

ANÁLISIS COMPARATIVO del IMPACTO AMBIENTAL de COMPONENTES de TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS

Jaime López Soto ^(p); Pilar Ramírez López-Para; Faustino de la Bodega y Bilbao;

José Ramón Sáenz Ruiz; Melchor Gómez Pérez

Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea

RESUMEN

Durante el proceso de diseño, se generan gran número de opciones que el diseñador analiza para elegir la que crea más conveniente. Para desarrollar proyectos compatibles con el medio ambiente, debe ser posible incluir aspectos ambientales de un producto en el análisis y la selección de las opciones de diseño. Se necesita un método para poder comparar las diversas opciones que baraja el diseñador durante el proceso de diseño con el propósito de hacer productos más compatibles con el medio ambiente.

En el proyecto realizado se ha aplicado un método de coeficientes de ponderación. Esto permite calcular un solo valor para el impacto ambiental total basado en los efectos calculados. Este valor consiste, por lo tanto, en un número que indica el impacto ambiental total de un material o proceso, a partir de los datos obtenidos del Análisis del Ciclo de Vida (LCA).

ABSTRACT

During the design process a large number of options are usually generated. These solutions are analysed by the designer after which the best design options are chosen. To enable environmentally-aware designs to be produced it must be possible to include the environmental aspects of a product in the analysis and selection of design options. A method is needed to compare the different options the designer have at own's disposal in the design process.

The executed project has applied a weighting method. This has enabled one single score to be calculated for the total environmental impact based on the calculated effects. This score is a number that indicates the environmental impact of a material or process, based on data from a Life Cycle Assessment (LCA).

1 INTRODUCCIÓN

Las materias primas tienen que extraerse, el producto tiene que fabricarse, distribuirse, mantenerse y por último, eliminarse. Todo ello daña el medio ambiente de una forma u otra. Durante la utilización de los productos suele producirse también un impacto ambiental, ya que en esta etapa del Ciclo de Vida se suele consumir energía o materiales. Si deseamos valorar el daño ambiental de un producto, debemos estudiar todas las etapas de su Ciclo de Vida.

La complejidad del proceso de decisión sobre aspectos ambientales supone muy a menudo un obstáculo insalvable para los diseñadores. Aunque el Análisis del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment o LCA) es una buena herramienta para valorar el comportamiento ambiental de un producto, y aunque es utilizada a menudo por los diseñadores, LCA supone una gran inversión de tiempo y dinero. Los diseñadores tienen que tomar numerosas decisiones, especialmente cuando se trata de productos complejos.

El Eco-indicator es un método LCA especialmente destinado al diseño de productos, y ha demostrado ser una poderosa herramienta para los diseñadores a la hora de interpretar los resultados de los LCA mediante sencillos números o unidades, los llamados Eco-indicadores. Los Eco-indicadores son números que expresan el impacto ambiental total de un proceso o producto. Con los Eco-indicadores estándar, el diseñador o gestor de productos puede analizar las cargas ambientales de determinados productos durante su Ciclo de Vida.

Los valores estándar de Eco-indicadores se han desarrollado precisamente como una herramienta útil para los diseñadores, una herramienta a emplear en la búsqueda de alternativas más ecológicas, y destinada a uso interno. Sin embargo, los valores estándar de Eco-indicadores no están destinados a ser utilizados en el marketing ambiental, el etiquetado ecológico o para hacer demostraciones en público de que el producto A es mejor que B. Los valores estándar de Eco-indicadores tampoco se han desarrollado para que el gobierno los utilice como patrones o líneas maestras.

El uso de Eco-indicadores sólo tiene un propósito: hacer productos más compatibles con el medio ambiente. Es, por tanto, una herramienta que puede utilizarse en todas las empresas y sectores, y que se centra en el desarrollo de productos y en el (re)diseño de los mismos.

Recientemente se ha publicado la primera norma ISO 14042 sobre el análisis de impactos en el Ciclo de Vida. La metodología de Eco-indicadores empleada para calcular los valores estándar cumple los requisitos de dicha norma, aunque pueda diferir en algunos detalles.

Los valores estándar de los Eco-indicadores se puedan considerar como cifras sin dimensión. Como base se utiliza el ‘punto Eco-indicador’ (Pt). En las listas de Eco-indicadores se emplea normalmente la unidad de milipuntos (mPt). El valor absoluto de los puntos no es demasiado relevante ya que el objetivo principal es el de comparar las diferencias relativas entre productos o componentes. La escala se ha elegido de tal forma que el valor de 1 Pt represente 1 centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo medio.

