

La importancia de las técnicas de reutilización de residuos en las centrales termoeléctricas

Francisco Javier Álvarez Acero – Kevin Santiago Ortiz Acer
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Los progresos científicos y tecnológicos recientes están directamente relacionados con un incremento en el consumo de energía, en consecuencia, se ha generado un crecimiento y expansión en el sector eléctrico. Este aumento en la demanda conlleva una mayor generación de energía eléctrica para satisfacerla, la expansión de las redes de transmisión y distribución, y, como resultado, la producción de residuos derivados de todas estas actividades. Es importante destacar que todas las formas de generación de energía eléctrica producen desechos, incluyendo aquellos que son peligrosos, lo que a su vez resulta en impactos ambientales negativos (Maia et al., 2021). Según el informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente de 2019, entre 2010 y 2016, los países de la Unión Europea aumentaron un 4_% en la producción total de residuos del sector energético (EEA, 2023). Algunos de estos desechos se clasifican como residuos eléctricos y electrónicos (E-waste), los cuales caen en la categoría de residuos con la tasa de generación más alta a nivel mundial (Naik & Satya Eswari, 2022).

La gestión adecuada de los residuos es fundamental para mitigar los impactos ambientales relacionados con la generación de electricidad. Tomando como base las centrales que usan combustibles fósiles, las cuales generan más desechos que otras plantas de generación de energía existentes. Todas las etapas del ciclo del combustible, que abarcan desde la extracción y refinado hasta el consumo, conllevan una gran cantidad de producción de sobrantes tanto sólidos como gaseosos. Un ejemplo de esta problemática se evidencia en la generación de residuos a partir de la utilización de carbón en centrales termoeléctricas. A pesar del esfuerzo continuo por diversificar las fuentes de energía, el carbón sigue siendo una fuente de generación primordial a nivel mundial (Maia et al., 2021). Durante el proceso de combustión del carbón, se producen grandes cantidades de cenizas volantes y cenizas de fondo, las cuales suelen eliminarse en los vertederos correspondientes. Esta práctica da lugar a impactos ambientales masivos debido a la extensa área de tierra requerida para su disposición. Además, si no se realiza

GIPEM 05, diciembre (2023)
pp. 51-58
www.gipem.co/revista-gipem
gipem_fiarman@unal.edu.co
©Derechos patrimoniales
Universidad Nacional de
Colombia

un tratamiento adecuado en la gestión de esos residuos, el impacto al medio ambiente es mucho mayor (Kostova et al., 2023)

Para combatir esta problemática ambiental muchos países han implementado leyes y regulaciones que definen las responsabilidades de los agentes involucrados en la gestión adecuada. Un ejemplo a esto es la implementación de las directivas 2002/96/CE y 2002/95/CE, las cuales tienen como objetivo abordar los desafíos ambientales asociados con la fabricación y gestión de equipos eléctricos y electrónicos. La primera aborda la gestión adecuada de los residuos generados por los dispositivos, donde establece normas para la recogida, tratamiento y reciclaje. La segunda establece la reducción y eliminación de sustancias peligrosas en la fabricación de estos equipos (European Commission, 2003). Las empresas del sector eléctrico usan los informes de sustentabilidad para mostrar las estrategias establecidas para el cumplimiento de las leyes y regulaciones a las que están sujetas.

Estas regulaciones buscan promover la reducción de desechos, la reutilización, el reciclaje y otras formas de recuperación antes de recurrir a la eliminación en vertederos, siguiendo el principio de jerarquía de desechos (Shah et al., 2023). Este principio es una propuesta internacional conformada por diversas normativas ambientales, utilizada por las industrias como guía en la toma de decisiones sobre la gestión de sus excedentes. Esta jerarquía establece el siguiente orden de prioridad para las acciones a tomar: la primera y más deseable es poder evitar la generación de residuos, esto se puede lograr con la implementación de nuevas tecnologías que minimicen la producción de desechos en las etapas desarrolladas dentro de la planta; la segunda es la preparación de los sobrantes para la reutilización; la tercera es el reciclado o compostaje de los desechos, transformando estos en recursos útiles; la cuarta son otros tipos de recuperación, que en este contexto se refiere al aprovechamiento del calor residual de los procesos dentro de la planta; la quinta y última acción a tomar es la eliminación de estos excedentes en vertederos apropiados y con una gestión de alta calidad. (Naik & Satya Eswari, 2022).

