

ESTUDIO TÉCNICO-NORMATIVO: ANÁLISIS INTEGRAL DEL FACTOR DE POTENCIA EN EL MARCO DEL CÓDIGO DE RED MEXICANO: IMPLICACIONES TÉCNICAS, REGULATORIAS Y FINANCIERAS

Resumen Ejecutivo

El **Sistema Eléctrico Nacional** (SEN) de México opera bajo un estricto marco regulatorio, el Código de Red, cuya versión vigente (**RES/550/2021**) establece los criterios técnicos de eficiencia, calidad, confiabilidad, seguridad y sustentabilidad. Su cumplimiento es obligatorio para todos los usuarios del SEN, incluyendo Centrales Eléctricas y Centros de Carga. Un pilar fundamental de esta regulación es la gestión del **Factor de Potencia** (FP) y la **Calidad de la Potencia** (CdP).

Este documento de investigación presenta un análisis exhaustivo de los requerimientos de Factor de Potencia. Se examinan los fundamentos metrológicos de la potencia eléctrica en entornos industriales, diferenciando entre el FP de desplazamiento y el FP verdadero, crucial en presencia de cargas no lineales. Se desglosa el esquema regulatorio que obliga a los Centros de Carga en Alta y Media Tensión a mantener un FP superior a 0.95 en atraso, y se analizan las implicaciones técnico-económicas del incumplimiento, incluyendo el régimen sancionatorio de la **Ley de la Industria Eléctrica** (LIE). Finalmente, se evalúan las tecnologías de compensación reactiva (pasiva y activa) como mecanismos de cumplimiento y optimización operativa, concluyendo que la gestión proactiva de la potencia es una función estratégica para la mitigación de riesgos y la competitividad en el mercado.

1.0 Introducción: El Paradigma del Código de Red y la Confiabilidad del SEN

1.1. Antecedentes: De la Optimización Tarifaria al Imperativo de Confiabilidad

Históricamente, la gestión del **Factor de Potencia** (FP) en México se limitaba a una optimización tarifaria frente a la **Comisión Federal de Electricidad** (CFE). Sin embargo, la Reforma Energética y la subsecuente emisión del Código de Red transformaron esta métrica en un parámetro de **Confiabilidad** de carácter obligatorio. La actualización del Código de Red en 2021 (resolución RES/550/2021) endureció los criterios de conexión y amplió el espectro de sujetos obligados, incorporando explícitamente a los Centros de Carga en Media Tensión con demanda ≥ 1 MW. Este cambio exige una gestión proactiva y en tiempo real de los parámetros eléctricos.

1.2. Objetivo y Alcance de la Investigación

El objetivo de este documento es proporcionar un análisis técnico y regulatorio integral del Factor de Potencia en México. El alcance abarca:

- La fundamentación física y metrológica de la potencia eléctrica.
- El desglose detallado del marco normativo aplicable.
- El análisis de las consecuencias operativas y financieras del incumplimiento.
- La evaluación de las estrategias de ingeniería para la corrección y el cumplimiento.

2.0 Fundamentos Físicos y Metrológicos de la Potencia Eléctrica

2.1. El Triángulo de Potencias en Sistemas Lineales

En sistemas de Corriente Alterna (CA), la relación entre los diferentes tipos de potencia se visualiza mediante el "Triángulo de Potencias".

- **Potencia Activa (P) [kW]**: Es la energía transformada en trabajo útil (mecánico, térmico, lumínico).
- **Potencia Reactiva (Q) [kVAR]**: Es la energía requerida para la magnetización de cargas inductivas (motores, transformadores). No produce trabajo, pero es indispensable para la operación.

Potencia Aparente (S) [kVA]: Es la capacidad total que la infraestructura debe suministrar. Es la suma vectorial de P y Q, regida por:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

El Factor de Potencia (FP) es la relación entre la potencia que realiza trabajo y la potencia total suministrada:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\varphi)$$

2.2. El Impacto de Cargas No Lineales: Distorsión Armónica y el Factor de Potencia Verdadero

La proliferación de electrónica de potencia (variadores de frecuencia, rectificadores) introduce **distorsión armónica**, generando corrientes con frecuencias que son múltiplos enteros de la fundamental (60 Hz). Esto obliga a diferenciar dos métricas:

1. **Factor de Potencia de Desplazamiento (FP_D)**: Mide el desfase sólo en la frecuencia fundamental.

$$FP_D = \cos(\varphi_1)$$

2. **Factor de Potencia Verdadero (FP_{true})**: Es la métrica real de eficiencia, que incorpora el efecto de la distorsión armónica total en corriente (THD_I).

$$FP_{true} = \frac{P}{S_{total}} = \frac{FP_D}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

Implicación Regulatoria: El Código de Red exige el cumplimiento del FP, pero también impone límites a la inyección de armónicos. Un FP_D corregido a 1.0 puede no ser suficiente si el THD_I es alto, resultando en un FP_{true} bajo y, por tanto, en incumplimiento.

