

COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL NÚCLEO BUTT-JOINT VS. STEP-LAP PARA TRANSFORMADORES BT PARA APLICACIÓN EN SERVICIO CONTINUO EN DATA CENTERS

Resumen

Los transformadores de BT diseñados para alimentar data centers suelen operar en servicio continuo, a menudo en configuraciones redundantes y con una carga media parcial. En estas condiciones, las pérdidas en vacío se convierten en un factor de coste dominante porque dependen principalmente de la tensión y permanecen casi constantes en el tiempo, mientras que las pérdidas en carga son proporcionales al cuadrado de la corriente absorbida y, por tanto, al cuadrado del factor de carga.

Este artículo compara dos transformadores de baja tensión de 250 kVA: un diseño avanzado con núcleo circular escalonado de grano orientado y uniones step-lap intercaladas a 45°, y un diseño convencional con unión butt-joint a 90°. Para las dos unidades, los valores considerados son las pérdidas del núcleo (en vacío) y las pérdidas en carga. El análisis muestra que, en servicio continuo, la fuerte reducción de las pérdidas en vacío hace que la solución step-lap sea estructuralmente más ventajosa, especialmente con la carga parcial típica de los data centers, donde los transformadores suelen sobredimensionarse y no trabajan a plena carga. Además, la unidad step-lap funciona por debajo de los valores de referencia EcoDesign [1]. Aunque EcoDesign es principalmente un punto de referencia para transformadores de distribución de media tensión más que para esta aplicación específica de data centers de baja tensión, sigue siendo una referencia técnica útil para poner de relieve el muy bajo nivel de pérdidas alcanzado.

Desde el punto de vista económico, el mayor coste inicial del step-lap se analiza mediante una formulación paramétrica del retorno de la inversión, sin divulgar los precios comerciales, relacionando el mayor coste de capital con el mayor ahorro energético anual en función del factor de carga RMS y del precio de la energía. Por último, desde el punto de vista acústico y mecánico, la geometría step-lap también reduce las vibraciones y el ruido con respecto a la construcción convencional.

Tesis

Para los transformadores de BT destinados a la alimentación continua de los data centers, la tecnología step-lap intercalada a 45° es técnica y económicamente preferible a un diseño convencional butt-joint porque minimiza las pérdidas permanentes, mejora la eficiencia a carga parcial y reduce de forma considerable las vibraciones y el ruido; en consecuencia, el mayor precio de compra puede justificarse por un menor coste total de propiedad tanto en energía como en mantenimiento.

ORTEA SpA

Via dei Chiosi, 21 | 20873 Cavenago di Brianza MB | ITALY

Phone +39 02 95 917 800 | Email: ortea@ortea.com | Web: www.orteanext.com

1. Perfil operativo y estructura de pérdidas

1.1 Tipo de servicio: Continuo vs. Intermitente

El tipo de servicio del transformador es de fundamental importancia, tanto desde el punto de vista del dimensionamiento como desde el punto de vista estratégico respecto a las pérdidas y al coste de la energía perdida. Las diferencias sustanciales dependen de si el transformador está *energizado* o *desenergizado* y del porcentaje de carga. En las aplicaciones de servicio intermitente, el peso económico de las pérdidas en vacío es menos crítico porque el transformador no está permanentemente alimentado. Para la alimentación de data centers, en cambio, el transformador suele estar alimentado de forma continua, a menudo dentro de arquitecturas redundantes y con una potencia instalada intencionadamente superior a la carga efectiva. En un escenario de este tipo, el componente de pérdida asociado al núcleo está continuamente presente y debe tratarse como un coste operativo estructural y no como un detalle secundario de diseño. En la imagen siguiente se muestra el ciclo de servicio S6, en el que el transformador alterna una fase de funcionamiento en carga con una fase de funcionamiento en vacío; como puede observarse a partir de la función relativa a la potencia absorbida, no existen condiciones de reposo.^{*b*}