La administración de residuos por parte del sector eléctrico representa un aspecto fundamental, este ensayo resalta la importancia de la gestión de residuos en las plantas termoeléctricas, destacando la implementación de diversas técnicas y tecnologías. Comenzaremos examinando la relevancia de las centrales termoeléctricas en el sistema eléctrico colombiano, destacando el papel de dichas plantas en la matriz energética. Posteriormente, exploraremos las normativas regulatorias que rigen el tratamiento de los residuos generados por estas plantas, destacando su papel legal o ético. Finalmente, se realizará un análisis de las tecnologías aplicadas en las centrales termoeléctricas, ya sea en Colombia o en países vecinos, demostrando los beneficios que traen a la planta, la contribución económica y mitigación del impacto al medio ambiente.

En el Contexto del sector energético colombiano, es evidente que Colombia ha logrado un importante avance en la adopción de fuentes de energía renovable, según el plan energético nacional desarrollado por la UPME, donde muestra el avance del sector energético colombiano desde 1975 hasta la actualidad (UPME, 2019). En el presente las centrales hidroeléctricas desempeñan un papel fundamental en la generación de energía en Colombia, dado que representan un 68 % de la matriz energética nacional. Sin embargo, a pesar de la masiva participación de energías renovables en la matriz energética, el sector termoeléctrico sigue siendo indispensable para el país, debido a que contribuye con un 30.7 % a la matriz, además son el respaldo del sistema eléctrico del país, puesto que la mayoría operan bajo contratos de confiabilidad (ACOLGEN, n.d.).

En Colombia, el cargo por confiabilidad es un instrumento que se utiliza para garantizar la disponibilidad de capacidad de generación eléctrica, especialmente en situaciones de alta demanda. Este contrato es establecido por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) desde el año 2006 estipulado en la resolución 071 y 086, este contrato fue diseñado para asegurar la suficiente capacidad instalada que atienda las necesidades energéticas del país en momentos críticos, como el fenómeno El Niño (Isabel et al., 2012), (CREG, 2006). Es por esto que las centrales termoeléctricas mediante estos contratos son una herramienta esencial para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico colombiano y evitar apagones o

cortes de energías, como fue el caso del periodo 2015-2016 donde las centrales termoeléctricas llegaron a abastecer el 70% de la demanda nacional por los bajos niveles de los embalses que tenían las hidroeléctricas (Mateus Valencia, 2016).

Dado la importancia de las centrales termoeléctricas en Colombia, es importante definir las problemáticas que tiene el funcionamiento de estas. Una de las más alarmantes es la emisión de contaminantes atmosféricos, resultado de la combustión incompleta de los combustibles utilizados (Martínez, 2005). Esta combustión incompleta se debe a la presencia de impurezas en los combustibles, la combinación de fases en el aire y las condiciones en las que se lleva a cabo la quema de hidrocarburos, como consecuencia de esta combustión se liberan diversos productos químicos dañinos en la atmósfera (Mastrángelo, 2002). Estos contaminantes atmosféricos contribuyen a la degradación de la calidad del aire y a problemas de salud pública (Ugarte-Avilés et al., 2017). Además de la emisión de contaminantes atmosféricos, la generación termoeléctrica también significa la producción de desechos peligrosos. Estos desechos incluyen lodos de tanque de almacenamiento de hidrocarburos y material absorbente contaminado con hidrocarburos. La gestión adecuada de estos desechos es esencial para prevenir impactos negativos en el medio ambiente y proteger la sociedad en general (Prado Guevara, 2017).

Para abordar estos desafíos ambientales, es imperativo ejecutar un sistema de gestión integral y un manejo adecuado de los desechos peligrosos. Para ello se destacan dos estrategias claves y así mitigar los impactos de generación termoeléctrica, el primero es la implementación de tecnologías limpias, como la captura y el tratamiento de gases contaminantes, la co-combustión y el reciclaje de cenizas; el segundo es la reducción en la fuente, lo que implica minimizar la generación de desechos peligrosos desde el principio, esto se logra seleccionando combustibles con menos impurezas, mejorar los procesos de combustión o aplicar prácticas de gestión más eficientes (Daza Zapata, 2018). Para poder establecer estas estrategias es necesario comprender la parte legislativa, para así determinar los límites aceptables respecto a la producción de residuos y los beneficios desde la parte de incentivos a la hora de implementar alguna de estas estrategias.