3.0 Marco Regulatorio del Sistema Eléctrico Nacional (SEN)

3.1. Jerarquía Normativa y Actores Clave

El marco normativo sigue una jerarquía clara, desde la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) hasta los procedimientos operativos del CENACE. Los actores clave son:

- **CRE:** Emite, vigila y sanciona el cumplimiento del Código de Red.
- **CENACE:** Ejerce el Control Operativo del SEN y aprueba los estudios técnicos de conexión.
- **Transportistas y Distribuidores (CFE):** Operan y mantienen la red física.
- **Usuarios del SEN:** Centrales Eléctricas y Centros de Carga, quienes son los sujetos obligados.

3.2. Criterios de Aplicabilidad para Centros de Carga

El *Manual Regulatorio de Requerimientos Técnicos para la Conexión de Centros de Carga* define explícitamente a los usuarios sujetos a cumplimiento:

- Centros de Carga en **Alta Tensión (AT)**.
- Centros de Carga en **Media Tensión (MT)** con Demanda Contratada $\geq 1 \text{ MW}$.

4.0 Requerimientos Técnicos Específicos del Código de Red

4.1. Parámetros de Cumplimiento del FP

La regulación exige:

- **Rango Operativo:** $0.95 \text{ (inductivo)} \leq FP \leq 1.0$.
- **Ventana de Medición:** Valores promedio integrados en intervalos de **5 minutos**.
- **Criterio de Aceptación:** El FP debe mantenerse en el rango el **95% del tiempo** durante el periodo de facturación mensual.
- **Endurecimiento Futuro:** A partir del **8 de abril de 2026**, el requisito mínimo se incrementará a **0.97 en atraso**.

4.2. Otros Parámetros de Calidad de la Potencia (QP)

- **Distorsión Armónica (THD):** Límites a la inyección de corriente armónica, basados en la robustez de la red en el punto de conexión (relación I_{cc}/IL).
- **Fluctuaciones de Tensión (Flicker):** Límites para la severidad a corto plazo ($P_{st} < 1$) y largo plazo ($P_{lt} < 0.8$).
- **Desbalance de Corriente y Tensión:** El desbalance de corriente no debe exceder el 15%.

5.0 Consecuencias del Incumplimiento: Análisis de Riesgo

5.1. Impacto Operativo y en Activos

- **Pérdidas I^2R :** Las pérdidas por calor en conductores aumentan con el cuadrado de la corriente. Un FP bajo (ej. 0.70) puede duplicar las pérdidas en comparación con un FP de 0.99.
- **Reducción de Vida Útil:** El sobrecalentamiento acelera la degradación del aislamiento en motores y transformadores, reduciendo su vida útil.
- **Disparos de Protecciones:** La sobrecorriente puede causar disparos intempestivos, llevando a paros de producción no planificados.

5.2. Impacto Financiero y Régimen Sancionatorio

- **Análisis Tarifario:** El esquema de CFE aplica penalizaciones por $FP < 0.90$ y bonificaciones por $FP > 0.90$.
- **Riesgo Regulatorio (Art. 165 LIE):** El incumplimiento del Código de Red puede resultar en sanciones de **150,000 a 200,000 salarios mínimos** o, en casos graves que afecten la estabilidad del SEN, multas de **2% al 10% de los ingresos brutos anuales** del infractor.

6.0 Estrategias de Cumplimiento y Soluciones de Ingeniería

6.1. Fase de Diagnóstico: Metodología de Monitoreo

El cumplimiento exige un diagnóstico realizado con analizadores de redes clase A, capaces de registrar parámetros en intervalos de 5 y 10 minutos conforme a la normativa. Este estudio debe identificar las causas raíz de las desviaciones.

6.2. Tecnologías de Compensación

Característica	Corrección Pasiva (PPFC)	Corrección Activa (APFC)
Tecnología	Bancos de capacitores y reactores.	Electrónica de potencia (STATCOMs, Filtros Activos).
Aplicación	Cargas estables con bajo contenido armónico.	Cargas dinámicas, no lineales y con altos armónicos.
Ventajas	Bajo costo, alta fiabilidad.	Respuesta rápida, compensación precisa, filtrado de armónicos.
Desventajas	Riesgo de resonancia armónica, compensación escalonada.	Mayor costo de inversión y complejidad.

6.3. Proceso de Regularización y Conexión

- **Plan de Trabajo (Instalaciones Existentes):** Documento formal ante la CRE que debe incluir diagnóstico, análisis de alternativas, acciones correctivas y un cronograma de implementación.
- **Estudios ante CENACE (Nuevos Proyectos):** Secuencia de estudios (Indicativo, de Impacto, de Instalaciones) para garantizar que la nueva carga no comprometa la confiabilidad del SEN. Para "Cargas Especiales" (mineras, siderúrgicas), se exige un análisis adicional de Calidad del Servicio.

7.0 Conclusión

La gestión del Factor de Potencia y la Calidad de la Potencia ha evolucionado de una tarea técnica a un pilar de la estrategia financiera y de riesgo. El Código de Red ha establecido reglas claras que nivelan el campo de juego y protegen la estabilidad del sistema. El cumplimiento proactivo no es una medida defensiva, sino una inversión estratégica que asegura la continuidad operativa, mejora la eficiencia y fortalece la viabilidad a largo plazo del negocio en el competitivo y altamente regulado entorno del SEN.