2 OBJETO DEL ESTUDIO

Los objetos estudiados son la gama de transformadores de distribución de las características:

- Transformadores de cuba elástica o llenado integral.
- Tensiones: 20 – 24 kV / 230 – 400 V y 30 – 36 kV / 230 – 400 V
- Potencia aparente:
 $100 \leq S \leq 2.500 \text{ kVA}$
- Tensión de cortocircuito: $\epsilon_{cc} = 5 \%$
- Refrigeración natural por aceite o silicona
- Según norma UNE 20.138 y recomendaciones UNESA 52.010.

Tabla 1: peso total de “transformadores normalizados”

S (kVA)	P (kg)	
	U = 20 kV	U = 30 kV
100	560	495
160	690	752
250	1035	1105
400	1272	1638
630	1860	1940
800	2360	2365
1000	2550	2655
1250	3053	3130
1600	3550	3860
2000	4000	4200
2500	5420	4600

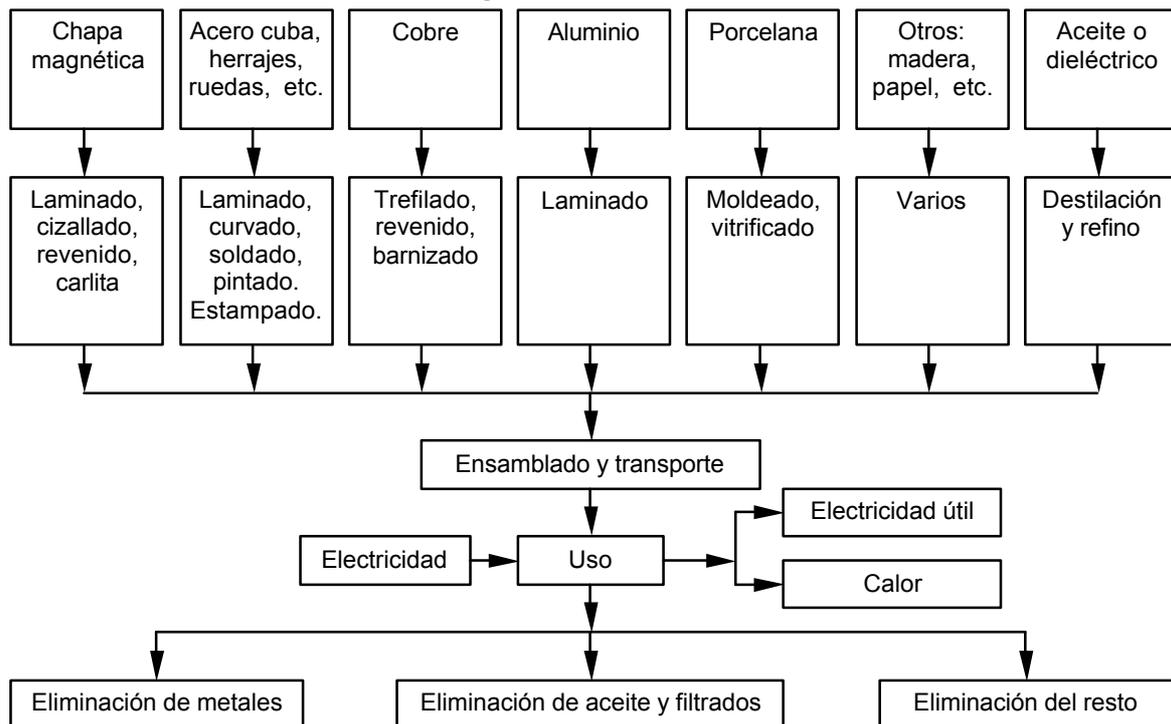
Documento Europeo de armonización CENELEC HD428.

Dado que la cuantificación se va a hacer en porcentaje (%) será necesario conocer el peso total de los “transformadores normalizados” para ambas tensiones (tabla 1).

3 CICLO DE VIDA

Se trata de realizar una panorámica esquemática del Ciclo de Vida del producto, prestando atención tanto a las fases de producción como al uso y a la eliminación de residuos de ese producto (figura 1).

Figura 1: ciclo de vida



Al realizar el Análisis de un Ciclo de Vida, lo más importante es analizar la vida completa del producto, no tanto el producto en sí. Es por tanto necesario tener no sólo una descripción general del producto, sino también conocer su Ciclo de Vida de forma general. El funcionamiento del producto y la forma de eliminar sus residuos son elementos importantes para dicha descripción.

