

ANÁLISIS DE EMISIONES DE CARBONO ASOCIADAS AL CONSUMO ELÉCTRICO EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD JUÁREZ

ANALYSIS OF CARBON EMISSIONS ASSOCIATED WITH ELECTRICITY CONSUMPTION AT INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD JUÁREZ

López Fierro Gerardo

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

<https://orcid.org/0000-0002-3847-0554>

Gerardo.lf@cdjuarez.tecnm.mx

González Muñoz Miriam Magdalena

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

<https://orcid.org/0009-0006-1163-5847>

miriam.gm@cdjuarez.tecnm.mx

Castañeda Fierro Francisco

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

<https://orcid.org/0009-0005-1858-5996>

francisco.cf@cdjuarez.tecnm.mx

Ruiz Figueroa Ricardo Arnulfo

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

<https://orcid.org/0000-0001-8331-7238>

ricardo.rf@cdjuarez.tecnm.mx

Camarillo Delgadillo José Mario

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

<https://orcid.org/0000-0003-1446-8950>

jose.cd@cdjuarez.tecnm.mx

Resumen-- Este artículo presenta un análisis de las emisiones indirectas de dióxido de carbono (CO_2) generadas por el consumo eléctrico del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez. Se recopiló datos de consumo energético de tres acometidas eléctricas en el campus, correspondientes a los años del 2018 al 2022. Mediante el cálculo de la potencia reactiva y la corrección del factor de potencia, se estimaron las emisiones de carbono utilizando el factor oficial de emisión del Sistema Eléctrico Nacional ($0.423 \text{ tCO}_2\text{e/MWh}$). Los resultados revelan que una adecuada corrección del factor de potencia permite una disminución significativa en las emisiones indirectas de CO_2 (gases de efecto invernadero), contribuyendo al cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París y al desarrollo sustentable institucional.

Palabras clave-- Emisiones de carbono, energía reactiva, factor de potencia, eficiencia energética, gases de efecto invernadero.

Abstract-- This article presents an analysis of indirect carbon dioxide (CO_2) emissions generated by electricity consumption at the Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez. Energy consumption data were collected of three service electrical connections on campus, corresponding to the years 2018 to 2022. By calculating reactive power and correcting the power factor, carbon emissions were estimated using the official emission factor of the National Electric System ($0.423 \text{ tCO}_2\text{e/MWh}$). The results reveal that an adequate power factor correction allows for a significant reduction in indirect CO_2 emissions (greenhouse gases), contributing to the fulfillment of the objectives of the Paris Agreement and to institutional sustainable development.

Keywords: Carbon emissions, reactive power, power factor, energy efficiency, greenhouse gases.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha consolidado como una de las principales problemáticas globales del siglo XXI, debido a sus efectos ambientales, sociales y económicos. Una de sus causas más relevantes es el incremento sostenido en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente el dióxido de carbono (CO_2), cuya permanencia en la atmósfera lo convierte en el principal impulsor del calentamiento global (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021; United Nations, s.f.). La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles —como el gas natural, el carbón o el combustóleo— sigue siendo una de las actividades humanas con mayor aporte a estas emisiones (US

EPA, 2023). En el caso de México, el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT, 2021) reporta que en 2021, el 72.4 % de la electricidad producida provino de fuentes no renovables, principalmente ciclos combinados y termoeléctricas convencionales.

En este contexto, el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez (ITCJ), como parte del Tecnológico Nacional de México, ha incrementado su infraestructura en años recientes, lo que ha elevado su demanda energética. Esto genera emisiones indirectas de carbono asociadas al uso de energía proveniente del Sistema Eléctrico Nacional, cuyo factor de emisión oficial es de 0.423 toneladas de CO₂ equivalente por megavatio-hora consumido (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2022).

El presente estudio tiene como objetivo principal cuantificar las emisiones derivadas del consumo eléctrico institucional y analizar el potencial de mitigación mediante la mejora del factor de potencia, en concordancia con los compromisos adquiridos por México en el Acuerdo de París (ONU-Habitat / Naciones Unidas, s.f.).

Objetivo general

Evaluar las emisiones indirectas de dióxido de carbono (CO₂) generadas por el consumo eléctrico del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez (ITCJ), mediante el análisis de datos históricos de consumo energético, el cálculo de la energía reactiva y la aplicación de técnicas de corrección del factor de potencia, con el propósito de identificar oportunidades de mitigación alineadas con los compromisos ambientales internacionales.

