

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Ambiente y Sustentabilidad

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

Uso de aceite dieléctrico vegetal en transformadores eléctricos como una herramienta de mitigación del cambio climático en Quito

Rolando Tomas Utreras Logacho

Tutor: William Sacher Freslon

Quito, 2024



Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Rolando Tomas Utreras Logacho, autor del trabajo intitulado “Uso de aceite dieléctrico vegetal en transformadores eléctricos como una herramienta de mitigación del cambio climático en Quito”, mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que, en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

13 de julio de 2024

Firma: _____

Resumen

La presente investigación estudia el potencial en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, que implica transitar progresivamente del uso de aceite dieléctrico mineral al uso del aceite dieléctrico vegetal en los transformadores eléctricos de la ciudad de Quito. Se implementa un análisis del ciclo de vida de los dos tipos de aceites dieléctricos, que permite una evaluación detallada de la contribución de emisiones de gases de efecto invernadero en todas las etapas de su vida. Este análisis reveló que el aceite dieléctrico vegetal implica emisiones de gases de efecto invernadero considerablemente inferiores al aceite mineral: respectivamente 18.10 gCO_{2eq}/Litro y 1,003.84 gCO_{2eq}/Litro; es decir, durante su vida el aceite dieléctrico vegetal implica emisiones de GEI correspondientes al 1,8 % de las emisiones que implica la vida del aceite dieléctrico mineral.

Se realizó una proyección a lo largo de un período comprendido entre 2024-2044, en el cual se contemplan tres diferentes escenarios para la sustitución (de gradual a integral) del aceite dieléctrico mineral por aceite dieléctrico vegetal, con tres ritmos de reemplazo diferentes. Se evidencia que la reducción de emisiones de CO₂, expresada en porcentajes de emisiones evitadas respecto a las emisiones del año 2019 del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) son bajos (de 0,03% a 0,10% según el escenario). Estos beneficios muy modestos en términos de emisiones evitadas para una ciudad como Quito destacan la necesidad de elaborar de manera debidamente informada las estrategias de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, para privilegiar las acciones que conducen a una reducción óptima de estas.

Palabras clave: reducción, emisión, aceite dieléctrico, gases de efecto invernadero, ciclo de vida, sustitución.

En memoria de mi querida mamá: María del Carmen Logacho.
A Danny Utreras y Paola Utreras, por ser tan buenos hermanos.
A mi padre Rolando Utreras, por impulsarme en este proceso.
A William Sacher por sus recomendaciones y paciencia.

Tabla de contenidos

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 12 |
| 1. Problema del cambio climático en general e imperativo de la mitigación..... | 20 |
| 2. Compromisos nacionales en términos de reducción de emisiones de GEI..... | 21 |
| 3. Transición energética: el papel de los sistemas energéticos/eléctricos y su transformación en la mitigación del cambio climático..... | 23 |
| 4. El análisis de ciclo de vida | 27 |
| 5. Cambio climático, mitigación y energía en el Ecuador | 30 |
| Capítulo segundo Transformadores y aceites dieléctrico | 34 |
| 1. Características generales de los transformadores..... | 34 |
| 2. Principio de funcionamiento | 35 |
| 3. Clasificación de transformadores | 36 |
| 4. El aceite dieléctrico: aislante eléctrico y térmico..... | 37 |
| 5. Propiedades del aceite dieléctrico mineral..... | 39 |
| 6. Circulación del aceite en transformadores de distribución | 45 |
| 7. Tipos de aceites dieléctricos para transformadores..... | 46 |
| 7.1. Aceite dieléctrico mineral | 46 |
| 7.2. Aceites sintéticos..... | 48 |
| 7.3. Aceites bases | 49 |
| 8. Comparación de las propiedades físico químicas de los aceites dieléctricos minerales y vegetales..... | 52 |
| 9. El papel del aceite dieléctrico en las emisiones de GEI asociadas al proceso de transformación de la energía eléctrica..... | 53 |
| 10. El sistema energético en el Ecuador y el DMQ en particular y las oportunidades de mitigación de Cambio Climático..... | 55 |
| Capítulo tercero Metodología..... | 59 |
| 1. Procesos de producción de los diferentes tipos de aceite y las emisiones asociadas | 59 |
| 2. Métodos usados para estimar las emisiones de GEI asociadas al uso de aceites dieléctricos..... | 63 |
| 3. Implementación del Análisis de Ciclo de Vida..... | 65 |

| | |
|---|-----|
| 4. Aplicación de los resultados del Software Building for environmental and Economic Sustainability (BEE 4.0)..... | 65 |
| 5. Unidad de medición y ventana temporal considerada..... | 67 |
| Capítulo cuarto Emisiones generadas en la producción de aceite dieléctrico | 69 |
| 1. Identificación de las etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral..... | 70 |
| 2. Etapas del ciclo de vida..... | 70 |
| 3. Detalles de las etapas y su potencial en términos de emisiones..... | 70 |
| 3.1. Extracción | 71 |
| 3.2. Fabricación del aceite dieléctrico | 71 |
| 3.3. Transporte: | 71 |
| 3.4. Uso en equipos eléctricos..... | 71 |
| 3.5. Disposición final | 72 |
| 4. Estimación de las emisiones de CO ₂ las etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral | 72 |
| 5. Identificación de las etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico vegetal | 73 |
| 5.1. Extracción del aceite | 74 |
| 5.2. Refinación del aceite vegetal..... | 75 |
| 5.3. Transporte | 75 |
| 5.4. Uso en equipos eléctricos..... | 75 |
| 5.5. Disposición final | 76 |
| 6. Estimación de las Emisiones de CO ₂ de aceite dieléctrico vegetal:..... | 76 |
| 7. Comparación de las emisiones de GEI asociadas al ACV de los aceites dieléctricos | 78 |
| 8. Incertidumbre y límites de la estimación | 80 |
| Capítulo quinto | 83 |
| Potencial ahorro de las emisiones de GEI por uso progresivo de aceite dieléctrico vegetal en transformadores del DMQ..... | 83 |
| Escenario 1: Sustitución gradual de (700 /año)..... | 83 |
| Escenario 2: Sustitución ambiciosa (1.400 /año)..... | 83 |
| Escenario 3: Sustitución integral reemplazo a un ritmo variable de 200 transformadores hasta el año 2044 | 889 |
| Costo del aceite dieléctrico..... | 93 |
| Conclusiones y recomendaciones..... | 98 |
| Lista de referencias..... | 101 |

Introducción

La creciente preocupación por el cambio climático ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles en diversos sectores industriales. La creciente evidencia científica ha resaltado las consecuencias devastadoras que este fenómeno global conlleva para nuestro planeta y la vida que lo habita. Como respuesta a esta problemática, se ha vuelto imperativo que la sociedad global adopte medidas decididas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y limitar el calentamiento global (Calvin et al. 2023). El presente trabajo se adentra en esta crucial misión, explorando un componente vital de nuestro sistema energético: los transformadores y, más específicamente, los aceites dieléctricos utilizados en su funcionamiento.

Los transformadores eléctricos desempeñan un papel crucial en la infraestructura eléctrica global, pero su operación conlleva la utilización de aceites dieléctricos basados en petróleo, que son altamente contaminantes y contribuyen significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero (Castaño 2013; Navas et al. 2012). Su estudio se inscribe en el marco de la llamada transición energética y su relevancia en la mitigación del cambio climático, con énfasis en la transformación de los sistemas energéticos. Todo ello se relaciona con los compromisos nacionales de reducción de gases de efecto invernadero (GEI), tanto a nivel de acuerdos internacionales como de políticas implementadas en Ecuador. Según la NDC Ecuador se ha comprometido a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores de energía, procesos industriales, agricultura y residuos en un 9% de manera incondicional para el año 2025 (Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2019).

El Ecuador mediante Decreto Ejecutivo nro. 371 en su artículo 1 ratificó el compromiso nacional de adoptar la Agenda 2030 como política pública para el desarrollo sostenible (EC 2018, art 1), con resolución Nro. R.E-SERCOP-2022-0130 de octubre de 2022, se expide la estrategia nacional de compras públicas sostenibles del Ecuador, la cual, se puede definir como el acto de las instituciones del Estado, en sus diferentes niveles, para adquirir productos y servicios en las condiciones más favorables para el bienestar ambiental, social y económico de la ciudadanía. Con ello al ser la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) un ente gubernamental deberá empezar a realizar una

transición a un eje que beneficie al ambiente, para dar cumplimiento a la normativa nacional vigente, se podría considerar al aceite de origen vegetal como una alternativa de sustitución progresiva al empleado aceite mineral, los cuales para su fabricación utilizan materia de composición catalogada como no contaminante.

Las ventajas potenciales de aceites dieléctricos de origen vegetal

El aceite dieléctrico mineral es un fluido ampliamente utilizado en la industria eléctrica como aislante en transformadores y equipos eléctricos de alta tensión. Su función principal es evitar la formación de arcos eléctricos y garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de estos dispositivos. Sin embargo, a medida que el mundo se enfoca cada vez más en abordar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, es esencial examinar las emisiones de CO₂ asociadas con la producción y el uso de este aceite dieléctrico mineral.

El reemplazo de los aceites de origen mineral por aceites de origen vegetal efectivamente puede proporcionar varios beneficios significativos, y uno de ellos es la reducción de la contaminación ambiental. Los aceites de origen vegetal suelen ser no tóxicos, lo que significa que se descomponen de manera natural en el medio ambiente. Esto reduce la posibilidad de contaminación del suelo y el agua en caso de fugas o derrames, en contraste con los aceites minerales, que pueden persistir en el entorno durante mucho tiempo. La producción de aceites vegetales suele tener unas emisiones de gases de efecto invernadero menor en comparación con los aceites minerales, que están vinculados a la extracción y procesamiento de petróleo crudo. El uso de aceites vegetales puede contribuir a una menor generación de gases de efecto invernadero durante su ciclo de vida (Díaz 2021).

Quito como caso de estudio

En el Plan de Acción de Cambio Climático de Quito (PACQ), se proyecta un aumento del 52% en las emisiones de GEI para el periodo 2015-2050.

Con una visión a largo plazo para el 2050, el PACQ presente a Quito como un territorio carbono neutral y resiliente ante los impactos actuales y futuros del cambio climático, con un enfoque en la responsabilidad intergeneracional, la inclusión y la participación activa de la ciudadanía.

Para avanzar hacia este nuevo modelo de ciudad, se plantean tres grandes objetivos en las políticas de cambio climático de Quito:

1. Desacelerar el crecimiento de la huella de carbono
2. Impulsar la resiliencia, reducir las condiciones de vulnerabilidad social mediante Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) y,
3. Asegurar el bienestar, la salud y la calidad de vida de la ciudadanía.

Metas generales de mitigación:

- Al 2023, reducir en 560 000 TM CO₂e (reducción total del 10% proyectado).
- Al 2030, reducir un 30% de las emisiones de GEI

En el informe especial del IPCC sobre el rol de las ciudades para alcanzar la meta global, se destaca la necesidad de reducir las emisiones de GEI, proyectadas para realizarse hasta el año 2050 (IPCC 2018). Entre estas acciones se incluye el reemplazo del 70% al 85% de la matriz energética tradicional de las ciudades por energías renovables. A continuación, se detalla la cantidad de emisiones que Quito planea reducir para el año 2050 (Distrito Metropolitano de Quito 2020).

Tabla 1
Reducción de emisiones de GEI por cada sector al 2050

| Estrategias | | | Impacto de la reducción de emisiones | | | Supuestos |
|-------------|---------|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|
| | | | 2030 | 2040 | 2050 | |
| 1 | Energía | Descarbonización de la red | 682 439 TM CO ₂ e | 797 046 TM CO ₂ e | 871 595 TM CO ₂ e | La red eléctrica nacional logra un 90% de fuentes libres de carbono para 2050 |

De acuerdo a la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, la Empresa Eléctrica Quito tiene un total de 1'189.631 clientes, convirtiéndola en la Empresa Eléctrica Distribuidora de energía más grande del país, por tal motivo, el presente estudio se efectuará en toda el área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito que representa 15.155,49 km², que comprende a las siguientes provincias y sus cantones: Pichincha: Quito, Rumiñahui, Mejía, Pedro Vicente Maldonado, San Miguel de los Bancos, parte de Puerto Quito y Cayambe. Napo: Quijos y El Chaco (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables 2020; Empresa Eléctrica Quito 2019).

Con base a los datos disponibles de la Empresa Eléctrica Quito sobre la cantidad de transformadores que posee, se estima que el volumen de aceite dieléctrico bordea los

5'263.310 litros de equipos con potencias que varían entre 5 y 2000 kva (Empresa Eléctrica Quito 2019).

El Municipio del Distrito Metropolitano de Quito publicó su Plan de Acción Climática (PACQ) para la ciudad, detallando las acciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Distrito Metropolitano de Quito 2020).

Según la base de datos de C40, en 2019 el distrito Metropolitano de Quito (DMQ) emitió un total de 5'170.579 toneladas de CO₂ equivalente (tCO_{2eq}) (Trujillo 2022). Esta cantidad representa el 12% de las emisiones del Ecuador.

Objetivo General de la tesis

En el presente trabajo, se quiere explorar el potencial que tendría el reemplazo de aceites dieléctricos de origen mineral por aceites dieléctricos de origen vegetal para la reducción de las emisiones de CO₂ de la ciudad de Quito. Por ello, su objetivo general consiste en evaluar el potencial de reducción que representa sustituir el aceite dieléctrico de origen mineral por un aceite vegetal en los transformadores de distribución eléctrica en términos de emisiones de GEI y su factibilidad de implementación del DMQ.

Objetivos específicos

- Identificar las etapas que conforman el ciclo de vida de los aceites dieléctricos de origen mineral y vegetal;
- Estimar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas a las diferentes etapas que conforman los ciclos de vida de los aceites dieléctricos de origen mineral y vegetal;
- Evaluar la reducción potencial en la emisión de GEI que podría representar la sustitución del aceite dieléctrico mineral por aceite dieléctrico vegetal en los transformadores del DMQ para el periodo 2024-2044.

Metodología

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología ampliamente utilizada en la evaluación ambiental que busca entender y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero completo de un producto, servicio o proceso a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. Esta metodología proporciona una visión holística de las interacciones entre un sistema y su entorno, permitiendo una toma de decisiones más informada y sostenible.

El ACV se basa en la recopilación y evaluación sistemática de los flujos de materiales, energía y residuos asociados con un producto o servicio. Comprende las siguientes fases:

Extracción y procesamiento de materias primas: Incluye la adquisición de los recursos necesarios para la fabricación del producto.

Producción: Se refiere al proceso de manufactura del bien o la prestación del servicio.

Distribución y transporte: Considera los impactos asociados con el transporte de los productos desde el lugar de producción hasta el consumidor.

Uso: Examina el uso del producto o servicio durante su vida útil.

Fin de vida: Analiza los impactos relacionados con la disposición final del producto, ya sea a través del reciclaje, la reutilización o la eliminación.

El ACV proporciona una visión integral de los impactos ambientales asociados con un bien o servicio. Los resultados típicos del ACV incluyen la evaluación de emisiones de CO₂ y otros gases que contribuyen al cambio climático.

El ACV permite cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero a largo de todo el ciclo de vida de un bien o servicio. Esto es crucial para entender y abordar el impacto climático de un producto desde la producción hasta su disposición final. El ACV también ayuda a identificar puntos críticos en el ciclo de vida donde se pueden implementar mejoras para reducir las emisiones.

En la presente investigación, la aplicación de la metodología de ACV consistió en identificar a partir de una revisión extensa de la literatura los pasos clave que conforman los procesos de extracción, producción, uso y desecho de los dos tipos de aceite dieléctrico. Luego, se produjo una estimación de las emisiones de GEI relacionadas con cada una de estas etapas, recurriendo nuevamente a la literatura técnica y académica relevante, adaptando el método a la distancia que separa a DMQ de los sitios de fabricación y de disposición de los aceites dieléctricos.

La estimación de la reducción de emisiones que se generarían en caso de realizar una transición hacia la nueva tecnología vegetal en lugar del aceite dieléctrico mineral implicó caracterizar el ritmo al cual se están reemplazando los transformadores eléctricos en el DMQ, lo cual implicó buscar en la base datos en la Web de la Empresa Eléctrica Quito, se identificó todos los equipos en funcionamiento con su respectivo año de fabricación, priorizando los que ya habían cumplido su vida útil y requieren el cambio. Esto permitió definir el periodo de 20 años partiendo del 2024-2044 como

ventana temporal de estudio relevante y una comparación directa de las implicaciones ambientales de ambas opciones (Castaño 2013; Meira et al. 2018).

Estructura de la tesis

La presente tesis se estructura en cinco capítulos. En el primer capítulo nos dedicamos a describir la problemática general asociada a las exigencias de encontrar nuevas tecnologías que apunten a una reducción de las emisiones de GEI. El segundo capítulo consiste en explicar cómo funciona un transformador en términos generales.

En el tercer capítulo se describe la metodología a seguir para poder realizar la estimación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Se detallan los procesos de producción de diferentes tipos de aceite dieléctrico y las emisiones asociadas a estos procesos. También se describen los métodos empleados para estimar las emisiones de GEI relacionadas con el uso de aceites dieléctricos, incluyendo la implementación del Análisis de Ciclo de Vida. Se menciona el uso del software BEE 4.0 y se establece la unidad de medición y ventana temporal considerada para el análisis.

En el capítulo cuarto se identifican y analizan las etapas del ciclo de vida de los aceites dieléctricos, tanto minerales como vegetales. Se detallan las etapas, como extracción, fabricación, transporte, uso en equipos eléctricos y disposición final, y se evalúa su potencial en términos de emisiones de CO₂. El capítulo compara las emisiones de GEI asociadas al ciclo de vida de estos aceites y aborda la incertidumbre en la estimación.

En el quinto capítulo se realizan los cálculos de estimaciones de emisiones de Gases de efecto invernadero que se pueden evitar por la transición de aceite dieléctrico mineral a vegetal con los distintos escenarios planteados.

Capítulo primero

Sistemas energéticos y mitigación del cambio climático

En este capítulo, orientaremos la reflexión hacia la identificación de acciones abordables por la sociedad en aras de mitigar el cambio climático. Asimismo, se examinarán las medidas de índole tanto individual como colectiva que pueden desempeñar un papel significativo en la contribución hacia la mitigación de este fenómeno.

La problemática general asociada a las exigencias de encontrar nuevas tecnologías que apunten a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) radica en varios desafíos.

En primer lugar, existe una necesidad urgente de encontrar alternativas viables y eficientes a los combustibles fósiles, que son una de las principales fuentes de emisiones de GEI. Si bien las energías renovables están en constante desarrollo y se están volviendo más accesibles, todavía hay desafíos técnicos y económicos que dificultan su implementación generalizada. La investigación y el desarrollo de tecnologías limpias, tanto en la generación de energía como en otros sectores emisores, aparecen fundamentales para abordar esta problemática.

A menudo, estas tecnologías limpias requieren una inversión inicial alta y pueden tener un tiempo prolongado para recuperar la inversión (IPCC 2011). Esto plantea desafíos para los países y las empresas que buscan adoptar estas soluciones, especialmente en economías emergentes o en desarrollo con recursos financieros limitados.

La adopción de nuevas tecnologías y cambios en los hábitos de consumo requieren cambios significativos en la infraestructura existente y en los comportamientos individuales. Esto puede generar resistencia o falta de apoyo por parte de ciertos sectores de la sociedad o de los actores políticos, lo que dificulta la implementación y adopción de las tecnologías necesarias para reducir las emisiones de GEI (Calvin et al. 2023).

La transición hacia tecnologías limpias no solo involucra un cambio en la infraestructura y en los patrones de consumo, sino también enfrenta resistencia y falta de respaldo por parte de diversos actores sociales y políticos.

La mitigación del cambio climático se convierte en un imperativo ineludible para salvaguardar el equilibrio ambiental global. A través de la colaboración entre gobiernos, sectores industriales y la sociedad en su conjunto, la adopción de tecnologías limpias y la transformación de los patrones de consumo pueden allanar el camino hacia un futuro más sostenible. La inversión en investigación y desarrollo, así como la implementación de políticas innovadoras, serán esenciales para superar los obstáculos y garantizar un progreso significativo hacia la reducción de las emisiones de GEI y la mitigación del cambio climático en su conjunto.

Problema del cambio climático en general e imperativo de la mitigación

La crisis del cambio climático se ha convertido en uno de los desafíos más urgentes y apremiantes que enfrenta nuestra sociedad (Gallach et al. 2019). El último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), ha confirmado que la actividad humana, especialmente la quema de combustibles fósiles y la liberación masiva de gases de efecto invernadero, es la principal causa del calentamiento global observado en las últimas décadas. Estos cambios sin precedentes en el sistema climático representan una amenaza significativa para la estabilidad y el equilibrio de nuestro planeta, se resalta la importancia crítica de tomar medidas inmediatas para mitigar los efectos del cambio climático.

De acuerdo al informe, si no logramos limitar el calentamiento global a 1.5°C por encima de los niveles preindustriales en las próximas décadas, enfrentaremos consecuencias devastadoras. Los ecosistemas estarán en peligro, los eventos climáticos extremos serán más frecuentes e intensos, la seguridad alimentaria se verá comprometida y millones de personas serán afectadas por el aumento del nivel del mar y la escasez de recursos naturales (Calvin et al. 2023).

La mitigación del cambio climático hace referencia al accionar para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el calentamiento global. Esto puede incluir la implementación de tecnologías limpias y la promoción de prácticas más sostenibles en la industria, el transporte y la agricultura.

Para ello una alternativa es aumentar el uso de energías renovables y mejorar la eficiencia energética, esto implica reducir el consumo de energía en edificios e industrias mediante la implementación de tecnologías más eficientes, como el aislamiento de edificios, la instalación de paneles solares y la adopción de tecnologías de energía renovable (MAE 2012).

Por otro lado, la adaptación al cambio climático hace referencia a las medidas a tomarse para enfrentar los impactos negativos del cambio climático que ya son inevitables, como el aumento del nivel del mar, las sequías y las inundaciones. Para lograr enfrentar los impactos en mención, se puede incluir la construcción de infraestructuras resistentes al clima, la promoción de prácticas agrícolas más resistentes al clima y la planificación del uso del suelo para reducir los riesgos asociados al cambio climático (Sánchez y Reyes 2015).

En definitiva, el cambio climático se erige como un imperativo global que exige respuestas contundentes y coordinadas. El informe del IPCC y la conciencia de que la actividad humana impulsa los cambios climáticos sin precedentes subrayan la urgencia de la mitigación y adaptación. La transición hacia energías limpias y la implementación de estrategias de resiliencia son ejes cruciales para enfrentar este desafío. La comunidad internacional, gobiernos, industrias y ciudadanos, deben colaborar en la adopción de medidas audaces que trasciendan fronteras y sectores, asegurando un legado de sostenibilidad para las generaciones futuras con compromisos claros para la reducción de emisiones de GEI.

Compromisos nacionales en términos de reducción de emisiones de GEI

Los compromisos nacionales en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se refieren a los objetivos de reducción de emisiones que los países se comprometen a alcanzar en el marco de acuerdos internacionales sobre el cambio climático, como el Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), firmado en 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Estos compromisos se establecen en base a las contribuciones nacionales determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) y son presentados periódicamente a la comunidad internacional para su evaluación y seguimiento (Uribe 2019).

Los compromisos nacionales representan la contribución de cada país a la lucha contra el cambio climático. Suelen incluir objetivos de reducción de emisiones en términos absolutos, objetivos de reducción de emisiones por unidad de producto o de energía, y objetivos relacionados con el uso de energías renovables y la eficiencia energética. El cumplimiento de estos compromisos requiere de la implementación de políticas y medidas específicas en cada país, y de una colaboración global efectiva para

alcanzar una reducción significativa de las emisiones de GEI y limitar el calentamiento global a niveles aceptables.

A nivel global, los compromisos más relevantes acerca de la reducción de GEI (gases de efecto invernadero) se encuentran en el Acuerdo de París, que fue firmado por 196 países en 2015, el Acuerdo establece objetivos a largo plazo como guía para todas las naciones detalladas a continuación:

- Limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 °C por encima de los niveles preindustriales y, si es posible, a 1.5 °C.
- Reducir las emisiones de GEI en un 40-70 % y alcanzar la neutralidad de carbono (cero emisiones netas) para 2050.
- Desarrollar y comunicar planes nacionales de adaptación al cambio climático.
- Movilizar recursos financieros para la mitigación y adaptación al cambio climático.
- Fortalecer la cooperación internacional para la mitigación y adaptación al cambio climático.

El Acuerdo de París realiza el seguimiento al cumplimiento de estos compromisos mediante un ciclo de revisión, conocido como balance global o *global stocktake*, que establece la necesidad de realizar una evaluación colectiva cada 5 años para analizar el estado de implementación del Acuerdo. Esto implica revisar el progreso hacia los objetivos a largo plazo, así como el cumplimiento de los compromisos asumidos por los países.

Este balance global se utiliza como base para informar a los países en la presentación de sus siguientes rondas de Contribuciones Determinadas Nacionalmente (NDC), que son los planes individuales de cada país para combatir el cambio climático.

En última instancia, los compromisos nacionales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) desempeñan un papel fundamental en la lucha global contra el cambio climático. Enraizados en el Acuerdo de París, estos compromisos representan la ambición de limitar el aumento de temperatura, alcanzar la neutralidad de carbono y fortalecer la cooperación internacional, refleja la urgencia de abordar esta problemática de manera concertada. A medida que los países trabajan en la implementación de políticas y medidas específicas para cumplir con sus objetivos, el ciclo de revisión y el balance global del Acuerdo de París sirven como herramientas

esenciales para garantizar la transparencia y la rendición de cuentas, dando énfasis en una transición energética.

Transición energética: el papel de los sistemas energéticos/eléctricos y su transformación en la mitigación del cambio climático

En el marco de los esfuerzos consentidos para alcanzar la neutralidad de carbono, compromiso que está relacionado de manera específica con el presente trabajo consta la llamada “transición energética”, misma que se puede entender como un proceso que busca cambiar el sistema actual de generación y consumo de energía.

La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, como las renovables, puede contribuir de manera sustancial a la mitigación del cambio climático. Según el informe de REN21 de 2021, en 2020, la capacidad de energía renovable instalada a nivel mundial alcanzó los 2.799 gigavatios (GW). Además, la Agencia Internacional de Energía (AIE) estima que, para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París, las inversiones en energías bajas en carbono, incluyendo las renovables, deberían superar los 3 billones de dólares anuales para 2030. Estas estadísticas respaldan la importancia de la transformación de los sistemas energéticos y eléctricos como un medio fundamental para abordar el cambio climático y avanzar hacia un futuro más sostenible.

Los sistemas energéticos y eléctricos están llamados a desempeñar un papel clave en la mitigación del cambio climático porque son una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente de dióxido de carbono (CO₂). Según el informe Emissions Gap Report 2022 del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero alcanzaron un récord de 59.1 gigatoneladas de CO₂ equivalente en 2019, uno de los culpables de esta situación es el transporte marítimo, un sector que es responsable de verter a la atmósfera algo más de 1.000 millones de toneladas de GEI cada año (concretamente, 1,076 Gt en 2018), lo que supone cerca del 3% de todas las emisiones de origen humano.

El informe Renewable Power Generation Costs in 2021 de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) destaca que los costos de generación de energía renovable han disminuido considerablemente en los últimos años. Por ejemplo, los costos de la energía solar fotovoltaica se han reducido en un 81% desde 2010, lo que ha contribuido a su mayor adopción.

Es así como la transición hacia sistemas energéticos y eléctricos más limpios y sostenibles aparece como esencial para reducir estas emisiones y limitar el calentamiento global (Uribe 2019).

En América del Sur, América Central y el Caribe, la capacidad de energías renovables aumentó un 5% entre el año 2019 y el 2020. En la región, la capacidad de producción de la hidroenergía representa más del 70% del total. No obstante, al igual que la tendencia mundial, la energía solar en la región es la que ha reflejado el mayor incremento entre 2019 y 2020, en que la tasa de crecimiento fue de un 36%, luego la energía eólica con un 18 %, la bioenergía con un 2 % y la energía hidroeléctrica con un 1 % (Podestá et al. 2022).

El análisis de la figura 1 correspondiente al año 2020 en la región de América Latina y el Caribe, revela que las fuentes de energía eólica, bioenergía y solar desempeñan un papel significativo en el panorama de las energías renovables en esa región. En particular, cada una de estas fuentes contribuye en torno al 10% de la capacidad total de energías renovables en dicha área. Esto indica que estas tecnologías han ganado tracción y han sido adoptadas con mayor prominencia en la región mencionada.

En un contexto más amplio, en comparación con las cifras globales, se observan diferencias notables. A nivel mundial, la bioenergía representa aproximadamente el 4 % de la capacidad total de energías renovables, mientras que las energías solar y eólica tienen un peso más sustancial, cada una aportando alrededor del 25 %. Estas diferencias pueden atribuirse a una combinación de factores, como las condiciones geográficas y climáticas específicas de cada región, las políticas de incentivo y regulación energética, así como las inversiones en investigación y desarrollo (Podestá et al. 2022).

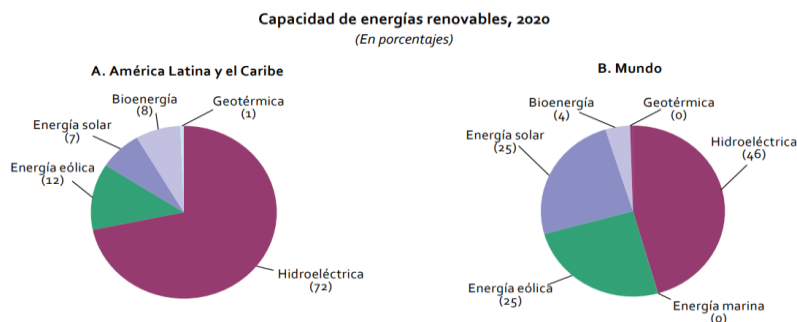


Figura 1. Capacidad de Energía Renovable

Fuente y elaboración propias sobre la base de IRENA (2021), Renewable Energy Statistics 2021, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Según el Banco de Desarrollo de América Latina la transición energética podría aportar de manera significativa a la mitigación del cambio climático de varias maneras. En primer lugar, se espera que ayude a reducir directamente las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la adopción de fuentes de energía más limpias y renovables, como la energía solar, eólica e hidroeléctrica.

En el caso de la energía hidroeléctrica, su contribución a la reducción de emisiones de CO₂ varía dependiendo del tamaño y tipo de la instalación. Según el IPCC (2011), las emisiones evitadas por la energía hidroeléctrica pueden oscilar entre 0.01 y 0.5 tCO₂/MWh, para el caso de energía solar fotovoltaica, su uso puede reducir las emisiones de CO₂ en promedio entre 0.2 y 0.5 toneladas por megavatio-hora (tCO₂/MWh), en cuanto a la energía eólica, diferentes investigaciones han encontrado que puede reducir las emisiones de CO₂ en promedio entre 0.4 y 0.8 tCO₂/MWh.

La transición energética puede fomentar el desarrollo de tecnologías y soluciones innovadoras que permitan la mitigación del cambio climático, como el almacenamiento de energía y la captura de carbono. Además de estas contribuciones directas, la transición energética también puede desencadenar una serie de beneficios indirectos, como la creación de empleos y el aumento de la resiliencia y la seguridad energética. Todos estos factores pueden ayudar a enfrentar y reducir al cambio climático de origen antrópico y a construir un futuro más sostenible.

El IPCC promueve la transición energética como una de las medidas clave para mitigar el cambio climático y promueve la implementación de tecnologías de energía renovable y la mejora de la eficiencia energética en todos los sectores de la economía, incluyendo la industria, el transporte y los edificios. También se enfatiza la necesidad de promover cambios en los patrones de consumo energético y fomentar la adopción de prácticas de consumo sostenible. En general, el IPCC promueve una transición energética justa y equitativa que tenga en cuenta las necesidades de desarrollo y acceso a energía de las comunidades más vulnerables (Calvin et al. 2023).

De acuerdo al Sexto Informe de Evaluación del IPCC, se promueve una serie de medidas para avanzar en la transición energética y mitigar el cambio climático. Algunas de estas medidas incluyen:

- Acelerar la adopción de energías renovables, como la solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica, y aumentar su capacidad instalada;
- Incrementar la eficiencia energética en todos los sectores, desde edificios e industrias hasta transporte y electrificación;

- Fomentar la innovación tecnológica para reducir los costos y mejorar la eficiencia de las tecnologías de energía renovable, como el almacenamiento de energía y la captura y almacenamiento de carbono;
- Promover la descentralización de los sistemas de energía, para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aumentar la resiliencia de los sistemas energéticos;
- Fomentar la cooperación internacional en materia de energía y clima, para compartir tecnologías, conocimientos y recursos y garantizar que los beneficios de la transición energética sean equitativos y sostenibles para todos.

Sin embargo, la dependencia actual de los combustibles fósiles y la influencia de los intereses de la industria del petróleo y gas podrían ser obstáculos significativos para una transición energética completa.

Europa se ha destacado como un líder en la transición energética, impulsando políticas ambiciosas y realizando inversiones significativas en energías renovables. Según el informe “Renewables 2021 Global Status Report” de REN21 (2021), Europa fue responsable de aproximadamente el 42 % de la capacidad renovable agregada a nivel mundial en 2020. Además, la Comisión Europea estableció el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono para 2050, lo que demuestra su compromiso con la transición hacia un sistema energético más sostenible.

En cuanto a Asia, es considerada como una región con un enorme potencial para la generación de energía renovable. Según el informe de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) “Renewable Capacity Statistics 2021”, Asia fue la región líder en términos de capacidad renovable instalada en 2020. Sin embargo, Asia también enfrenta desafíos significativos. El informe menciona que la infraestructura insuficiente, la falta de acceso a financiamiento y la capacidad técnica limitada pueden obstaculizar el desarrollo de energías renovables en la región.

En el caso de África, se reconoce su gran potencial para la generación de energía renovable, especialmente solar y eólica. Según el informe “Renewables 2021 Global Status Report” de REN21 (2021), África tuvo un aumento significativo en la capacidad de energía renovable en 2020. Sin embargo, la falta de infraestructura adecuada, la pobreza generalizada y la inestabilidad política representan desafíos importantes para la transición energética en la región.

Además, la dependencia actual de los combustibles fósiles y la rápida industrialización de la región podrían ser obstáculos significativos para una transición energética completa. África, por su parte, tiene un gran potencial para la generación de energía renovable, especialmente solar y eólica. Sin embargo, la falta de infraestructura, la pobreza y la inestabilidad política son obstáculos importantes para la transición energética en la región (Reinoso 2023; Cubillos y Estenssoro 2011).

Contribución de los sistemas energéticos a la mitigación del cambio climático. Herramientas de evaluación de estrategias de mitigación

Existen varias herramientas y enfoques disponibles para evaluar y reducir la contribución de los sistemas energéticos a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). De los cuales uno que se emplea son los inventarios de emisiones, que son herramientas que permiten cuantificar y rastrear las emisiones de GEI producidas por los sistemas energéticos. Estos inventarios son fundamentales para comprender el alcance y la magnitud de las emisiones, identificar las fuentes principales y monitorear los progresos en la reducción de las mismas.

La evaluación del ciclo de vida (ACV), es una metodología que analiza las emisiones y los impactos ambientales asociados con un producto o sistema durante todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. En el caso de los sistemas energéticos, el ACV puede ayudar a identificar las etapas del ciclo de vida con mayores emisiones y orientar las acciones de mitigación hacia esas áreas.

Estas herramientas y enfoques son complementarios y se utilizan en conjunto para evaluar las emisiones de GEI en los sistemas energéticos, identificar oportunidades de reducción y orientar las acciones de mitigación. Su aplicación efectiva requiere la colaboración entre diferentes actores, incluyendo gobiernos, empresas, instituciones de investigación y la sociedad civil, para lograr una transición energética sostenible y de bajas emisiones de carbono.

El análisis de ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una herramienta que se utiliza para evaluar el impacto ambiental potencial de un producto, servicio o proceso a lo largo de su ciclo de vida completo, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los residuos.

El ACV se basa en la recopilación y evaluación de información detallada sobre todas las etapas del ciclo de vida de un producto, incluyendo la extracción de materias primas, la producción, el transporte, el uso y la eliminación. Esta información se utiliza para identificar los impactos ambientales de cada etapa del ciclo de vida, tales como emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de energía, uso del agua y generación de residuos (Leiva 2016).

Una vez que se ha evaluado el impacto ambiental de cada etapa del ciclo de vida, se pueden identificar oportunidades para reducir el impacto ambiental total a través de mejoras en el diseño del producto, la selección de materiales, la reducción del consumo de energía y otros cambios en el proceso de producción.

El ACV se lleva a cabo en cuatro etapas principales:

1. *Definición del objetivo y alcance:* Se determinan los límites del análisis, incluyendo qué etapas del ciclo de vida se considerarán y qué impactos ambientales serán evaluados.
2. *Análisis de inventario:* Se recopila información detallada sobre los flujos de materiales, energía y emisiones asociados con el producto o proceso en estudio. Esto implica la evaluación de la extracción de materias primas, la producción, el transporte, el uso y el fin de vida.
3. *Evaluación de impacto:* Se calculan y evalúan los impactos ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de residuos, la degradación del suelo, entre otros. Estos impactos se ponderan y se presentan en términos cuantitativos.
4. *Interpretación:* Los resultados se interpretan y se analizan en función de los objetivos y el alcance definidos al comienzo del estudio. Se pueden identificar puntos críticos, áreas de mejora y alternativas más sostenibles (Leiva 2016).

En el contexto de la generación eléctrica, la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) desempeña un papel crucial para proporcionar una comprensión profunda y precisa de las implicaciones ambientales de diferentes fuentes de energía. Esta metodología permite evaluar no solo los aspectos directos de la generación eléctrica, sino también los impactos indirectos a lo largo de todo el ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los productos.

La aplicación del ACV en la generación eléctrica permite tomar decisiones informadas en la selección de tecnologías de generación más sostenibles. Estas

decisiones pueden basarse en datos objetivos sobre la huella ambiental total de cada fuente de energía, teniendo en cuenta sus impactos directos e indirectos. Además, el ACV también puede identificar áreas clave para la mejora y la optimización de tecnologías existentes, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la mitigación del uso de recursos escasos y la minimización de la generación de residuos (Cortines 2017).

En el ámbito de las políticas energéticas, el uso del ACV proporciona una base sólida para formular estrategias que aborden el cambio climático y promuevan la sostenibilidad. Al comprender las diferencias en los impactos ambientales entre las tecnologías de generación, los responsables de la toma de decisiones pueden establecer objetivos y regulaciones que fomenten la adopción de fuentes de energía más limpias y eficientes. Además, el ACV puede guiar la inversión en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia y reducir los impactos ambientales de las tecnologías existentes y emergentes (Cortines 2017).

La aplicación del ACV en la generación eléctrica brinda una perspectiva completa y basada en evidencia sobre los impactos ambientales de diversas fuentes de energía. Esto no solo ayuda a tomar decisiones informadas en la selección de tecnologías más sostenibles, sino que también proporciona un marco sólido para la formulación de políticas y estrategias energéticas que contribuyan a la mitigación del cambio climático y la preservación del medio ambiente.

Problemática del aceite dieléctrico en Latinoamérica

El sector eléctrico juega un papel importante en las emisiones de gases de efecto invernadero, con una porción notable atribuida a los transformadores. Los transformadores son componentes cruciales en la red eléctrica que facilitan la transmisión y distribución de electricidad. Si bien los transformadores mismos no emiten gases de efecto invernadero directamente, su operación es integral para el funcionamiento del sector eléctrico, que es un gran contribuyente a las emisiones. En el contexto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, las iniciativas que se enfocan en mejorar la eficiencia de los transformadores y la red eléctrica en su conjunto pueden tener un impacto sustancial. Actualizar a transformadores más eficientes energéticamente, implementar tecnologías de redes inteligentes y mejorar la eficiencia general de la red son estrategias clave para mitigar las emisiones asociadas con el sector eléctrico, incluidas las vinculadas indirectamente a los transformadores. Por lo tanto, si

bien los transformadores no emiten gases de efecto invernadero directamente, su papel en las emisiones generales del sector eléctrico es significativo. Mejorar la eficiencia de los transformadores y modernizar la red eléctrica son pasos cruciales para reducir el impacto ambiental de la industria energética y combatir el cambio climático.

En Latinoamérica han ocurrido varios accidentes por sobre carga de transformadores que han provocado incendios, entre los cuales se destacan: explosión en Subestación de Edomex, México (2019), causa: Sobrecarga en un transformador, consecuencias: Explosión, incendio, cortes de energía para miles de residentes.

Incendio en Subestación de Copiapó, Chile (2017), causa: Sobrecarga en un transformador, consecuencias: Incendio, interrupciones en el suministro eléctrico en la región. Explosión en Subestación de Bogotá, Colombia (2015). Explosión en Subestación de San Lorenzo, Paraguay (2019), causa: Sobrecarga en un transformador, consecuencias: Explosión, incendio, apagón generalizado, daños significativos a la subestación. La mayoría de estos incidentes se debieron a sobrecargas en los transformadores, lo que llevó a explosiones e incendios. Los efectos típicos incluyen cortes de energía, daños materiales significativos, y en algunos casos, evacuaciones de las áreas cercanas. Estos accidentes subrayan la importancia de realizar un mantenimiento adecuado, implementar sistemas de monitoreo en tiempo real, y actualizar la infraestructura eléctrica para manejar cargas crecientes y prevenir fallos catastróficos. La implementación de medidas preventivas y de modernización puede ayudar a reducir el riesgo de futuros accidentes y mejorar la fiabilidad del suministro eléctrico en América Latina. Una alternativa para prevenir este tipo de accidentes es utilizar un aceite dieléctrico con un mayor punto de inflamación.

Cambio climático, mitigación y energía en el Ecuador

Durante los últimos diez años Ecuador ha experimentado diversas afectaciones debido al cambio climático, que han afectado tanto su economía como su población y su medio ambiente. Entre estas afectaciones se incluyen:

- Incremento de la frecuencia y la intensidad de eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas, inundaciones, deslizamientos de tierra y eventos climáticos cíclicos como El Niño y La Niña. Estos eventos han afectado la producción de alimentos, la infraestructura y las viviendas de las comunidades, así como la salud y la seguridad de la población (Abigail et al. 2020).

- El derretimiento acelerado de los glaciares andinos, lo que ha reducido el suministro de agua dulce en las cuencas hidrográficas del país y ha afectado a las comunidades que dependen de estos recursos para su subsistencia (INAMHI 2018).
- El aumento del nivel del mar, lo que ha afectado a las comunidades costeras y las zonas bajas del país, provocando la erosión de las playas y la intrusión de agua salada en las tierras cultivables y los sistemas de agua dulce (SENAGUA 2019).
- La pérdida de biodiversidad y los impactos en los ecosistemas naturales, como la degradación de los suelos, la deforestación y la pérdida de hábitats naturales, lo que ha afectado la resiliencia de los ecosistemas y su capacidad para prestar servicios esenciales, como la regulación del clima y la provisión de agua y alimentos (MAE 2017).

Es por esto que, a nivel de Ecuador se ha establecido la Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador (ENCC) (MAE 2012), en la que el país se ha comprometido a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 25% para el año 2025 en comparación con los niveles de emisión de 2010. Este compromiso se enmarca dentro de los objetivos del Acuerdo de París sobre cambio climático, y forma parte de la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés) que presentó el país en 2015.

Para alcanzar este objetivo, los autores de la ENCC han identificado varias medidas que incluyen:

- Promover la eficiencia energética en el sector industrial y de transporte, mediante la adopción de tecnologías más limpias y la implementación de políticas de transporte sostenible, según el Informe de Estadísticas Energéticas del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables de Ecuador, se estima que la implementación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial podría lograr ahorros de energía de hasta el 20 %;
- Incrementar la producción de energía renovable, especialmente en el sector hidroeléctrico, según el Informe de Estadísticas Energéticas de Ecuador, la capacidad instalada de energía hidroeléctrica en el país alcanzó aproximadamente 5.800 MW en 2020, lo que representa una importante

contribución a la generación de energía limpia y a la reducción de emisiones;

- Reducir la deforestación y promover la reforestación y restauración de ecosistemas, a través de programas de manejo forestal sostenible y de conservación de la biodiversidad, según el Sistema de Monitoreo de Bosques de la Dirección Nacional Forestal de Ecuador, entre 2010 y 2020 se registró una disminución anual promedio de la deforestación en el país de alrededor del 0,2 %, en cuanto a la reforestación y restauración de ecosistemas, el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica ha establecido metas para la restauración de áreas degradadas y la promoción de la conservación de la biodiversidad, aunque no se disponen de cifras específicas sobre la superficie reforestada o restaurada.
- Fortalecer la gestión integral de residuos sólidos urbanos y la disposición final de residuos, para reducir las emisiones de metano, según el Informe Nacional de Residuos Sólidos de Ecuador, se estima que la implementación de buenas prácticas de gestión de residuos sólidos urbanos podría reducir las emisiones de metano en alrededor de 1,5 millones de toneladas de CO₂ equivalente al año;
- Promover la agricultura sostenible, la ganadería de bajo carbono y el manejo sostenible del suelo, a través de prácticas agrícolas más eficientes y la adopción de tecnologías limpias, no se dispone de cifras específicas sobre la contribución de la agricultura sostenible y el manejo sostenible del suelo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en Ecuador. Sin embargo, se reconoce el potencial de estas medidas para mitigar las emisiones relacionadas con la agricultura y la ganadería.

A nivel global, la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por Ecuador es muy pequeña en comparación con otros países. Las emisiones en Ecuador son causadas principalmente por cinco sectores: el sector energético, que representa el 46,63 % de las emisiones totales; el uso del suelo, cambio del uso del suelo y silvicultura, que representa el 25,35 %; la agricultura, que representa el 18,17 %; los procesos industriales, que representan el 5,67%; y los residuos, que representan el 4,19 %. Pese al carácter marginal de sus emisiones, Ecuador ha tomado acción en los sectores de energía, agricultura, industria y uso del suelo (MAE 2012).

Los impactos del cambio climático han dejado huellas significativas en Ecuador a lo largo de la última década, afectando a su economía, población y entorno natural. Los eventos climáticos extremos, la pérdida de glaciares andinos, el aumento del nivel del mar y la degradación de ecosistemas han generado desafíos complejos y urgentes. Ante esta realidad, la Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador ha trazado una ruta hacia la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, alineada con los compromisos internacionales del Acuerdo de París. Las medidas propuestas abarcan desde la eficiencia energética y la expansión de energías renovables hasta la gestión de residuos y prácticas agrícolas sostenibles. Aunque las emisiones del país son relativamente pequeñas a nivel global, Ecuador reconoce la importancia de su contribución en la lucha climática y ha asumido un rol activo en la implementación de soluciones que abordan tanto sus vulnerabilidades locales como su responsabilidad global.

Capítulo segundo

Transformadores y aceites dieléctrico

En este capítulo, exploraremos un aspecto fundamental en la infraestructura eléctrica: los transformadores y los aceites dieléctricos que desempeñan un papel crucial en su funcionamiento. Los transformadores son dispositivos esenciales para la transmisión y distribución de energía eléctrica, mientras que los aceites dieléctricos actúan como aislantes y refrigerantes en su interior. Sin embargo, a medida que avanzamos en la era de la sostenibilidad y la eficiencia energética, surgen desafíos significativos en torno a su operación y su impacto ambiental.

En el desarrollo de este capítulo, primero examinaremos el papel esencial que desempeñan los transformadores en la transmisión y distribución eficiente de electricidad, destacando su relevancia en la infraestructura energética. Luego, exploraremos la composición y las propiedades de los aceites dieléctricos utilizados en los transformadores, considerando su función como aislantes y la necesidad de su adecuado manejo. Además, nos adentraremos en los desafíos ambientales asociados con el uso de aceites dieléctricos.

A medida que avanzamos en este capítulo, nos centraremos en los avances y las estrategias actuales para abordar estos desafíos. Investigaremos cómo las nuevas tecnologías y prácticas están permitiendo una mayor eficiencia en los transformadores y el uso de aceites dieléctricos más sostenibles.

1. Características generales de los transformadores

Los transformadores son dispositivos fundamentales en el ámbito de la ingeniería eléctrica, desempeñando un papel crucial en la transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica. Estos equipos permiten modificar los niveles de voltaje y corriente de manera eficiente, lo que resulta esencial para adaptar la electricidad a las necesidades específicas de diferentes sistemas eléctricos y dispositivos.

Las características generales de los transformadores son esenciales para comprender cómo funcionan y cómo contribuyen al funcionamiento confiable y eficiente de los sistemas eléctricos en todo el mundo. Estos dispositivos constan de

varias partes y componentes que trabajan en conjunto para transformar la energía eléctrica de una manera precisa y controlada.

En su forma más básica, un transformador consiste en dos bobinas de alambre enrolladas alrededor de un núcleo magnético. Estas bobinas se conocen como “devanados” y están compuestas por diferentes números de vueltas de alambre. Un devanado, llamado “primario”, se conecta a la fuente de energía eléctrica original, mientras que el otro devanado, conocido como “secundario”, proporciona la energía transformada a la carga o dispositivo (Chapman 2012). Los transformadores son componentes esenciales en la infraestructura eléctrica moderna, permitiendo la distribución eficiente de energía eléctrica a lo largo de distancias largas y adaptando los niveles de tensión y corriente para cumplir con los requerimientos específicos de los sistemas eléctricos y los dispositivos conectados. Su diseño y características son fundamentales para asegurar la confiabilidad y el funcionamiento adecuado de las redes eléctricas en todo el mundo.

2. Principio de funcionamiento

Un transformador es un dispositivo que transforma la potencia eléctrica alterna de un nivel de voltaje a otro de la misma frecuencia, de este modo no se ve afectada la potencia que se suministra mediante la acción de un campo magnético. Los transformadores son utilizados en sistemas eléctricos de transmisión y distribución eléctrica, en otras palabras, el transformador convierte energía eléctrica a un nivel de voltaje a energía eléctrica a otro nivel de voltaje (Chapman 2012).

Los transformadores constan de dos a más bobinas de alambre conductor enrollado alrededor del núcleo, el devanado por donde entra energía al transformador se denomina primario N_1 y el devanado por donde sale energía hacia las cargas N_2 que son alimentadas por el transformador se denomina secundario o de salida, el devanado primario es representado por N_1 y el secundario por N_2 (ver Figura 2) (Chapman 2012; Rodríguez 2012)

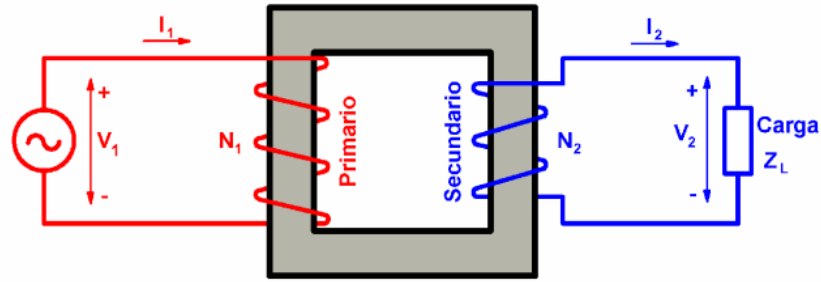


Figura 2. Principio de funcionamiento de un transformador

3. Clasificación de transformadores

La clasificación de los transformadores es esencial para comprender la diversidad de estos dispositivos y cómo se adaptan a diferentes aplicaciones en la ingeniería eléctrica. Los transformadores son elementos fundamentales en la transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, y su variedad de tipos y categorías se origina en la necesidad de ajustar y transformar la energía de manera precisa y eficiente. Desde aplicaciones industriales de alta potencia hasta dispositivos más pequeños utilizados en electrónica, la clasificación de los transformadores nos proporciona una visión integral de cómo estos componentes contribuyen al funcionamiento confiable de sistemas eléctricos en una amplia gama de contextos.