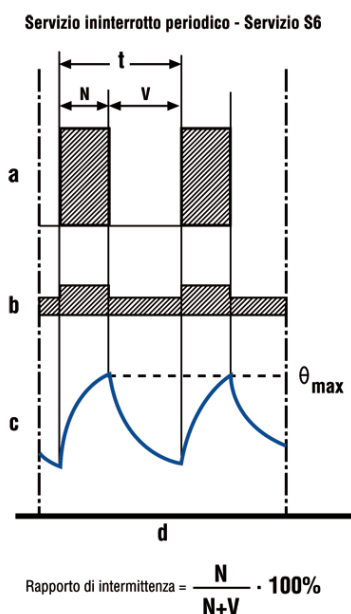


Figura 1 - Servizio intermitente S6

ORTEA SpA

Via dei Chiosi, 21 | 20873 Cavenago di Brianza MB | ITALY
Phone +39 02 95 917 800 | Email: ortea@ortea.com | Web: www.orteanext.com

1.2 Naturaleza de las pérdidas

Las pérdidas totales pueden expresarse como la suma de las pérdidas en vacío y las pérdidas en carga. A tensión constante y continua, las pérdidas en el núcleo permanecen constantes y persistentes, mientras que las pérdidas en el devanado varían con el cuadrado de la corriente. Por este motivo, a carga parcial y continua (caso típico de los data centers), el peso relativo de las pérdidas del núcleo se vuelve progresivamente más importante.

1.3 Factor de carga RMS

Para carga variable, el parámetro correcto no es el factor de carga medio aritmético, sino el factor de carga cuadrático medio (RMS). Esta magnitud depende del cuadrado de la carga, siendo esta última proporcional al cuadrado de la corriente absorbida. Por tanto, cualquier comparación rigurosa de los costes anuales entre dos tecnologías de transformadores debería basarse en el factor de carga RMS y no en la carga media.

A continuación se presentan las fórmulas para el cálculo del valor RMS y la fórmula para ponderar su valor en el tiempo:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (1)$$

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_i x_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum_i \Delta t_i}} \quad (2)$$

2. Caso analizado y ecuaciones comparativas

2.1 Datos medidos

Se comparan dos transformadores de 250 kVA

Tipología del núcleo	Pérdidas en vacío [W] [W]	Pérdidas en carga [W] [W]
N.G.O. Butt-joint 90° (Rectangular)	1150	3850
G.O. Step-Lap 45° (Circular)	394	3200
Referencia EcoDesign	468	3400

La diferencia clave a favor del step-lap es la gran reducción de las pérdidas en el núcleo, que es precisamente la mejora más valiosa en aplicaciones donde el servicio es continuo. En el gráfico siguiente se resalta en amarillo el área correspondiente a la energía ahorrada por las 2 soluciones, considerando el caso de plena carga:

ORTEA SpA

Via dei Chiosi, 21 | 20873 Cavenago di Brianza MB | ITALY
Phone +39 02 95 917 800 | Email: ortea@ortea.com | Web: www.orteanext.com

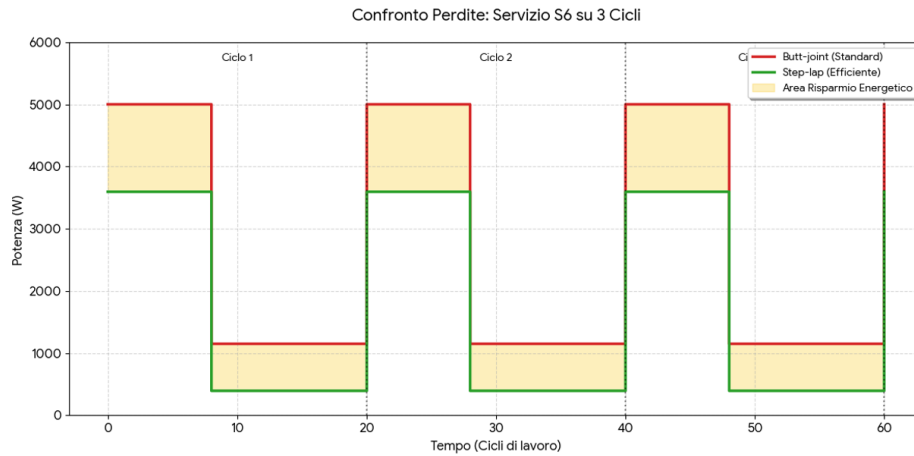


Figura 2 - Comparación entre las 2 versiones a plena carga

2.2 Ecuaciones comparativas

Las ecuaciones de pérdidas de los dos transformadores, en función del factor de carga x , se presentan a continuación. La ecuación de diferencia muestra claramente que la ventaja del diseño step-lap está compuesta por un componente fijo, debido a las pérdidas en vacío, y un componente variable, debido a menores pérdidas en carga en los devanados.