Objetivos específicos

- Analizar los registros históricos de consumo eléctrico obtenidos a partir de recibos oficiales de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), correspondientes a las tres acometidas que suministran la energía al ITCJ.
- Calcular la energía activa, reactiva y aparente consumida por el campus, con base en los datos mensuales registrados.
- Determinar el comportamiento del factor de potencia por servicio y su influencia en la eficiencia energética del sistema.
- Estimar las emisiones indirectas de CO₂ utilizando el factor de emisión oficial del Sistema Eléctrico Nacional (0.423 tCO₂e/MWh).

- Evaluar el impacto ambiental de la corrección del factor de potencia y cuantificar la reducción potencial de emisiones de carbono como resultado de dicha mejora.

Justificación

La urgencia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha impulsado acuerdos globales como el Acuerdo de París, firmado en 2015 y en vigor desde 2016, cuyo objetivo es mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de los 2 °C (ONU-Habitat / Naciones Unidas, s.f.). En este marco, las instituciones públicas, incluyendo las de educación superior, están llamadas a implementar acciones que promuevan la eficiencia energética y la sostenibilidad.

En México, la producción de electricidad sigue dependiendo en gran parte de fuentes fósiles. Según el CONAHCYT (2021), más del 70 % de la energía generada proviene de combustibles convencionales, lo que se traduce en una alta intensidad de carbono. Esta situación se refleja en un factor de emisión de 0.423 tCO₂e/MWh, de acuerdo con los datos oficiales del sistema eléctrico nacional (SEMARNAT, 2022).

El Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, como actor activo en el ámbito académico y tecnológico, tiene la oportunidad de contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático. El análisis de su consumo eléctrico y la identificación de pérdidas por energía reactiva permiten evaluar estrategias técnicas como la corrección del factor de potencia, que no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también reduce las emisiones de CO₂ (Twenergy, 2020; Energy, 2021).

Este estudio responde a la necesidad institucional de alinear sus operaciones con los principios del desarrollo sustentable, generando evidencia útil para la toma de decisiones administrativas y técnicas que favorezcan el cumplimiento de metas climáticas nacionales e internacionales (ONU, 2015).

DESARROLLO

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y analítico, con base en datos históricos de consumo energético registrados en las tres acometidas del suministro eléctrico del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez (ITCJ). La metodología se dividió en cinco etapas principales: recolección de datos, análisis de parámetros eléctricos, cálculo de energía reactiva, estimación de emisiones de carbono y simulación de escenarios de corrección del factor de potencia.

1 Recolección de datos

Se recopilaron registros de consumo eléctrico mensual correspondientes a los años 2018 a 2022, obtenidos de los recibos oficiales emitidos por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Se

seleccionaron tres acometidas del campus identificadas como: 800's, principal y posgrado, con el fin de representar una muestra completa del consumo energético del plantel. Para garantizar la validez de los datos, se consideraron únicamente los años con operación continua del campus, excluyendo a partir del año 2020 debido a la suspensión de actividades presenciales por la pandemia de COVID-19.

2 Análisis de parámetros eléctricos

Se analizaron variables como energía activa (kWh), energía reactiva (kVARh), demanda máxima (kW) y factor de potencia (%), considerando la importancia de estos parámetros en la eficiencia del sistema eléctrico. El factor de potencia se utilizó como indicador clave para evaluar el desempeño energético y cuantificar las pérdidas atribuibles a la potencia no útil, en línea con la definición técnica planteada por Twenergy (2020).

3 Cálculo de energía reactiva y eficiencia

A partir del triángulo de potencia y utilizando relaciones trigonométricas, se calcularon los ángulos de desfase entre la potencia activa y reactiva, lo que permitió estimar la cantidad de energía desperdiciada. Se emplearon las siguientes expresiones fundamentales:

La ecuación 1 permite adquirir el valor del factor de potencia.

$$FP = \cos \theta \quad (1)$$

La ecuación 2 es utilizada para obtener la potencia reactiva.

$$Potencia\ reactiva = Potencia\ activa * \tan \theta \quad (2)$$

Estos cálculos permitieron proyectar los beneficios técnicos que implicaría corregir el factor de potencia a un valor estándar de 0.95, conforme a las recomendaciones para eficiencia energética en instalaciones industriales y educativas (Energy, 2021).