4 MATERIALES Y PROCESOS

Se trata de cuantificar las cantidades de material y los distintos procesos de fabricación.

Con el método LCA, la descripción del producto, su Ciclo de Vida y funcionamiento durante su vida útil recibe el nombre de unidad funcional. Así puede determinarse una cantidad para cada proceso del diagrama de procesos en base a esta unidad funcional y los datos sobre el producto.

Las unidades funcionales que componen los transformadores en estudio, así como el porcentaje de peso que supone, se refleja en la tabla 2. Se ha separado la pintura de su unidad funcional porque, a priori, se piensa que pueda dar un resultado relevante por sí mismo.

Tabla 2: peso de los materiales en %

Materiales	
Acero: cuba, herrajes, tornillería, ruedas, etc.	22,9 ± 1,9 %
Chapa magnética: únicamente para el núcleo magnético	23,9 ± 2 %
Aluminio: en bobinado de B.T.	7 ± 1,5 %
Cobre: en bobinado de A.T.	23 ± 1,5 %
Aceite: llenado integral de la cuba	22,1 ± 1,2 %
Porcelana: para 7 aisladores, 3 de A.T. y 4 de B.T.	0,9 ± 0,4 %
Pintura: en cuba y tapa	0,2 %
Otros: madera, papel, cartón, goma	0,1 %

Los procesos a los que son sometidos los materiales se nombran en el apartado siguiente.

5 PONDERACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Se han creado unas tablas sencillas para realizar los cálculos con los Eco-indicadores.

5.1 Producción

Se incluyen en este apartado la obtención de materias primas, su proceso de transformación y el transporte final. Las tablas 3 a 10 se rellenan completando cada etapa correspondiente del Ciclo de Vida y registrando los valores de los Eco-indicadores relevantes. Seguidamente se calcula el resultado de cada proceso según las unidades funcionales.

Los valores estándar de Eco-indicator se clasifican en:

- Materiales: los indicadores de materiales se miden según la medida de 1 kilo de material.
- Procesos de producción: tratamiento y procesado de varios materiales. Cada tratamiento se expresa en la unidad apropiada al proceso particular (superficie, kilos, metros soldados, etc.).

5.2 Uso

Pertencen a esta parte del ciclo de vida el transporte, la energía y los materiales auxiliares. Para el cálculo se toman los siguientes supuestos:

- Potencia: 100 – 2.500 kVA
- Uso en horas/día: ver figura 2
- Vida útil estimada: 25 años
- Situación y condiciones de uso normales

Tabla 3: núcleo magnético

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Chapa magnética	23,9 kg	370	8843
Laminado en caliente	23,9 kg	30	717
Laminado en frío	10 m ²	54	540
Cizallado	10 ⁰ mm ²	0,00006	60
Revenido	23,9 kg	1,72	41
Carlita	-	(1)	-
Total			10201

Tabla 5: herrajes, tornillería y ruedas

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Acero	10,3 kg	240	2472
Laminado en caliente	10,3 kg	30	309
Estampado	10 ⁴ m ²	0,00006	1
Total			2782

Tabla 7: bobinado B.T.

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Aluminio	7 kg	780	5460
Estrusión ⁽²⁾	7 kg	72	504
Total			5964

(2) Tomamos el Eco-indicador de extrusión ya que el proceso es similar.

Tabla 9: varios

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
madera, papel, cartón, goma	(4)	-	-
Total			-

(4) Son diversos materiales en cantidades despreciables que no modifican el estudio

Tabla 4: cuba y aletas

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Chapa acero	12,6 kg	94	1184
Laminado en frío	126 m ²	54	6804
Doblado	447 m	0,00008	0
Soldado	-	(1)	-
Pintado	126 m ²	130	16380
Total			24368

(1) Eco-indicador no disponible. No obstante, no son temas prioritarios, por lo que no suponen un problema

Tabla 6: bobinado A.T.

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Cobre	23 kg	1400	32200
Trefilado ⁽²⁾	23 kg	72	1656
Revenido	23 kg	0,69	16
Barnizado	2,1 kg	520	1092
Total			34964

Tabla 8: aislantes

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Porcelana ⁽³⁾	0,9 kg	58	52
Moldeado	0,9 kg	21	19
Vitrificado	0,1 kg	13	1
Total			72

(3) Tomamos el Eco-indicador del vidrio blanco

Tabla 10: refrigerante

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Aceite	22,1 kg	99	2188
Destilación	22,1 kg	21	464
Refinado	22,1 kg	16	354
Total			3006

Los valores estándar de Eco-indicator se clasifican en:

- Procesos de transporte: se expresan normalmente en toneladas por kilómetro.
- Procesos de generación de energía: se determinan unidades para electricidad y calor.