3. Ahorro energético anual en función de la carga RMS

3.1 Formulación general

El ahorro energético anual se obtiene multiplicando la pérdida diferencial entre las dos soluciones por las horas anuales de funcionamiento. Como se supone que el transformador permanece continuamente alimentado, la duración anual es de 8760 h.

3.2 Valores de referencia

Los ahorros resultantes se presentan para factores de carga RMS representativos. La ventaja a favor del step-lap sigue siendo significativa en todas las condiciones de carga, pero es particularmente relevante a carga parcial porque el transformador step-lap parte de una base de pérdidas en vacío mucho más baja.

4. Formulación de ROI comercialmente neutral

4.1 Formulación paramétrica

Un artículo técnico evita divulgar los precios de los transformadores porque se trata de valores comerciales que dependen del alcance del diseño, las condiciones de suministro, los accesorios, las pruebas, la logística, la estructura contractual y el coste de la materia prima en un momento dado. Por lo tanto, un enfoque más riguroso es expresar el payback en forma paramétrica.

ORTEA SpA

Via dei Chiosi, 21 | 20873 Cavenago di Brianza MB | ITALY
Phone +39 02 95 917 800 | Email: ortea@ortea.com | Web: www.orteanext.com

4.2 Ahorro económico anual

Si el precio medio anual de la electricidad se indica con C_e en €/kWh, el ahorro económico anual es obviamente igual al ahorro energético anual (kWh) multiplicado por C_e . Tomando como referencia el precio italiano de la energía de marzo de 2026 [2], el índice PUN GME es de 114,4 €/MWh, es decir, 0,1144 €/kWh.

4.3 Retorno simple y costes adicionales justificados

Si ΔC es el coste de capital adicional del transformador step-lap con respecto al transformador butt-joint, el tiempo de retorno es dividido por el ahorro económico anual. De forma equivalente, puede calcularse el capital extra máximo sostenible para un período objetivo de retorno $\Delta C.T$

5. Implicaciones acústicas y mecánicas

5.1 Por qué el step-lap reduce las vibraciones

La unión column-yugo es una parte crítica del circuito magnético. En una configuración butt-joint, el flujo sufre una discontinuidad más brusca, lo que aumenta la reluctancia local, el flujo de fuga, la excitación ligada a la magnetoestricción y las vibraciones mecánicas. En una unión step-lap intercalada a 45°, la transferencia de flujo entre columna y yugo es más gradual y más coherente con la dirección de magnetización preferente del acero de grano orientado. Esto reduce la tensión magnética local y la excitación mecánica que genera vibraciones.

5.2 Consecuencias sobre el ruido

Menores vibraciones se traducen directamente en una menor potencia sonora emitida y en niveles más bajos de presión sonora. Este aspecto es especialmente valioso en aplicaciones de data centers, donde la calidad acústica, el refinamiento de la instalación y la reducción de la transmisión mecánica parásita son objetivos de diseño relevantes. En términos prácticos, la construcción step-lap ofrece niveles de ruido muy bajos, mientras que las construcciones butt-joint tienden a resultar acústicamente más penalizadoras a medida que aumenta el tamaño del transformador.

6. Referencia EcoDesign como benchmark de prestaciones

6.1 Interpretación correcta del benchmark

Las pérdidas del transformador step-lap son inferiores a la referencia EcoDesign. Esto no significa que el marco normativo EcoDesign se aplique de forma exclusiva y plena a la categoría actual de transformadores de baja tensión para data centers. Sin embargo, EcoDesign sigue siendo un punto de referencia creíble para destacar el bajo nivel de pérdidas alcanzado.

ORTEA SpA

Via dei Chiosi, 21 | 20873 Cavenago di Brianza MB | ITALY

Phone +39 02 95 917 800 | Email: ortea@ortea.com | Web: www.orteanext.com

7. Conclusión

7.1 Evaluación final

La comparación entre un transformador step-lap y un transformador butt-joint muestra que, para el funcionamiento de data centers con alimentación continua y duradera, la cuestión decisiva no gira solo en torno a la inversión inicial, sino también al coste total de propiedad. En consecuencia, el ahorro energético anual sigue siendo sustancial con independencia de la potencia y ya es significativo en valor económico absoluto incluso con cargas RMS modestas. La formulación paramétrica del ROI muestra cómo este beneficio puede justificar una mayor inversión inicial.

Al mismo tiempo, una mejor gestión del flujo magnético en la unión interna de 45° reduce las vibraciones y, por tanto, el ruido, aportando una ventaja adicional de aplicación con menores necesidades de mantenimiento, especialmente relevante para los entornos de data centers.

En conjunto, la solución step-lap no debería verse simplemente como una opción de gama alta, sino como la elección técnicamente coherente para un servicio continuo de alta eficiencia.

ORTEA SpA

Via dei Chiosi, 21 | 20873 Cavenago di Brianza MB | ITALY

Phone +39 02 95 917 800 | Email: ortea@ortea.com | Web: www.orteanext.com

Fórmulas analíticas

En este párrafo se detallan las fórmulas utilizadas en el análisis. En lo que respecta a las pérdidas, como se ha mencionado, podemos considerar una parte constante P_{fe} y una parte dependiente del factor de carga P_{cu_n}

$$P_{tot}(x) = P_{fe} + P_{cu_n} \cdot x^2 \quad (3)$$

Por lo tanto, para las dos soluciones step-lap y butt-joint se ha considerado:

$$P_s(x) = 394 + 3200x^2 \quad (4)$$

$$P_b(x) = 1150 + 3850x^2 \quad (5)$$

La variación de las pérdidas entre las dos soluciones puede expresarse por tanto como:

$$\Delta P(x) = P_b(x) - P_s(x) = 756 + 650x^2 \quad (6)$$

A partir de esta variación, es posible evaluar el ahorro energético anual como:

$$E_{sav}(x) = \Delta P(x) \cdot \frac{8760}{1000} \quad (7)$$

$$E_{sav}(x) = (756 + 650x^2) \cdot 8,76 \quad (8)$$

$$E_{sav}(x) = 6623 + 5694x^2 \left[\frac{kWh}{anno} \right] \quad (9)$$

A través del coste de la energía es posible evaluar el ahorro en euro/año:

$$S(x) = E_{sav}(x) \cdot C_e \quad (10)$$

$$S(x) = (6623 + 5694x^2) \cdot 0,11441 \quad (11)$$

$$S(x) = 757 + 652x^2 \left[\frac{€}{anno} \right] \quad (12)$$

Los tiempos de retorno de la inversión se evaluaron con las siguientes fórmulas:

$$T_{PB}(x) = \frac{\Delta C}{S(x)} \quad (13)$$

$$\Delta C_{max}(x, T) = S(x) \cdot T \quad (14)$$

ORTEA SpA

Via dei Chiosi, 21 | 20873 Cavenago di Brianza MB | ITALY
Phone +39 02 95 917 800 | Email: ortea@ortea.com | Web: www.orteanext.com

Tabla 1. Pérdidas diferenciales y ahorros anuales respecto al factor de carga RMS

Factor de carga RMS	$\Delta P(x)$ [W]	Esav(x) [kWh/año]	Ahorro anual S(x) a 0,1144 €/kWh [€/año]
0.25	797	6978	798
0.50	918	8046	921
0.75	1122	9825	1124
1.00	1406	12317	1409

Tabla 2. Coste adicional máximo justificado ΔC_{max} para objetivos de retorno seleccionados

Factor de carga RMS x	S(x)[€/año]	Capex extra máx. con breakeven 3 años [€]	Capex extra máx. con breakeven 5 años [€]	Capex extra máx. con breakeven 10 años [€]
0.25	798	2394	3990	7981
0.50	921	2762	4603	9206
0.75	1124	3372	5619	11239
1.00	1409	4227	7045	14089

Esta tabla proporciona un criterio comercialmente útil, ya que establece, en función del tiempo de breakeven seleccionado, del factor de carga y del delta de ahorro energético frente al butt-joint, cuánto precio incremental del transformador step-lap frente al butt-joint es sostenible.

Notas

[\[1\] Normativa Ecodesign](#)

[\[2\] PUN GME](#)

Artículo redactado y editado por:

Fabio Hana, Ortea SpA Technical Manager, Magnetic Parts