4 Estimación de emisiones de CO₂

Para la conversión del consumo energético en emisiones de dióxido de carbono, se aplicó el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional, establecido por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022) en 0.423 tCO₂e/MWh. Esta metodología está alineada con estándares internacionales de cuantificación de emisiones indirectas (Alcaldía de Madrid, 2020; Repsol, 2023).

Con la ecuación 3 se puede obtener las emisiones de CO₂.

$$Emisiones\ de\ CO_2 = Energía\ consumida\ (MWh) * 0.423\ tCO_2e/MWh \quad (3)$$

5 Simulación de mejora en el factor de potencia

Finalmente, se estimó el impacto de mejorar el factor de potencia a 0.95 en cada acometida. Se recalculó la energía reactiva y se compararon las emisiones proyectadas antes y después de dicha corrección. Este análisis permitió determinar el potencial de mitigación de GEI y proponer medidas técnicas aplicables en el contexto institucional.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se muestra el análisis de los resultados conforme a la metodología.

Comportamiento del consumo energético institucional.

El análisis de los registros de consumo eléctrico del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez (ITCJ) evidencia una demanda constante y significativa de energía en sus tres acometidas principales: 800's, principal y posgrado. Esta tendencia se acentúa durante los periodos de actividad académica regular, lo cual refleja la intensidad operativa de los edificios que alojan aulas, laboratorios, oficinas administrativas y espacios de posgrado. Por ejemplo, durante los años 2018 y 2019, el consumo anual superó los 1,600 MWh en una sola acometida, lo cual evidencia la alta exigencia energética del ITCJ.

A diferencia de estimaciones promedio para instituciones educativas en general, estos datos reflejan la particularidad del ITCJ como un campus en crecimiento, con actividades académicas y tecnológicas que exigen un suministro eléctrico confiable y continuo. Esta realidad pone en evidencia la necesidad de gestionar de manera eficiente la energía eléctrica para garantizar tanto la operación como el cumplimiento de objetivos ambientales (Greenpeace México, s.f.; ONU, 2015).

Diagnóstico del factor de potencia.

El análisis del factor de potencia (FP) en las acometidas del ITCJ reveló valores mensuales que en muchos casos se encuentran por debajo del estándar óptimo (0.95). Específicamente, la acometida "800's" reportó en 2018 un promedio anual de 0.9148, con una energía reactiva acumulada de 80,040 kVArh. Este desempeño sugiere que una parte considerable de la energía suministrada no fue utilizada eficientemente, lo cual genera pérdidas técnicas y sobrecarga innecesaria en los equipos eléctricos (Twenergy, 2020).

La simulación de una corrección del FP a 0.95 permitió reducir la energía reactiva en un 27.3 %, lo que representó una disminución estimada de 21,840.2 kVArh. Esta mejora reduce el esfuerzo operativo sobre los transformadores y líneas internas del campus, así como una reducción directa de las emisiones indirectas de CO₂ (Energy, 2021).

Estimación de emisiones de carbono.

En 2018, se realizó un análisis de las emisiones arrojando los siguientes datos:

Acometida 800's:

Sin corrección: 33.86 tCO₂e

Con corrección: 24.61 tCO₂e

Reducción estimada: 9.25 tCO₂e (27.3 %)

Acometida principal:

Sin corrección: 309.67 tCO₂e

Con corrección: 231.34 tCO₂e

Reducción estimada: 78.33 tCO₂e (25.3 %)

Acometida posgrado:

Sin corrección: 101.61 tCO₂e

Con corrección: 70.16 tCO₂e

Reducción estimada: 31.45 tCO₂e (30.9 %)

Aplicando el factor oficial de emisión del Sistema Eléctrico Nacional (0.423 tCO₂e/MWh), se estimó la cantidad de emisiones asociadas al consumo eléctrico institucional. Los resultados muestran que, en 2018, la acometida principal generó aproximadamente 309.67 toneladas de CO₂ equivalente, mientras que la acometida posgrado alcanzó 101.61 tCO₂e. Tras aplicar la corrección del FP, estas cifras disminuyeron a 231.34 y 70.16 tCO₂e, respectivamente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022).

Tabla 1. *Tabla de consumo energético y emisiones estimadas.*

Acometida	Año	Energía activa (MWh)	Factor de Potencia (FP)	Energía reactiva (kVArh)	Emisiones CO ₂ sin corrección (tCO ₂ e)	Emisiones CO ₂ con corrección (tCO ₂ e)	Reducción (%)
800's	2018	80.1	0.91	80,040	33.86	24.61	27.3
Principal	2018	732.0	0.92	316,000	309.67	231.34	25.3
Posgrado	2018	240.2	0.93	97,500	101.61	70.16	30.9

Nota. Datos basados en los cálculos de emisiones utilizando el factor oficial del Sistema Eléctrico Nacional (SEMARNAT, 2022).

La Tabla

ITCJ. Se

observa una reducción promedio del 27 % en las emisiones indirectas de CO₂ tras la corrección del factor de potencia a un valor estándar de 0.95, lo que demuestra el impacto positivo de esta medida tanto en la eficiencia energética como en la mitigación de gases de efecto invernadero.

Estos hallazgos evidencian que el ITCJ tiene un margen técnico considerable para mitigar su huella de carbono, sin recurrir a inversiones complejas o interrupciones operativas. La simple optimización del FP

mediante bancos de capacitores puede generar beneficios medibles en el corto plazo, tanto ambientales como económicos (Repsol, 2023).

Implicaciones técnicas y ambientales.

Desde el punto de vista institucional, los resultados respaldan la necesidad de implementar un programa de eficiencia energética enfocado en la corrección del factor de potencia. La adopción de esta medida contribuiría a mejorar el desempeño eléctrico del campus, reducir la carga en las instalaciones y avanzar hacia un modelo energético más sustentable (Energy, 2021; Twenergy, 2020).

Además, esta estrategia puede integrarse fácilmente en las actividades de formación académica y de servicio social, involucrando a estudiantes de ingeniería eléctrica y ambiental en el diseño, instalación y seguimiento de sistemas de corrección de FP, fortaleciendo así la vinculación entre la docencia, la investigación aplicada y la responsabilidad social universitaria.

Actualmente, se encuentra en desarrollo un levantamiento detallado de la instalación eléctrica del campus 2 del ITCJ, así como la revisión de su balanceo de cargas. Este esfuerzo, complementario al presente estudio, permitirá detectar desequilibrios que incrementan el consumo energético mensual y, en consecuencia, las emisiones indirectas de CO₂. Este enfoque integral favorece la toma de decisiones informadas por parte de la administración institucional (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022).

CONCLUSIONES

El análisis del consumo energético del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez permitió identificar que una proporción significativa de la energía utilizada presenta un bajo factor de potencia, lo que implica pérdidas técnicas y un uso ineficiente del sistema eléctrico (Twenergy, 2020).

La estimación de emisiones indirectas de dióxido de carbono (CO₂) a partir del consumo eléctrico institucional, utilizando el factor oficial del Sistema Eléctrico Nacional (0.423 tCO₂e/MWh), permitió cuantificar el impacto ambiental derivado de la operación cotidiana de la infraestructura educativa (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022).

Los resultados obtenidos demuestran que la corrección del factor de potencia a valores óptimos (≥ 0.95) representa una estrategia técnica viable para reducir entre un 25 % y un 31 % de las emisiones indirectas de CO₂, sin necesidad de modificar la infraestructura existente ni alterar la capacidad instalada (Energy, 2021).

La implementación de medidas correctivas, como la instalación de bancos de capacitores o sistemas automáticos de corrección del factor de potencia, y un adecuado balanceo de cargas en los tableros, no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que mejora la eficiencia operativa, disminuye las penalizaciones tarifarias por bajo FP y prolonga la vida útil de los equipos eléctricos (Twenergy, 2020; Energy, 2021).

Desde una perspectiva institucional, este estudio proporciona evidencia cuantitativa que respalda la integración de criterios de sostenibilidad energética en la planeación y gestión de recursos, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos climáticos internacionales, como los establecidos en el Acuerdo de París (ONU-Habitat / Naciones Unidas, s.f.).

TRABAJO A FUTURO

A partir de los hallazgos de este estudio, se identifican diversas oportunidades para futuras investigaciones y aplicaciones institucionales en el ámbito de la eficiencia energética y la sostenibilidad:

Implementación de un sistema de monitoreo energético en tiempo real, basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), que permita obtener datos continuos sobre consumo eléctrico, factor de potencia y emisiones asociadas. Este tipo de sistemas facilita la toma de decisiones y permite actuar preventivamente ante condiciones de ineficiencia (Twenergy, 2020).