En Colombia, la regulación de la gestión de residuos se establece a través del decreto 4741 de 2005, el cual tiene como objetivo principal regular y establecer directrices precisas para la generación, manejo, transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos, con el objetivo de prevenir la contaminación ambiental (Decreto 4741, 2005). En este decreto se establece los requisitos específicos para los generadores de desechos peligrosos, lo que incluye la clasificación y el etiquetado de los excedentes, así como la documentación de su generación y características. También garantiza el transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final donde los actores deben incluir la construcción y operación de instalaciones autorizadas para este propósito, como rellenos sanitarios o incineradores. Además, dicha ley también regula y presenta las sanciones por incumplimiento de las disposiciones del decreto, promoviendo así el cumplimiento del mismo y la responsabilidad de la gestión de los residuos peligrosos (Díaz Guzmán, 2020). Otra ley que es de gran importancia para la mitigación de los contaminantes atmosféricos generados por las termoeléctricas es el decreto 02 de 1982, la cual en el 2015 con el decreto 1076 se unificó con el decreto 948 de 1995 (Decreto 1076 Del 2015, 2015). Estos decretos establecen un marco normativo para la vigilancia y el control de la contaminación al aire con fuentes fijas, así como las medidas de corrección y prevención.

En la actualidad, en Colombia no existen criterios establecidos para controlar las emisiones generadas por la operación de calderas, turbinas o motores que empleen gas natural como combustible (Decreto 2 de 1982, 1982). Hasta el momento las regulaciones de emisiones atmosféricas se rigen por los decretos anteriormente mencionados, para controlar las emisiones de calderas que utilizan como combustible el carbón en relación al material particulado y en establecer las alturas de la chimenea necesaria para la emisión de óxidos de azufre (Herrera Torres, 2008). La necesidad de implementar las regulaciones y mitigar los impactos ambientales de las termoeléctricas impulsa la búsqueda de tecnologías para aprovechar sus residuos. Una de las soluciones más comunes es la implementación de cogeneradores o

ciclos combinados, que aprovechan el calor residual, no obstante, existen otras técnicas que se explorarán a continuación, destacando su implementación, relevancia ambiental y social, así como su eficiencia económica y energética (Noor et al., 2015). La alternativa más asequible a adoptar en las centrales termoeléctricas es la de incorporar en su ciclo termodinámico un ciclo combinado, donde se aprovecha el calor residual del ciclo principal, que normalmente es un ciclo a gas. Dado que la implementación de esta tecnología consiste en adherir un nuevo ciclo con maquinaria nueva, este genera una inversión inicial alta. Es por esto que se debe tener en cuenta un análisis económico (Bori et al., 2022).

Gracias a un estudio económico-ambiental realizado en la planta termoeléctrica Machala i, la cual contempló la incorporación de un ciclo combinado, se observa que, a una proyección de 15 años, se tiene una perspectiva de rentabilidad moderada, a pesar de no tener una proyección de ganancias significativas, la planta está en la capacidad de compensar sus gastos fijos y variables con los ingresos generados. Observando la parte ambiental, tenemos que, al implementar el ciclo combinado, las reducciones en la liberación de CO₂ es del 34 %, demostrando así, que la adopción del ciclo combinado en las centrales termoeléctricas es viable. Además, es importante mencionar que al reducir la producción de CO₂, la planta tiene el derecho de participar en los mercados de carbono, gracias a la disminución de dichas emisiones. Asimismo, como el incentivo al participar de dicho mercado está ligado a la cantidad de CO₂ en toneladas no producidas, entre más grande sea la planta termoeléctrica, mayor será dicho incentivo (Calle Morocho, 2013). Aun así, con la disminución de CO₂ liberado con el ciclo combinado, las plantas termoeléctricas siguen liberando cantidades preocupantes de CO₂ al ambiente, y para ello, existen alternativas para mitigar estos impactos al medio ambiente como lo es la descarbonización de las plantas mediante la Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC), el uso de tecnologías de gasificación del carbón y la idea del llamado carbón limpio. La viabilidad de estas opciones depende de factores como el costo del carbón y del carbono, marcos legales y regulaciones, la aceptación pública y la implementación efectiva de estas tecnologías (Rogieri Pelissari et al., 2023).

