



USO DE SMART GRIDS PARA OPTIMIZAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y LA SOSTENIBILIDAD EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Especialista en Gerencia de Tecnología

Diana Carolina Moreno Vargas, Miguel Ángel Rojas Ortiz, Diego Armando Aconcha

Figueredo y José Luis Daza Pérez

(15 de noviembre del 2024)

Resumen

La investigación examina cómo las Smart Grids pueden reducir las emisiones de CO₂ y mejorar la eficiencia energética en la industria del cemento en Colombia, un sector de alto impacto ambiental. Se destaca la importancia de estas redes en la transición energética hacia el uso de fuentes renovables y la disminución de la dependencia de combustibles fósiles, especialmente dado el aumento reciente de las emisiones de CO₂ en el país. A nivel global, aunque se están incrementando las inversiones en energías limpias, se necesitan esfuerzos adicionales para alcanzar los objetivos de cero emisiones para 2050.

El estudio abordará cómo la implementación de Smart Grids optimiza el uso de energía en la producción cementera, facilitando la integración de energías renovables y mejorando la sostenibilidad. Se utilizará un enfoque cuantitativo, analizando la adopción de estas tecnologías y su impacto en el consumo energético y las emisiones de CO₂, mediante encuestas, entrevistas y análisis de datos históricos.

****Palabras clave**:** Smart Grids, eficiencia energética, emisiones de CO₂, industria del cemento, sostenibilidad, inteligencia artificial.

Abstract

The research examines how Smart Grids can reduce CO₂ emissions and improve energy efficiency in the cement industry in Colombia, a sector with a high environmental impact. It highlights the importance of these networks in the energy transition towards the use of renewable sources and the reduction of dependence on fossil fuels, especially given the recent increase in CO₂ emissions in the country. Globally, while investments in clean energy are rising, further efforts are needed to meet the zero emissions targets by 2050.

The study will address how the implementation of Smart Grids optimizes energy use in cement production, facilitating the integration of renewable energies and improving sustainability. A quantitative approach will be used, analyzing the adoption of these technologies and their impact on energy consumption and CO₂ emissions through surveys, interviews, and historical data analysis.

Keywords: Smart Grids, energy efficiency, CO₂ emissions, cement industry, sustainability, artificial intelligence.

Introducción

El artículo aborda la implementación de Smart Grids en la industria del cemento en Colombia como una solución para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO₂, en línea con los objetivos de sostenibilidad global para enfrentar el cambio climático. A nivel científico, se reconoce que la industria cementera es una de las más intensivas en consumo energético y emisiones de CO₂. Estudios previos han examinado la importancia de integrar energías renovables y tecnologías inteligentes para lograr una transición energética efectiva. Por ejemplo, la International Energy Agency (IEA) ha documentado que la intensidad de las emisiones en el sector cementero se ha mantenido estable, lo cual indica la necesidad de tecnologías emergentes como las Smart Grids para reducir emisiones.

Esta investigación se apoya en hipótesis científicas que sugieren que tecnologías como IoT (Internet de las Cosas) y la inteligencia artificial pueden ser aplicadas en redes inteligentes para gestionar mejor la demanda y la oferta de energía en tiempo real, optimizando el uso de energías renovables como eólica o la solar en procesos industriales. Sin embargo, persiste el debate en torno a la viabilidad económica de estas tecnologías y el ritmo necesario para su adopción, especialmente en países en desarrollo como Colombia, donde el costo de implementación es un factor crucial.

El tema de investigación se centra en la aplicación de Smart Grids para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad en la industria cementera en Colombia. Este estudio se ubica dentro del campo de la sostenibilidad industrial y la eficiencia energética. En concreto, la industria del cemento es responsable de una significativa huella de carbono, debido tanto al consumo de combustibles fósiles como al proceso mismo de producción que requiere altas cantidades de energía térmica y eléctrica. La introducción de redes inteligentes permitiría una gestión optimizada del uso de electricidad, integrando fuentes renovables y reduciendo la dependencia de fuentes contaminantes, como el gas natural y el carbón.

El objetivo general de esta investigación es evaluar cómo la implementación de Smart Grids puede optimizar la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO₂ en la industria del cemento en Colombia.