En las condiciones de uso de este tipo de transformadores el rendimiento “ η ” suele ser función del factor de potencia “ $\cos\phi$ ” de la forma indicada en la figura 2. A estos transformadores se les suele hacer trabajar a un factor de potencia $0,9 \leq \cos\phi \leq 1$, puesto que en ese margen no hay que pagar complementos por potencia reactiva, e incluso pueden existir bonificaciones.

Figura 2: rendimiento de transformadores

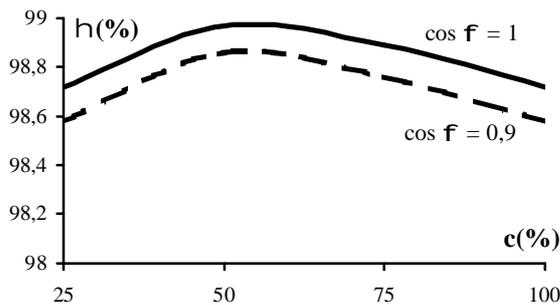
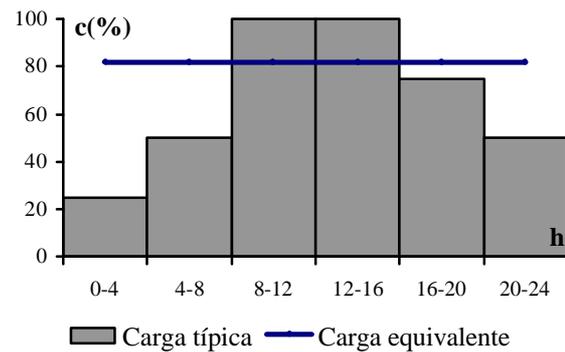


Figura 3: distribución de carga



El rendimiento también depende del índice de carga “c” con la que trabaja, es decir, el porcentaje de potencia respecto a la nominal. En la figura 2 se observa que se cumple la relación: $\eta_{\text{máx}} \cong 50 \% \cdot c$

Sin embargo, se proyectan de tal forma que el rendimiento “ η ” entre el 25 % y 100 % de la carga sea muy alto y que en este caso puede considerarse siempre superior al 98,5 %.

Una distribución típica de la carga “c” a lo largo del día puede ser la representada en la figura 3, que a efectos de pérdidas eléctricas es equivalente a una carga constante a lo largo de todo el día de valor c_e expresado en la igualdad: $c_e = 81,65 \%$. A dicha carga le corresponde un rendimiento medio, trabajando a factor de potencia $0,9 \leq \cos\phi \leq 1$, de: $\eta_m = 98,75 \pm 0,09 \%$

En definitiva, un transformador de potencia “S”, trabajando a factor de potencia $0,9 \leq \cos\phi \leq 1$, y con una distribución de carga diaria como la representada en la figura 3, es equivalente a efectos de pérdidas a otro de (1):

$$\begin{aligned} \text{Potencia: } S' &= 0,8165 S \\ \text{con } \eta' &= 98,75 \% \end{aligned} \quad (1)$$

trabajando siempre a potencia S' .

La tabla 11 recoge los valores de la etapa del ciclo de vida correspondiente al uso.

Tabla 11: transporte y mantenimiento

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Transporte	25 Tm·km	34	850
Filtrado aceite	(5)	-	-
Energía eléctrica (η)	2012 S kW·h	22	44259 S
Total			≅ 44259 S

(5) El filtrado de aceite para eliminar la humedad y los lodos supone una cantidad muy pequeña y se puede despreciar sin que modifique el estudio.

5.3 Desecho

La eliminación del transformador al cabo de la vida útil se realiza para cada tipo de material. Para el cálculo se toman los siguientes supuestos:

- Los metales se reciclan.
- El aceite se incinera para producir energía.
- El resto se destina al vertedero
- El barniz, la pintura y la resina van adheridas al material.

Los valores estándar de Eco-indicator se expresan por kilos y por materiales, subdivididos en los tipos de materiales y en los métodos para proceder a su deshecho.