La implementación de sistemas CAC en plantas termoeléctricas basadas en carbón con una capacidad instalada mayor a 300 MW puede ser una opción viable. Esto se debe a que el tiempo de vida útil de estas plantas suele ser lo suficientemente largo como para permitir la recuperación de la inversión en la implementación de tecnologías de sistemas CAC. Aunque inicialmente la implementación de este sistema requiere una inversión inicial significativa, los beneficios tanto a nivel ambiental debido a la reducción de emisiones como económico al cumplir con las regulaciones ambientales y participando de los mercados de carbono o recibir incentivos fiscales, conllevan a que en los empresarios se genere un mayor atractivo económico y, por consiguiente, la implementación de los sistemas CAC sean más factibles en una planta termoeléctrica. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la viabilidad de estos sistemas también depende de la legislación, el precio del carbono, las regulaciones ambientales y la disposición de la planta en implementar el sistema CAC (Rogieri Pelissari et al., 2023).

Otro de los residuos que generan dichas plantas eléctricas es la ceniza volante, aproximadamente el 13 % de materia prima se transforma en ceniza volante después de la combustión. Este subproducto posee diversas aplicaciones gracias a sus propiedades químicas; por ejemplo, componentes puzolánicos como Silica (SiO₂) y Alúmina (Al₂O₃), las cuales pueden ser aprovechados como materia prima para la fabricación de cemento, además, si la ceniza contiene suficiente óxido de hierro (Fe₂O₃), estos restos pueden ser aprovechados en las industrias siderúrgicas. La utilización de ceniza volante residual de la planta termoeléctrica Termopaipa IV como adhesivo en la industria cementera ejemplifica la reutilización efectiva de los residuos generados por las termoeléctricas. Esta ceniza residual pertenece al tipo F según la norma NTC-3493 de 1993, este tipo de ceniza volante contiene más del 70% de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃, gracias a estos componentes químicos y a la presencia de aluminosilicatos amorfos presentes en este tipo de ceniza, la convierte en un material idóneo empleado en la producción de cemento (Bautista-Ruiz et al., 2017), (ICONTEC,1993). Un ejemplo del aprovechamiento de este subproducto en el material cementante, se evidencia en un estudio en el que se analizaron mezclas de

concreto convencionales con diferentes proporciones de material cementante (300, 350 y 400 Kg/m³). En estas mezclas experimentales, se reemplazó el 40 % del material cementante por un 70 % de ceniza volante y un 30 % de cal hidratada. Como conclusión de la investigación, se demuestra que es factible incorporar ceniza volante y cal hidratada en las mezclas con 350 y 400 kg/m³ de material cementante ya que las propiedades del concreto no se ven afectadas por la adición de ceniza (Hurtado-Figueroa et al., 2020).

Una de las tecnologías que se han ido desarrollando en los últimos años es la gasificación del carbón, la cual se destaca por su bajo costo en comparación con otras tecnologías. Sin embargo, es importante tener en cuenta que tiene una gran desventaja y es la alta liberación de CO₂, por tanto, es esencial encontrar un equilibrio entre la capacidad de generar electricidad, los costos de procesamiento y la captura y reducción de las emisiones. Para implementar dicha tecnología en Colombia, es necesario realizar un estudio y planificación energética sólida, optimizando la generación de electricidad y reduciendo la huella de carbono, adoptando tecnologías como la captura y almacenamiento de carbono (Insuasty-Reina et al., 2022). El proceso de gasificación del carbón se lleva a cabo de la siguiente manera: el carbón pulverizado se introduce en un gasificador, donde, mediante la adición de oxígeno y vapor, se genera así una reacción la cual da como resultado un gas sintético; este gas obtenido es sometido a diversos procesos de separación de componentes y como resultado se llega a la producción de hidrógeno azul. El hidrógeno azul, obtenido a partir de este proceso, puede utilizarse como una fuente de energía más limpia comparada con la quema directa del carbón en las centrales del país (Segundo Gutiérrez, 2018).

Para llevar a cabo una comparación precisa entre la matriz energética actual y la propuesta de implementación del hidrógeno azul, es necesario consultar fuentes alternas dado que dichas tecnologías aún no han sido implementadas en el país. La matriz energética actual, considerando sus fuentes de generación constantes, cubrirán la demanda proyectada en Colombia hasta el 2031. Con la implementación del hidrógeno azul, se amplía el periodo de cobertura de la demanda hasta aproximadamente el 2036, lo que da un resultado positivo en cuanto a seguridad energética a largo plazo. En cuanto al análisis de las emisiones de CO₂, la implementación de esta tecnología trae beneficios de reducción de dichas emisiones teniendo en cuenta el nivel de producción en el proceso de gasificación y la captura de carbono. Debido a la complejidad de la técnica y los altos costos de la misma, es necesario para su implementación abordarla desde un ámbito económico y tomando en consideración los aspectos regulatorios (Insuasty-Reina et al., 2022).