Los objetivos específicos de esta investigación son los siguientes: en primer lugar, analizar el estado actual de la eficiencia energética en la industria cementera colombiana y detectar áreas de oportunidad para la implementación de Smart Grids. En segundo lugar, evaluar la relación entre el uso de Smart Grids y la reducción de emisiones de carbono, integrando tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial para mejorar la sostenibilidad. Finalmente, se proponen recomendaciones para la implementación de Smart Grids en la industria del cemento, con un enfoque en la predicción y optimización del uso de energía.

Tras la definición de objetivos y demás aspectos relevantes se dio paso a formular la pregunta de investigación que guía este estudio dando como resultado la siguiente: ¿Cómo puede la implementación de Smart Grids contribuir a la reducción de emisiones de CO₂ y a la mejora de la eficiencia energética en la industria cementera de Colombia?

Al realizar un análisis acucioso de la pregunta de investigación se generan las siguientes hipótesis:

1. La implementación de Smart Grids en la industria del cemento reducirá significativamente las emisiones de CO₂ al optimizar el consumo de energía, especialmente mediante el uso de energías renovables y la minimización de la dependencia de combustibles fósiles.
2. Esta hipótesis plantea relación con una mayor percepción de eficiencia energética de la producción del cemento en Colombi
3. La integración de tecnologías como la inteligencia artificial en Smart Grids permitirá mejorar la eficiencia

energética en la producción de cemento, anticipando picos de demanda y ajustando el consumo energético en tiempo real, lo que contribuirá a una mayor sostenibilidad del sector.

Estas hipótesis guían el estudio, estableciendo una base de trabajo que busca validar si las redes inteligentes no solo son factibles en términos técnicos, sino también sostenibles y eficientes en el contexto de la industria cementera en Colombia.

Marco teórico

En las últimas décadas, la creciente demanda de energía y la necesidad de mitigar el impacto ambiental han fomentado el desarrollo de redes eléctricas inteligentes, conocidas como *Smart Grids*. Estas redes emplean tecnologías avanzadas de información y comunicación para mejorar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad del sistema eléctrico. Las *Smart Grids* integran infraestructuras de energía renovable, almacenamiento de energía y redes de sensores, lo que permite una gestión dinámica de la oferta y la demanda. A continuación, se revisarán las definiciones que enmarcan y respaldan teóricamente la investigación.

Definición *Smart Grids*

El cambio climático y la necesidad de un uso sostenible de los recursos han impulsado la implementación de *Smart Grids* para mejorar la eficiencia energética en la industria del cemento. Según la International Energy Agency (IEA), una *Smart Grid* es una red eléctrica que utiliza tecnologías digitales avanzadas para gestionar el transporte de electricidad desde diversas fuentes, optimizando la operación y minimizando costos e impactos ambientales. Además, estas redes pueden mejorar la utilización de fuentes de energía renovable como la solar y la eólica.

Cifras de sostenibilidad energética

Hoy en día, la preocupación por el medio ambiente y el uso sostenible de los recursos es crucial, y se está promoviendo la reducción de la huella de carbono a nivel global. La transición energética, que implica cambiar la matriz energética de fuentes fósiles a energías renovables, es cada vez más relevante. Los gobiernos e industrias deben fijar metas para disminuir su impacto ecológico y social y democratizar el acceso a fuentes de energía sostenible. En Colombia, las emisiones de CO₂ en 2020 alcanzaron 90,252 megatoneladas, situando al país en el puesto 144 de 184 en términos de emisiones. Entre 2010 y 2022, las emisiones crecieron aproximadamente un 33.7%.

Cifras a nivel mundial

El informe World Energy Outlook 2023 advierte sobre la crisis del sector energético, agravada por la inestabilidad gubernamental y la crisis climática. Aunque la inversión en tecnologías limpias, como la solar y los vehículos eléctricos, ha crecido desde 2020, se requiere un esfuerzo adicional para alcanzar los objetivos de cero emisiones netas para 2050.

Se destaca que, a pesar de la reducción de la crisis energética en algunas áreas, los mercados siguen siendo volátiles, especialmente en Europa y Oriente Medio. Las políticas actuales están disminuyendo la proporción de combustibles fósiles, que se espera alcancen su máximo antes de 2030. Se prevé que el 50% de los nuevos vehículos matriculados en EE. UU. sean eléctricos para 2030, y China desempeña un papel crucial en el aumento del uso de energías limpias. Las *Smart Grids* son esenciales para gestionar diversas fuentes de energía sostenible y enfrentar los retos actuales.

Estrategia de transición energética en Colombia

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) de Colombia establece una estrategia para la transición energética, centrada en energías renovables no convencionales y la creación de comunidades energéticas. Sus objetivos principales son:

- Incorporar fuentes de energía no convencionales en la matriz eléctrica.
- Sustituir la leña en los hogares para cerrar brechas energéticas.

- Diversificar la matriz con hidrógeno, biomasa, geotermia, energía mareomotriz, eólica y solar.
- Alcanzar la meta de 2,000 megavatios de generación eléctrica renovable.
- Actualizar la política minera para explorar minerales estratégicos para la transición energética.

(DNP - Departamento Nacional de Planeación, 2023)

Implementación de *Smart Grids*

En Estados Unidos, el 40% de las emisiones de dióxido de carbono provienen de la generación eléctrica, mientras que solo el 20% se deben al transporte (Díaz Andrade & Hernández, 2011). Las *Smart Grids* pueden reducir estas emisiones mejorando la eficiencia y gestionando la carga de la red. Esta investigación se enfocará en la necesidad de implementar *Smart Grids* en la industria del cemento en Colombia.

Smart Grids y energía renovable

El artículo “Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges” examina la transición hacia redes inteligentes y la integración de fuentes de energía renovables (FER), destacando tres desafíos principales: la intermitencia de las FER, la mejora de la comunicación en la red y la adaptación de estándares. Se resalta la necesidad de desarrollar sistemas de soporte y almacenamiento para garantizar la flexibilidad y confiabilidad de la red. Aspectos clave son:

- La dependencia de recursos fósiles dificulta la transición a FER sostenibles.
- La variabilidad de las FER requiere avances en gestión.
- Las redes eléctricas son complejas y requieren un marco de comunicación robusto.
- Los consumidores deben ser incentivados a gestionar su consumo mediante tecnologías como contadores inteligentes.
- Es necesario mejorar la flexibilidad y confiabilidad para integrar más FER.

(Khalid, 2024)

Metodología

La investigación explora cómo la implementación de *Smart Grids* (redes inteligentes) puede contribuir a reducir las emisiones de CO₂ y mejorar la eficiencia energética en la industria cementera de Colombia. Se utilizará un enfoque cuantitativo, analizando datos sobre el consumo energético y las emisiones en la industria, a partir de informes oficiales y encuestas. El estudio evaluará cómo las *Smart Grids* optimizan los procesos de producción, mejorando la eficiencia y sostenibilidad, y cómo la inteligencia artificial puede prever picos de demanda energética para ajustar el uso de diferentes fuentes de energía. Además, se investigará su impacto en la reducción de emisiones de CO₂ y en la descarbonización de la industria cementera.

Definición de Variables

La definición de variables es crucial para analizar cómo las *Smart Grids* pueden transformar la industria cementera y mejorar la eficiencia energética. Esto ayuda a enmarcar el estudio y a identificar impactos en eficiencia y sostenibilidad. Las variables definidas son:

- **Variable Independiente:** Implementación de *Smart Grids*.
- **Variable Dependiente:** Eficiencia energética y reducción de emisiones de CO₂.

Definición conceptual

1. **Variable Independiente: Implementación de *Smart Grids***
Las *Smart Grids* son redes eléctricas que utilizan tecnologías digitales para gestionar de manera eficiente el suministro y la demanda de electricidad, optimizando costos y manteniendo la estabilidad de la red. Se definen como un sistema que integra ingeniería eléctrica y

tecnologías de información para maximizar la eficiencia energética, beneficiando así a la industria cementera y ayudando a reducir las emisiones de CO2.

2. **Variable Independiente: Eficiencia Energética**

La eficiencia energética se relaciona con la cantidad de energía aprovechada en comparación con la utilizada en procesos energéticos, promoviendo el uso óptimo de recursos energéticos dentro del marco legal y sostenible. Se define como la capacidad de obtener los mejores resultados con la menor cantidad de energía, y es fundamental en la transición hacia energías limpias y en la reducción de emisiones de CO2.

3. **Variable Independiente: Reducción de Emisiones de CO2**

La adopción de Smart Grids busca no solo la eficiencia económica y la disminución del consumo de energía convencional, sino también la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el CO2 uno de los principales. Disminuir estas emisiones es crucial para la sostenibilidad y el impacto ambiental positivo de las operaciones industriales. La mejora tecnológica y la innovación son clave para lograr esta reducción y beneficiar a la sociedad.

Definición operacional

1. **Variable Independiente: Implementar Smart Grids**

Se evaluará el grado de adopción de la infraestructura de Smart Grids en plantas de cemento, mediante la presencia de sensores, sistemas de monitoreo en tiempo real y software de gestión energética. La recopilación de datos se llevará a cabo a través de encuestas, entrevistas, revisión de

documentos técnicos y análisis estadístico de bases de datos sobre estas implementaciones.

2. **Variable Dependiente: Eficiencia Energética**

La eficiencia energética se medirá en términos de consumo de energía (kWh) por tonelada de cemento producido y la optimización de energía lograda a través de Smart Grids. La recolección de datos se realizará mediante registros de consumo energético y producción en las plantas en Colombia.

3. **Variable Dependiente: Reducción de Emisiones de CO2**

Se buscará evaluar la reducción de emisiones de CO2 utilizando datos de monitoreo, auditorías de sostenibilidad e informes ambientales. Se medirá la cantidad de CO2 emitida en toneladas por cada tonelada de cemento generada, analizando períodos específicos como días, meses o años.

Población y Muestra

La población objeto de estudio son las plantas cementeras en Colombia, un sector significativo por su impacto económico y su contribución a las emisiones de CO2. La muestra incluirá diversas plantas, destacando las principales como Argos, Cemex, Holcim, y Ultracem. En julio de 2024, la producción nacional de cemento gris fue de 1.155,7 miles de toneladas, con Antioquia siendo el departamento líder en producción.

Para el cálculo de la muestra, se utilizó como base teórica un 35% de empleados dedicados a áreas de innovación, producción y sostenibilidad, estimando que las plantas Cemex y Argos tienen aproximadamente 3,000 y 4,000 empleados, respectivamente.

Se aplicó la fórmula de muestreo, resultando en la necesidad de realizar 66

encuestas, lo que equivale al 2.69% de la población seleccionada.

Metodología de Análisis de Datos: La implementación de Smart Grids ha permitido una gran generación de datos en la industria cementera. Se plantean técnicas de análisis avanzadas, como el análisis estadístico y minería de datos, para optimizar la eficiencia energética y la sostenibilidad. Estos métodos ayudarán a identificar patrones en el uso de energía y a desarrollar modelos predictivos mediante algoritmos de aprendizaje automático, posibilitando decisiones proactivas en la asignación de recursos y mejoras continuas en eficiencia y sostenibilidad.

Técnicas de análisis de datos

Este proyecto busca entender los desafíos en la transformación de materias primas en la industria del cemento, formulando soluciones e identificando riesgos. Se emplearán diversas técnicas de análisis:

1. Análisis Estadístico: Para identificar tendencias usando datos del DANE y empresas.
2. Análisis de Contenido: Estudio cualitativo sobre energías renovables en la industria.
3. Análisis Temático: Entrevistas a profesionales del sector para obtener percepciones.
4. Estadística Descriptiva: Organización de datos cuantitativos y cálculo de indicadores.

Los instrumentos de recolección incluyen encuestas y entrevistas, enfocándose en el conocimiento y la viabilidad de implementar Smart Grids en la industria cementera. El objetivo es dimensionar el uso actual de esta tecnología, evaluar su aplicación en la optimización de recursos energéticos y identificar áreas de mejora ambiental.

Resultados

El análisis de los resultados se basa en encuestas aplicadas a 71 personas del sector cemento, con el objetivo de fortalecer la investigación y comprender el contexto de la industria.

Estadística Descriptiva:

- **Cargo:** La mayoría de los encuestados trabaja en áreas logísticas y operativas.
- **Rango de Edad:** No se evidenció predominancia de un rango etario específico.
- **Antigüedad:** La mayoría tiene más de 5 años de experiencia en el sector.
- **Nivel de Estudios:** La mayoría cuenta con un título profesional.
- **Profesión:** Las profesiones más comunes son ingenierías y ciencias administrativas.

Análisis Estadístico:

Se plantearon tres hipótesis para investigar la relación entre diferentes variables:

Hipótesis 1: Existe una fuerte correlación (0.863) entre la dependencia de energías tradicionales y las emisiones de CO y CO₂, indicando que la industria cementera sigue dependiendo de combustibles fósiles, lo que resalta la necesidad de adoptar energías renovables.