Análisis técnico-económico de la instalación de bancos de capacitores automáticos, sistemas automáticos de corrección del factor de potencia, y un adecuado balanceo de cargas en los tableros, con el objetivo de cuantificar el ahorro energético, la reducción de emisiones y el retorno de inversión. Estudios previos han demostrado que este tipo de correcciones puede amortizarse en plazos cortos cuando se aplica en instalaciones con alto consumo y bajo factor de potencia (Energy, 2021).

Extensión del análisis de emisiones hacia otros alcances de la huella de carbono institucional, incluyendo emisiones directas (Alcance 1) como las relacionadas con el parque vehicular o el uso de combustibles, así como emisiones indirectas (Alcance 3) derivadas de proveedores, transporte de personal y servicios de terceros, conforme a las directrices del Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol, 2023) y respaldado por datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019).

Diseño de un plan institucional de eficiencia energética y sostenibilidad, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS

13 (acción por el clima), promoviendo el uso de energías limpias, la optimización del consumo y la sensibilización de la comunidad académica (ONU, 2015).

Comparación interinstitucional del desempeño energético y de emisiones entre distintas sedes del Tecnológico Nacional de México, con el fin de generar un diagnóstico sectorial, identificar mejores prácticas y establecer indicadores comunes de sostenibilidad energética (CONAHCYT, 2021).

REFERENCIAS

- CONAHCYT. (2021). *Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad*.
<https://energia.conacyt.mx/>
- Energy, R. (2021). *Beneficios de corregir el factor de potencia*. RIC Energy.
<https://www.ric.mx/cultura/eficiencia-energetica/beneficios-de-corregir-el-factor-de-potencia/>
- GHG Protocol. (2023). *Corporate Standard*. <https://ghgprotocol.org/>
- Greenpeace México. (s.f.). *Huella de carbono: Aprende a calcular tu impacto ambiental*.
<https://www.greenpeace.org/mexico/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Sixth Assessment Report*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/>
- International Energy Agency. (2022). *CO₂ Emissions in 2022*. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- ONU. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.
<https://sdgs.un.org/es/goals>
- ONU-Habitat / Naciones Unidas. (s.f.). *El acuerdo de París*. Naciones Unidas.
<https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Repsol. (2023, octubre 6). *¿Qué es la huella de carbono y por qué es importante?*.
<https://www.repsol.com/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990–2019*. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/inventario-nacional-de-emisiones-de-gei>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, febrero 28). *Factor de emisión del sistema eléctrico nacional*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/706809/aviso_fesen_2021.pdf
- Twenergy. (2020, junio 29). *Energía reactiva: qué es y cuáles son sus efectos*. <https://twenergy.com/>

United Nations. (s.f.). *Climate change and the greenhouse effect*. <https://www.un.org/en/climatechange>

US EPA. (2023). *Emisiones de dióxido de carbono*. <https://espanol.epa.gov/>

TABLA TRABAJO COLABORATIVO

Rol	Autor (es)
Conceptualización	Miriam Magdalena González Muñoz, Francisco Castañeda Fierro, Gerardo López Fierro
Metodología	Miriam Magdalena González Muñoz, Gerardo López Fierro
Software	Miriam Magdalena González Muñoz, Gerardo López Fierro
Validación	Ricardo Arnulfo Ruiz Figueroa, Gerardo López Fierro
Análisis Formal	Miriam Magdalena González Muñoz, Francisco Castañeda Fierro, José Mario Camarillo Delgadillo
Investigación	Miriam Magdalena González Muñoz, Francisco Castañeda Fierro, Gerardo López Fierro
Recursos	Gerardo López Fierro
Curación de datos	Miriam Magdalena González Muñoz, Francisco Castañeda Fierro, Ricardo Arnulfo Ruiz Figueroa, Gerardo López Fierro
Escritura - Preparación del borrador original	Miriam Magdalena González Muñoz, Francisco Castañeda Fierro, Gerardo López Fierro
Escritura - Revisión y edición	Miriam Magdalena González Muñoz, Francisco Castañeda Fierro
Visualización	Gerardo López Fierro
Supervisión	Miriam Magdalena González Muñoz, Francisco Castañeda Fierro
Administración de Proyectos	Miriam Magdalena González Muñoz, Francisco Castañeda Fierro, José Mario Camarillo Delgadillo, Gerardo López Fierro
Adquisición de fondos	Gerardo López Fierro