A modo de conclusión, podemos afirmar que, en medio de la urgente necesidad de adaptarse al cambio climático, las naciones del mundo están impulsando la diversificación de las fuentes de generación de energía eléctrica, buscando reducir así la dependencia de combustibles fósiles que son altamente contaminantes. A pesar de este impulso hacia energías más limpias, las termoeléctricas mantienen un rol significativo en la matriz energética y su contribución se basa en dos pilares fundamentales: la confiabilidad que aportan a la estabilidad de los sistemas eléctricos y la infraestructura existente ya que en muchos países dependen más del 50 % de este tipo de generación. Es innegable que la fiabilidad y consistencia que ofrecen las termoeléctricas han sido esenciales para sostener la demanda energética, especialmente en Colombia donde mayormente la generación depende de fuentes hídricas. Es por esto que se requieren continuas investigaciones y desarrollo tecnológico que tengan como objetivo mejorar la eficiencia y minimizar su huella ecológica.

Al día de hoy, se han estudiado diversas tecnologías para aprovechar los residuos generados por las plantas termoeléctricas que funcionan a carbón o gas. Una de estas opciones prometedoras es la reutilización de cenizas volantes en la fabricación de cemento, ofreciendo una alternativa para evitar la acumulación de estos residuos en vertederos. Otra área de gran importancia es la implementación de sistemas de captura y almacenamiento de carbono, esta tecnología es primordial para la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de CO₂. Esta captura puede ir complementada con el

aprovechamiento del calor residual por medio del ciclo combinado, dado que este al ser incorporado, las emisiones de CO₂ disminuyen un 30 % aproximadamente. Otra tecnología prometedora es la gasificación del carbón, que, a diferencia de la quema directa, la gasificación transforma el carbón en un gas sintético, permitiendo un proceso más limpio y eficiente.

Además de los beneficios medioambientales, la implementación de estas tecnologías implica beneficios económicos, tales como la venta de cenizas, la reutilización de calor residual para la generación de energía y otros procesos productivos y la participación de los mercados de carbono. Se requiere un esfuerzo significativo en Colombia en términos de investigación y aplicación de estas tecnologías, ya que pueden desempeñar un papel crucial en el progreso del país, esto abarca que la transición energética sea más sostenible, el incremento de la eficiencia de las plantas termoeléctricas, la garantía de un mercado energético más estable y confiable, la protección del medio ambiente y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La inversión en estas tecnologías no solo beneficia el desarrollo económico y energético de Colombia, sino que también contribuye al cuidado del medio ambiente y a la mejora de la calidad de vida de sus habitantes.

Referencias

- ACOLGEN. (n.d). VISIÓN-2030. https://acolgen.org.co/wp-content/uploads/2022/04/ACOLGEN_VISION-2030.pdf
- Bautista-Ruiz, W. A., Díaz-Lagos, M., & Martínez-Ovalle, S. A. (2017). Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(1), 135-146. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n1.2017.7374>
- Bori, I., Orah, A. M., & Ayo, S. A. (2022). Techno-economic analysis of combined cycle power plants for electricity generation in Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 41(4), 729-738. <https://doi.org/10.4314/njt.v41i4.10>
- Calle Morocho, F. F. (2013). Determinación de los beneficios económicos y ambientales por la conversión de la central termogas Machala i a una central con ciclo combinado [Tesis de Ingeniería Eléctrica, UNIVERSIDAD DE CUENCA]. <http://dspace.ucuenca.sedu.ec/handle/123456789/4304>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2006). RESOLUCIÓN 71 DE 2006. Por la cual se adopta la metodología para la remuneración del cargo por confiabilidad en el Mercado Mayorista de Energía.
- Daza Zapata, C. S. (2018). Análisis al proceso de evaluación ambiental en la gestión de residuos sólidos para centrales termoeléctricas sometidas al sistema de evaluación de impacto ambiental [Tesis de Química Ambiental, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168102>
- Díaz Guzmán, C. (2020). Diagnóstico y seguimiento a la gestión de residuos peligrosos de la Central Termoeléctrica GECELCA 3 S.A.S. E.S.P. [Tesis de ingeniería ambiental, Universidad de Córdoba]. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/3907>
- European Commission. (2003). Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.