Tabla 12: eliminación

Material o proceso	Cantidad	Indicador	Resultado
Reciclado de acero	46,8 kg	- 70	- 3276
Reciclado de aluminio	7 kg	- 720	- 5040
Reciclado de cobre	23 kg	- 1260	- 28980
Incineración de aceite	22,1 kg	-12	- 265
Vertedero porcelana	0,9 kg	1,4	1,3
Vertedero de varios	0,1 kg	4,3	0,4
Total			- 37559

Algunos métodos de eliminación de desechos arrojan cifras negativas. Esto sucede cuando en el proceso se crea un producto intermedio que se puede reciclar o reutilizar. Los flujos de energía y materiales obtenidos se consideran un beneficio ambiental, ya que habrá que producir menos materia prima en otro lugar, de tal manera que se reducirán los impactos ambientales de la producción. Esto se debe a una regla de sustitución. En numerosos casos, particularmente cuando se trata de reciclado, la deducción es mayor que el impacto ambiental de un proceso, lo que da origen a las cifras negativas.

5.4 Total

Tabla 13: suma de todas las fases anteriores

Fase	Resultado
Producción	81357
Uso	@ 44259 S
Deshecho	- 37559

6 CONCLUSIONES

Se han analizado todos los componentes que forman parte de la gama de transformadores en estudio de forma exhaustiva. Sin embargo, el mayor impacto ambiental lo provoca el uso. Este resultado es debido a que son máquinas robustas, con poco mantenimiento y de larga vida.

El rendimiento de los transformadores es muy alto, pero debido a que trabaja continuamente y con una carga de trabajo alta, da un resultado en pérdidas muy importante. Esto, añadido a la larga vida que suele tener, hace que sea el apartado de mayor impacto ambiental. El margen de mejora en este sentido es escaso. La mejora ambiental sería recuperar el calor cedido debido a las pérdidas y aprovecharlo en otros procesos (pe: precalentar el aire de combustión).

Una estrategia de mejora ambiental siempre válida es la utilización de materiales reciclables y reciclados, así como optimizar la energía de los procesos. La optimización del sistema de fin de vida que facilite el reciclado de materiales se puede obtener aplicando las conclusiones expuestas en la ponencia presentada a la V Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, celebrado en Lleida en 2000, titulada “La consideración del desmontaje en el proceso de diseño. Aplicación transformadores eléctricos”.

Además, los materiales que lo componen se prestan al reciclaje o a la incineración, lo que reduce el impacto ambiental. La naturaleza de los materiales, su agrupamiento y el montaje en la máquina facilitan el desmontaje. Con mayor motivo en el caso del cobre, ya que se trata de un material escaso y puede agotarse, además de ser muy tóxico por ser un metal pesado. Por otro lado, también se puede estudiar la posibilidad de uso de otros materiales alternativos que tengan un impacto ambiental menor, manteniendo idénticas prestaciones técnicas o incluso mejorándolas.

El aceite es altamente tóxico también, altera la fauna y la flora acuática, hipoteca la utilización del suelo y pone en riesgo la salud humana. Sin embargo en su combustión prácticamente no deja residuos. Claro está que si los metales no se reciclaran y el aceite no se incinerara el impacto ambiental que se produciría variaría sustancialmente.

No se debe olvidar la selección de técnicas de producción ambientalmente eficientes como la eliminación del pintado o la sustitución del barniz aislante por otro material. La división de un problema en varios problemas más simples es un método que utilizan los diseñadores. De esta forma se reducen las limitaciones que existen en la búsqueda de soluciones globales, lo que lleva a soluciones más libres y creativas. En definitiva, se trata de solucionar un problema sin crear otros.

7 REFERENCIAS

- [1] IHOBE. Sdad Pública Gestión Ambiental *Manual práctico de Ecodiseño*. Los autores. Bilbao 2.000
- [2] Product ecology consultants. Informe metodológico sobre Eco-indicator. www.pre.nl
- [3] Larry W. Canter. *Manual de evaluación de impacto ambiental*. McGraw-Hill. Madrid 1.998
- [4] Enciclopedia Ceac de Electricidad. *Transformadores. Convertidores*. Ceac, S.A. Madrid 1.982

CORRESPONDENCIA

Jaime López Soto ^(p) epplsoj@lg.ehu.es; Tel: 946.014.314; Fax: 944.441.625

E.U.I.T.I. Plaza La Casilla, 3. 48012 Bilbao

Pilar Ramírez López-Para impralop@lg.ehu.es

Faustino de la Bodega y Bilbao iepdebif@lg.ehu.es

José Ramón Sáenz Ruiz iepsaruj@bi.ehu.es

Melchor Gómez Pérez iepgopem@lg.ehu.es