Hipótesis 2: Las correlaciones (0.851) entre la percepción de la eficiencia energética y la optimización de procesos sugieren que existen oportunidades significativas para mejorar la eficiencia energética en la producción de cemento.

Hipótesis 3: La correlación (0.841) entre el uso de inteligencia artificial (IA) en la optimización energética y su potencial como herramienta eficaz apunta a que la IA puede contribuir a mejorar la eficiencia energética en la industria cementera, a pesar de la posible inversión inicial.

En cada caso, se aceptó la hipótesis alternativa, sugiriendo que hay áreas clave para mejorar la gestión energética mediante la adopción de tecnologías más limpias y eficientes.

Propuesta de solución a la problemática

Como resultado del análisis, se propone lo siguiente:

Se encontró una correlación significativa entre el uso de combustibles fósiles y las emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.863. Este hallazgo indica que, a mayor dependencia de fuentes de energía tradicionales, mayores son las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que impacta negativamente al medio ambiente. En consecuencia, se recomienda la implementación inmediata de estrategias de transición hacia energías renovables y tecnologías más eficientes en la industria cementera, respaldadas por incentivos económicos y regulaciones que faciliten la adopción de fuentes de energía limpia.

Adicionalmente, los resultados de la tercera hipótesis revelan una correlación positiva (coeficiente de Pearson = 0.841) entre el uso de inteligencia artificial (IA) y la percepción de su eficacia para optimizar el consumo energético en la producción de cemento. Las empresas que están adoptando la IA tienden a valorar más su potencial para mejorar la eficiencia energética. Aceptar la hipótesis alternativa evidenció que la IA se considera una herramienta eficaz para mejorar la gestión energética, a pesar de la inversión inicial necesaria.

En conclusión, la utilización de IA para optimizar el consumo energético puede contribuir a una reducción de costos y emisiones a largo plazo, destacando la importancia de incorporar tecnologías avanzadas en la industria cementera para promover un desarrollo sostenible.

Conclusiones

En los resultados de la encuesta se evidencia la percepción de los involucrados en la operación o que tienen alguna relación directa o indirecta con la industria del cemento, se resalta la existencia de una problemática que tiene incidencias ambientales, económicas y productivas, esto se materializa en los procesos de producción dado los altos consumos de energía que requiere la industria marcando una

huella ambiental considerable, por fortuna con la revolución tecnológica existen herramientas como las Smart Grids y la inteligencia artificial (objeto de estudio en esta investigación) sin embargo la implementación de estas tecnologías es un reto importante el cual se debe aceptar y adaptar a los requerimientos de la industria.

Referencias

Borlase, S. (2013). Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions. En S. Borlase, *Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions*. Taylor & Francis Group.

Minenergía. (2023). Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/es/ministerio/estructura-organizacional/funciones/#:~:text=Formular%2C%20adoptar%2C%20dirigir%20y%20coordinar,de%20minerales%2C%20hidrocarburos%20y%20biocombustibles>.

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2013). Obtenido de <https://creg.gov.co/publicaciones/7812/funciones/>

REPSOL. (2024). REPSOL. Obtenido de <https://www.repsol.com:https://www.repsol.com/es/energia-futuro/tecnologia-innovacion/smart-grids/index.cshml#:~:text=Podemos%20definirlo%20como%20un%20sistema,con%20la%20máxima%20eficiencia%20energética>.

funcionpublica. (2014). Obtenido de Ley 1715 de 2014: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

Alcotzi, P. (2011). *ISO 50001, Gestión de Energía*.

Congreso de Colombia. (2001, 05 de Octubre). *LEY 697 DE 2001*. Diario Oficial No. 44573.

CEMIX. (s.f.). Obtenido de <https://www.cemix.com/piedra-caliza/>

REPSOL. (2024). *REPSOL*. Obtenido de <https://www.repsol.com/>:
<https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/ejes-sostenibilidad/cambio-climatico/eficiencia-energetica/que-es-la-eficiencia-energetica/index.cshtml#:~:text=El%20concepto%20de%20uso%20eficiente,impactos%20ambientales%20asociados%20a%20ella>.

CEMEXLATAM. (2023). Obtenido de Cómo Hacemos Cemento: <https://www.cemexlatam.com/es/soluciones-construccion/portafolio-productos/cemento/como-lo-hacemos>