- European Environment Agency (EEA). (2023, June 28). Waste generation in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-generation-and-decoupling-in-europe?activeAccordion=ecdb3bcf-bbe9-4978-b5cf-0b136399d9f8>
- Herrera Torres, Gabriel. L. L. Cristina. S. Q. M. V. (2008). Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas. *Épsilon*, 10(6).
- Hurtado-Figueroa, O., Bonilla-Granados, C. A., & Cardenas-Gutierrez, J. A. (2020). Concrete slump with partial replacement of cementitious material by fly ash and hydrated lime: Asentamiento en concretos con reemplazo parcial de material cementante por ceniza volante y cal hidratada. *Respuestas*, 25(S2), 46-52. <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/2301>
- ICONTEC (1993). NTC 3493. Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento pórtland.
- Insuasty-Reina, J. G., Osorio-Gomez, J. C., & Manotas-Duque, D. F. (2022). A System Dynamics Model for the Analysis of CO2 Emissions Derived from the Inclusion of Hydrogen Obtained from Coal in the Energy Matrix in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(2), 72-82. <https://doi.org/10.32479/ijeep.12538>
- Kostova, I., Apostolova, D., Bechtel, A., Groß, D., & Stefanova, M. (2023). Fly ashes generated from coal-fired thermoelectric power plants on the Balkan Peninsula – Organic geochemical study. *International Journal of Coal Geology*, 276, 104326. <https://doi.org/10.1016/J.COAL.2023.104326>
- Maia, R., Ottoni, M., Barros, J., & dos Santos, M. A. (2021). Assessment of the waste management reporting in the electricity sector. *Cleaner and Responsible Consumption*. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2021.100031>
- Martinez, J. (2005). Fundamentos Tomo 1. In *Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos* (Vol. 1).
- Mastrángelo, S. (2002). Conceptos de Generación Termoeléctrica: Combustibles Utilizados e Impactos Ambientales. *Boletín Energético* N° 10, Comisión Nacional de Energía Atómica, Grupo de Prospectiva y Planeamiento Energético.
- Mateus Valencia, A. C. (2016). Crisis energética en Colombia. *Tecnología Investigación y Academia* (TIA), 4(2), 74-81. <http://hdl.handle.net/11349/21158>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - Colombia. (2005). Decreto 4741 de 2005. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (20015). Decreto 1076 del 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo sostenible.
- Naik, S., & Satya Eswari, J. (2022a). Electrical waste management: Recent advances challenges and future outlook. *Total Environment Research Themes*, 1-2, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2022.100002>

- Noor, A., Puteh, R., Ricardo, M.-B., Romagnoli, A., Basheer, U., Hussein, S., Salleh, S., Hanafi, M., & Md Sah, M. H. (2015, October). Technologies for Waste Heat Energy Recovery from Internal Combustion Engine: A Review. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14893.90084>
- Prado Guevara, M. B. (2017). Propuesta de gestión integral de desechos peligrosos generados en las centrales termoeléctricas de la Unidad de Negocios Termopichincha ubicadas en la zona Sierra. [Tesis de Ingeniería Ambiental, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17452>
- Presidente de la República de Colombia. (1982). Decreto 2 de 1982. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a las emisiones atmosféricas.
- Restrepo Estrada, M, Arango Aramburo, S y Vélez, L. (2012). La confiabilidad en los sistemas eléctricos competitivos y el modelo colombiano de cargo por confiabilidad. Facultad de Ciencias Económicas - Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/43000>
- Rogieri Pelissari, M., San Martín Cañas, S., Oliveira Barbosa, M., & Gaeta Tassinari, C. C. (2023). Decarbonizing coal-fired power plants: Carbon capture and storage applied to a thermoelectric complex in Brazil. *Results in Engineering*, 19, 101249. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101249>
- Segundo Gutiérrez, J. (2018). Simulación de una planta de gasificación integrada en ciclo combinado (IGCC) mediante Aspen Plus. Comparación entre configuraciones sin captura y con captura de CO2. <http://hdl.handle.net/10498/20045>
- Shah, S. A. R., Zhang, Q., Abbas, J., Tang, H., & Al-Sulaiti, K. I. (2023). Waste management, quality of life and natural resources utilization matter for renewable electricity generation: The main and moderate role of environmental policy. *Utilities Policy*, 82, 101584. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2023.101584>
- Ugarte-Avilés, T., Manterola, C., Cartes-Velásquez, R., & Otzen, T. (2017). Impact of proximity of thermoelectric power plants on bronchial obstructive crisis rates. *BMC Public Health*, 17(1), 96. <https://doi.org/10.1186/s12889-016-4008-7>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2019). Plan Energético Nacional 2020-2050. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf