtener según una proporción preestablecida y justificada del costo de adquisición.

## 4. Análisis LCC

Debido a que los gastos se efectivizan en diferentes momentos del ciclo de vida del activo, todos los costos futuros deberán expresarse en términos de sus valores, en un determinado momento especificado para que el análisis sea viable.

Es decir, el perfil de costos podrá ser desarrollado para implementar el modelo, atendiendo a los efectos de la inflación, la tasa de interés, etc.

Se tratará entonces, de establecer un monto, el cual se deberá reservar en el tiempo presente, para cubrir un costo estimado a tiempo futuro, considerando tanto la inflación como la tasa de interés.

El valor actual o valor presente del LCC, se podrá calcular utilizando la siguiente expresión, considerando solamente el efecto de la tasa de interés:

$$LCCP = \sum_{n=0}^T C_n \frac{1}{(1+i)^n}$$

Siendo:

LCCP = valor actual o presente del LCC de un transformador (puede ser una alternativa de adquisición)

$C_n$  = costo correspondiente al año "n".

$n=0$  = representa el primer año para el cual se acumularán los costos.

$T$  = representa el último año para el cual se acumularán los costos.

$i$  = tasa de interés.

A continuación se detallan un conjunto de pasos a seguir, para implementar un efectivo modelo y análisis LCC, que permita adoptar decisiones en la Gestión de Activos, en particular de un transformador:

- Desarrollar la estructura de desglose del transformador.
- Desarrollar la estructura de desglose de los costos (CBS).
- Establecer una selección de categorías de los costos.
- Establecer una selección de los elementos de los costos.
- Proceder a la estimación de los costos.

---

## NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • [www.novamiron.com.ar](http://www.novamiron.com.ar)

**SERVICIO DE ATENCION PERMANENTE** Cel.: 15 4945 1170 / 71 / 72

# NOVA MIRON

- Incorporar en el modelo las obligaciones de seguridad y de medio ambiente (costos asociados).
- Incorporar en el modelo las incertidumbres y los riesgos en la gestión del ciclo de vida del transformador (costos asociados).
- Incorporar un análisis de sensibilidad, con el fin de detectar los componentes de mayor impacto (Vectores de Costos).
- Presentación de los resultados.

Los resultados del análisis LCC serán la base para conformar los criterios de decisión, que permitirán asistir en la adquisición de un transformador, así como la de evaluar y seguir las actividades de operación y mantenimiento y finalmente proceder a una eficiente disposición de la máquina.

Departamento de ingeniería.  
Nova Mirón S.A

---

## **NOVA MIRON S.A.**

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • [www.novamiron.com.ar](http://www.novamiron.com.ar)

**SERVICIO DE ATENCION PERMANENTE** Cel.: 15 4945 1170 / 71/ 72