

CASO DE ESTUDIO:

FLICKER INDUSTRIAL

Escrito por Alejandro Arce Picado, 2025-06-25.

SINOPSIS

El flicker industrial es un fenómeno de calidad de energía asociado a variaciones lentas en el voltaje, percibidas como parpadeo en la iluminación. En una planta, cargas de arranque frecuentes (motores, soldadura por arco, hornos, etc.) pueden inducir este fenómeno, con posibles molestias al personal y alteraciones en equipos sensibles. Este estudio presenta un caso real de flicker medido en una fábrica. A partir de las mediciones de Pst por fase se identifican periodos críticos, se evalúa el impacto operativo y se proponen soluciones técnicas como filtros activos y compensadores estáticos.

FLICKER INDUSTRIAL

El flicker es un fenómeno de variaciones lentas de tensión que afecta la calidad de suministro eléctrico. Se manifiesta como fluctuaciones periódicas en el voltaje de la red, perceptibles como parpadeos en las lámparas de iluminación[3]. Estas variaciones son típicamente causadas por cargas que generan cambios súbitos en la corriente, como los hornos de arco eléctrico (HAE) [3](5). El flicker provoca molestia al ojo humano principalmente, así como ser responsable de algún grado de irritabilidad [3]. Para cuantificar la severidad del flicker se utilizan los índices normalizados establecidos en los estándares internacionales. En particular, la norma IEC 61000-4-15:2010 define un flickermetro que mide la percepción del flicker y establece los métodos de cálculo de los índices de severidad (1). En ella, el índice de flicker a corto plazo (Pst) se evalúa en intervalos de 10 minutos, mientras que el índice a largo plazo (Plt) se calcula como la raíz cúbica del promedio de doce valores consecutivos de Pst (2 horas) [1]. Asimismo, la norma IEC 61000-3-7:2008 proporciona guías para determinar los límites de emisión admisibles de cargas fluctuantes en sistemas de media y alta tensión[2]. Esta norma ayuda a los operadores a mantener la calidad del servicio coordinando niveles de compatibilidad y niveles de planificación para el flicker [2]. Según la norma IEC 61000-3-7, el valor máximo admisible del índice de flicker a corto plazo (Pst) es 1.0 para la mayoría de los niveles de tensión en redes de distribución. Este umbral corresponde al nivel de severidad por debajo del cual el 50% de las personas no experimenta molestias visuales asociadas al parpadeo de la iluminación [2]. Superar este valor indica una condición de perturbación perceptible que puede afectar la comodidad y concentración de los ocupantes del entorno industrial, especialmente en zonas con iluminación crítica. Por tanto, mantener los valores de Pst por debajo de este límite es esencial para cumplir con las normas de compatibilidad y asegurar un entorno de trabajo confortable.

CASO REAL

Con el objetivo de evaluar el impacto del flicker en un entorno industrial de trabajo intensivo, se analizaron datos reales de calidad de energía obtenidos de una fábrica. La medición se centró en el índice de severidad a corto plazo (Pst), calculado conforme a la norma IEC 61000-4-15 [1], en intervalos de 10 minutos. Los valores fueron registrados para las tres fases del sistema (V1, V2 y V3) y procesados para representar gráficamente su comportamiento horario mediante mapas de calor (heatmaps). Estos gráficos permiten visualizar las variaciones de flicker a lo largo del tiempo

y detectar las horas más críticas del día. A partir de este análisis, se puede identificar momentos específicos donde los valores de Pst alcanzan o superan el umbral de compatibilidad establecido en la IEC 61000-3-7 [2], evidenciando la presencia de perturbaciones lumínicas perceptibles. Esta información es clave para relacionar el fenómeno con posibles eventos operativos y planificar estrategias de mitigación efectivas.

Los mapas de calor por fase se presentan en las figuras de abajo, en donde en cada celda se colocó el valor de PST más alto por hora.

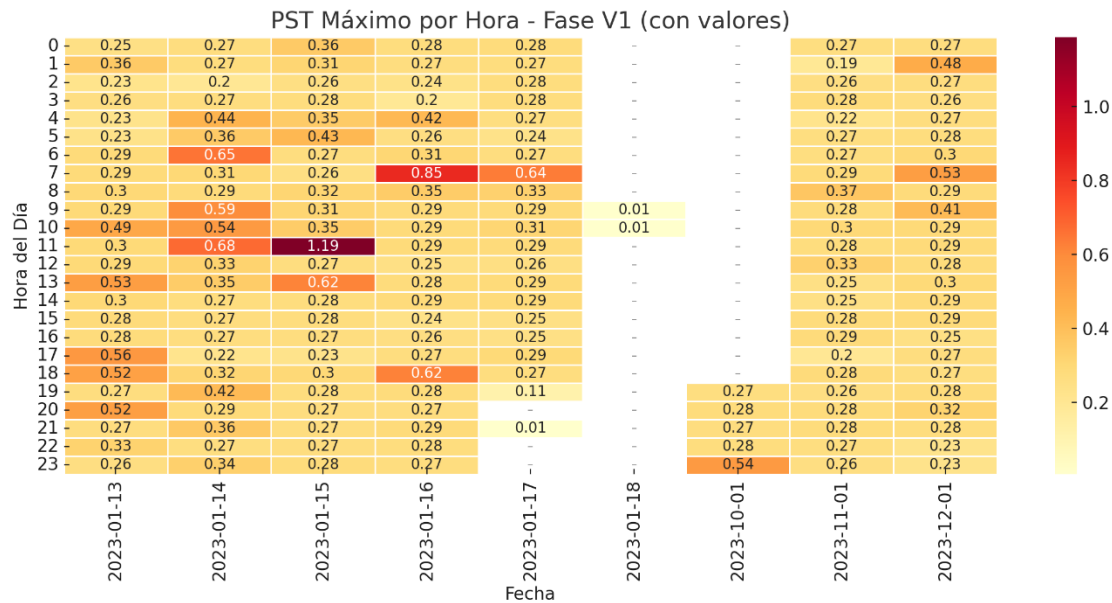


Figura 1. Mapa de calor V1

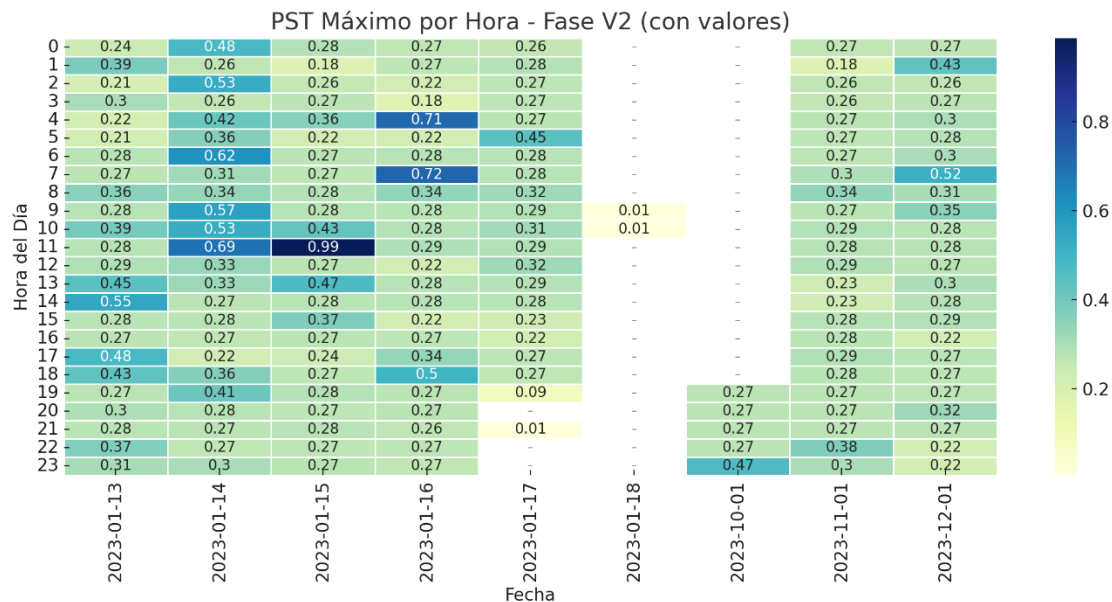


Figura 2. Mapa de calor V2

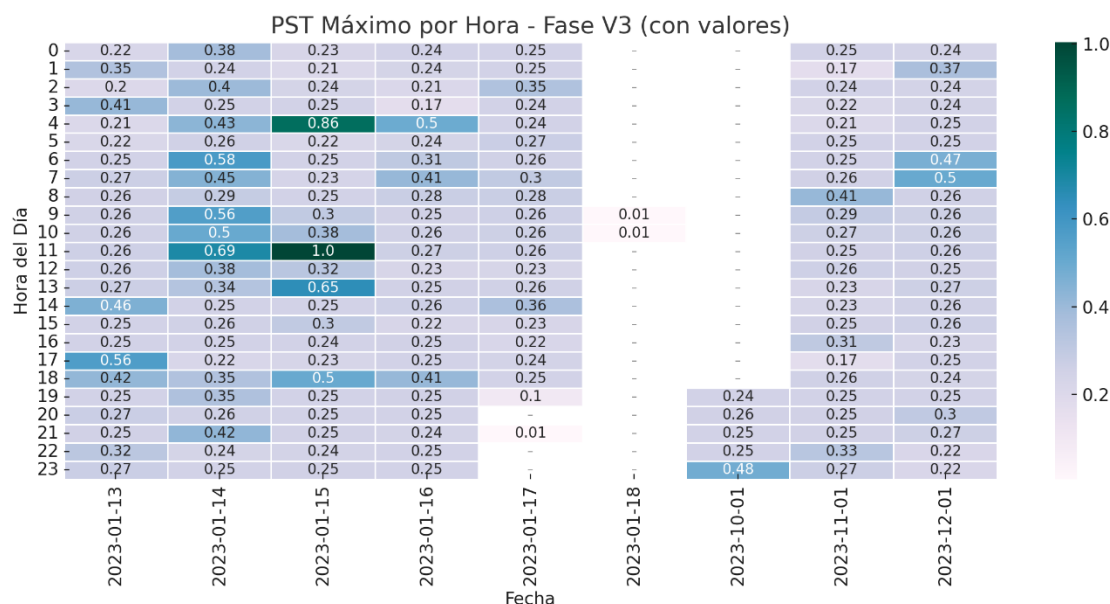


Figura 3. Mapa de calor V3

Al analizar los mapas de calor, se puede observar comportamientos por variación por hora y por variación por tipo de día como se explica a continuación:

Variación por hora

Los resultados evidencian una clara relación entre los picos de flicker y ciertos horarios del día:

- En la fase V1, el valor máximo registrado fue PST = 1.19, el 15 de enero a las 11:00, superando el límite normativo de 1.0 establecido por la IEC 61000-3-7 [2].
- En las fases V2 y V3, los valores máximos fueron 0.99 y 1.02 respectivamente, también durante el mismo horario crítico.
- De igual manera, los valores más elevados de PST se concentran entre las 9:00 y las 13:00, especialmente durante los días 13, 14, 15 y 16 de enero. Esta franja horaria coincide con periodos de alta actividad operativa, lo cual sugiere que el flicker está relacionado con el encendido o uso intensivo de cargas variables como motores o soldadoras.

Mitigación del flicker

En entornos industriales con cargas altamente variables, como los procesos de ensamble o fundición, el fenómeno de flicker se manifiesta como fluctuaciones rápidas de voltaje que provocan parpadeo perceptible en la iluminación. El análisis gráfico de los datos medidos mostró que los valores más altos de flicker coinciden con los horarios de mayor actividad operativa, lo que resalta la necesidad de estrategias de compensación reactiva efectivas. A continuación, se presentan las principales técnicas de mitigación recomendadas según diferentes escenarios de infraestructura eléctrica en planta.

Con compensación reactiva tradicional existente

Cuando la planta ya dispone de un compensador estático (bancos de capacitores con o sin TCR/SVC de tecnología clásica), suele observarse que las oscilaciones de voltaje de alta frecuencia (flicker) no se eliminan por completo [8]. En este caso, la solución más efectiva es incorporar un compensador de potencia síncrono (STATCOM). A diferencia del SVC con tiristores, un STATCOM opera con convertidores de fuente de voltaje (VSC) de respuesta casi instantánea, inyectando o absorbiendo potencia reactiva dinámicamente ante variaciones de carga [7]. Estudios demuestran que un STATCOM brinda “el mejor desempeño de entre todas las posibles soluciones” para mitigar flicker en hornos de arco eléctrico [7]. Además, los STATCOM permiten también controlar desequilibrios de fase y modular armónicos, lo que refuerza su utilidad en entornos industriales con cargas fluctuantes. Por tanto, añadir un STATCOM robusto o mejorar el SVC existente con tecnología VSC logra disminuir sostenidamente P_{st} en periodos de carga intensa. En complemento, filtros activos de potencia (shunt-APF) pueden afinar la compensación en rangos de frecuencia interarmónicos asociados al flicker, como proponen Bhonsle y Kelkar mediante filtros compuestos [9], aunque el núcleo de la solución sigue siendo la respuesta veloz del STATCOM [7].

Instalación desde cero sin medidas previas

Si la planta parte sin compensación alguna, es posible diseñar desde un inicio un sistema de apoyo reactivo óptimo. En este caso, lo ideal es instalar un sistema FACTS basado en convertidores VSC, como un STATCOM o un regulador de voltaje estático (SVG) de gran capacidad, que suministre potencia reactiva de forma dinámica. Dado que no hay infraestructura previa, puede planearse la combinación de un banco de capacitores con un controlador dinámico avanzado. Los estudios recomiendan considerar un STATCOM dimensionado para la máxima variación cíclica; esto asegura respuesta en milisegundos ante cada evento de flicker [7], [13].

Como complemento (especialmente si el costo es un factor), puede incluirse un inductor en serie en la alimentación de la carga perturbadora. La introducción de reactancia serie eleva la impedancia en la fuente del horno, reduciendo la magnitud de las fluctuaciones en el punto de acoplamiento [5]. De hecho, Ozgun y Abur muestran que la instalación de un inductor serie en el lado de alimentación “produce una reducción considerable de P_{st} en el punto de acoplamiento”, manteniendo la potencia activa constante [5]. En resumen, para un caso sin compensación previa se recomienda un plan de mitigación mixto: un sistema STATCOM avanzado junto con reactores de línea (o capacitores) bien calculados, de modo que se atiendan tanto la necesidad de respuesta rápida como el fortalecimiento de la fuente.

Red débil con corta distancia de cortocircuito o desequilibrios

En redes con baja potencia de cortocircuito o desbalance notorio, los efectos de flicker se acentúan porque la red no es rígida. Para estos casos es crucial fortalecer virtualmente la red local mediante compensadores dinámicos. En particular, un STATCOM de alto desempeño (como el sistema “SVC Light”) o un condensador síncrono son altamente efectivos. Estas soluciones proporcionan soporte reactivo, regulan el voltaje y aumentan la impedancia de cortocircuito del sistema [12], [13]. Así, mitigan los dips y oscilaciones provocadas por la carga industrial. El

documento de ABB destaca que un SVC Light “mitiga el parpadeo de la tensión provocado por grandes cargas industriales alimentadas por redes débiles” [12], y permite proyectar mayores potencias instaladas (por ejemplo, hornos de arco) sin restricciones de caída de tensión.

De manera similar, la referencia técnica concluye que dispositivos FACTS conectados en derivación (STATCOM) y condensadores síncronos “mejoran la calidad de la energía, reducen el parpadeo de tensión, los armónicos y otras perturbaciones”, y añaden inercia al sistema para soportar amortiguamiento [13]. Además, los estudios de Tlili et al. (2024) muestran que, ante una red débil, las tres estrategias comunes –reactancia serie, FACTS y aumento de potencia de cortocircuito– son las opciones más citadas [11]. En la práctica, debido al alto costo y complejidad de algunas opciones, la solución óptima suele ser instalar un STATCOM con control avanzado (o un condensador síncrono moderno) y añadir, si es posible, reactores serie o medidas para aumentar el cortocircuito (por ejemplo, generadores auxiliares) [11], [13]. Estas medidas combinadas permiten reducir permanentemente los picos de Pst observados en los heatmaps y mantener la operación dentro de límites aceptables.

CONCLUSIÓN

El análisis detallado del fenómeno de flicker en una planta industrial de una fábrica ha demostrado que las fluctuaciones de voltaje, medidas mediante el índice Pst, presentan valores críticos durante horarios de alta carga operativa, en especial entre semana y en el rango de 9:00 a 13:00 horas. Algunos valores registrados superaron el umbral normativo de 1.0, lo cual representa un problema de calidad de energía y confort visual conforme a la norma IEC 61000-3-7 [2].

Los mapas de calor permitieron identificar con precisión los periodos más problemáticos y establecer la necesidad de estrategias de mitigación específicas. Con base en el escenario eléctrico de la planta, se evaluaron soluciones adaptadas al contexto: desde la optimización de compensación existente, hasta propuestas integrales con STATCOM, filtros activos y refuerzo de red. En particular, se concluye que:

- Para plantas con compensación existente, el uso de STATCOM de respuesta rápida representa una mejora significativa frente a SVC tradicionales [7], [8].
- En instalaciones sin medidas previas, la combinación de STATCOM y reactancia serie resulta eficaz para amortiguar el impacto de cargas fluctuantes [5], [7].
- En redes débiles, reforzar la capacidad de cortocircuito mediante dispositivos como SVC Light, condensadores síncronos o generadores locales, ha demostrado ser una estrategia efectiva [11], [12], [13].

En todos los escenarios, se reitera la importancia de aplicar medidas proactivas de calidad de energía para evitar efectos visuales y garantizar el cumplimiento normativo. Esta nota técnica permite establecer un enfoque replicable para otras industrias con perfiles de carga similares, orientado a reducir de manera efectiva los valores de Pst en operación diaria.

Referencias

1. IEC 61000-4-15:2010, *Electromagnetic compatibility – Part 4-15: Flickermeter – Functional and design specifications*, IEC, 2010.
2. IEC 61000-3-7:2008, *Limits – Assessment of emission limits for fluctuating installations*, IEC, 2008.
3. Eskom, *Power Quality in Electrical Power Systems* (Vol. 8), 2010.
4. B. N. Ramos and J. L. de Parga, “EMTP study of flicker generation and transmission in AC EAFs,” in *Proc. ICHQP*, 2000.
5. O. Ozgun and A. Abur, “Flicker study using a novel arc furnace model,” *IEEE Trans. Power Del.* , vol. 17, no. 4, pp. 1158–1163, 2002.
6. H. Sharma *et al.* , “Efficient module for flicker assessment of EAFs,” in *Proc. IEEE PES GM* , 2008.
7. P. M. Sarma and S. V. J. Kumar, “Flicker mitigation in EAF using STATCOM,” *IJESIT* , vol. 2, no. 1, pp. 227–232, 2013.
8. H. Sharma, “SVC fails to mitigate flicker in EAF,” EPRI, 2011.
9. D. C. Bhonsle and R. B. Kelkar, “Composite filter for PQ in EAFs,” *IJPES* , vol. 79, pp. 53–65, 2016.
10. J. Kozyra *et al.* , “EAF electrode control with fuzzy logic,” *Energies* , vol. 16, no. 21, Art. 7281, 2023.
11. F. Tlili *et al.* , “Flicker in EAF of Tunisian steel plant,” *IEEE Access* , vol. 12, pp. 174850–174858, 2024.
12. ABB, SVC Light® for flicker mitigation in industrial power systems, ABB Library, 1998.
13. Idaho National Laboratory (INL), Application of Shunt-Connected FACTS for Power Quality Enhancement, INL Technical Brief, 2024.