Los transformadores se pueden clasificar en función de sus características y aplicaciones. Estas clasificaciones incluyen transformadores de potencia, instrumentación, de corriente, de aislamiento, de alto voltaje, de distribución, de control y audio etc. Según (Aquino y Zuñiga 2018) los transformadores de distribución se clasifican de la siguiente forma (ver Figura 6):

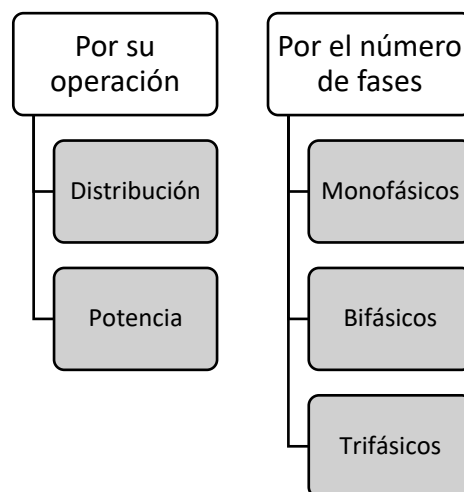


Figura 3. Clasificación de transformadores de distribución

4. El aceite dieléctrico: aislante eléctrico y térmico

Un aceite dieléctrico es un tipo de fluido aislante que se utiliza en equipos eléctricos y electrónicos, como transformadores, interruptores, condensadores, con el propósito principal de actuar como aislante eléctrico y transferir el calor generado por la operación de estos dispositivos. Su nombre deriva del término “dieléctrico”, que se refiere a materiales no conductores de electricidad (Calderón et al. 2020).

Los aceites dieléctricos poseen propiedades eléctricas y térmicas específicas que los hacen adecuados para su uso en equipos que operan con altas tensiones y corrientes. Estos aceites tienen una alta resistividad eléctrica, lo que significa que no permiten el flujo de corriente eléctrica a través de ellos. Esto es esencial para prevenir cortocircuitos y pérdida de energía en sistemas eléctricos complejos (Pérez y López 2018).

Además de su propiedad aislante, los aceites dieléctricos también tienen la capacidad de disipar el calor generado por la operación de los dispositivos eléctricos. Esto ayuda a mantener una temperatura adecuada en el interior de los equipos, evitando sobrecalentamientos que podrían dañar los componentes (Pérez y López, 2018).

Los aceites dieléctricos están diseñados para ser estables a altas temperaturas y proporcionar una excelente resistencia al envejecimiento y la degradación. También deben tener una baja viscosidad para facilitar la transferencia de calor y permitir un buen aislamiento en espacios reducidos (Calderón et al. 2020).

Sin embargo, es importante destacar que el uso de aceites dieléctricos puede plantear desafíos ambientales debido a su posible impacto en caso de fugas o derrames. Por esta razón, la selección y el manejo adecuado de estos aceites son aspectos críticos en la industria eléctrica para garantizar un rendimiento seguro y sostenible de los equipos.

Los transformadores requieren aceites aislantes para permitir una transmisión eficiente de energía eléctrica entre las bobinas o devanados (ver Figura 11).

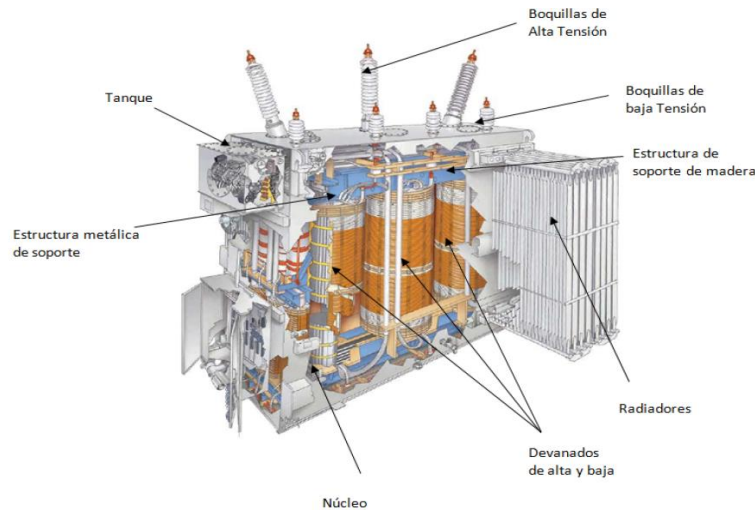


Figura 4. Constitución de un Transformador

En un transformador, el aceite dieléctrico debe poseer una excelente estabilidad térmica, para esto se requiere un aceite de baja viscosidad cuidadosamente refinado, formando una película química inerte y de naturaleza apolar que proteja las partes metálicas de los materiales presentes en el transformador (Calderón et al. 2020).

Los aceites dieléctricos proporcionan una capa térmicamente aislante que protege los devanados del calor, la humedad y los elementos externos. Por otra parte, reduce la resistencia eléctrica entre los devanados, lo que permite un alto nivel de eficiencia en la transferencia energética. Los aceites aislantes también ayudan a reducir la pérdida de energía por radiación electromagnética además de proporcionar un medio de enfriamiento para los devanados, lo que ayuda a aumentar la vida útil del transformador (Pérez y López, 2018).

Los aceites dieléctricos desempeñan un papel crítico en la operación segura y eficiente de equipos eléctricos y electrónicos, como transformadores. Actúan como aislantes eléctricos, permitiendo la transmisión de energía sin cortocircuitos, y también como medios de transferencia de calor, evitando el sobrecalentamiento de los dispositivos. La elección y el manejo adecuado de estos aceites son esenciales para mantener la integridad de los equipos y garantizar su durabilidad. Aunque proporcionan numerosos beneficios, es crucial abordar sus posibles impactos ambientales y tomar medidas para mitigar cualquier riesgo potencial.

5. Propiedades del aceite dieléctrico mineral

El aceite dieléctrico mineral funciona como aislante debido a que es un medio de lubricación y enfriamiento para un correcto funcionamiento de los transformadores, los aceites minerales han variado muy poco su estructura química a los largo de los años ya que por su característica dieléctrica, que quiere decir que funciona como aislante, debido a su baja conductividad eléctrica y propiedades físico químicas, permite el buen funcionamiento del transformador, además es un material que es compatible con los componentes eléctricos y de bajo costo, lo que favorece su uso frente a otros materiales sintéticos (Sanz 2017).

Las características que un aislante ideal debería tener son:

- Elevada rigidez dieléctrica.
- Bajo factor de pérdida dieléctrica.
- Alta resistividad volumétrica.
- Elevado calor específico.
- Excelente estabilidad termo-oxidativa.
- Buenas propiedades de absorción de gases.
- Fluencia a baja temperatura.
- Baja viscosidad.
- Buenas propiedades de extinción de arcos.
- Alta temperatura de inflamabilidad.
- Bajo precio.

Permitividad

La permitividad es una medida de la capacidad de un material para permitir el paso de una corriente eléctrica. En general, la permitividad en aceites dieléctricos se refiere a la capacidad del aceite para permitir el paso de una corriente eléctrica a través de él. Esto se debe a que los aceites dieléctricos están compuestos de moléculas muy pequeñas, que permiten una gran cantidad de movimiento de carga a través de ellos. Esta permitividad es importante para las aplicaciones eléctricas como es el caso de los transformadores, motores y aisladores eléctricos. Debido a que, los aceites minerales son no polares y contienen pocas moléculas con momentos dieléctricos, su permitividad es baja (Ceballos y García 2013).

Conductividad

La conductividad en los aceites dieléctricos se refiere a la capacidad del líquido para conducir la electricidad. Esto se debe a la presencia de partículas cargadas, como iones, en el medio. Estas partículas cargadas se mueven cuando se aplica un campo eléctrico, lo que permite que la corriente fluya a través del líquido. La importancia de la conductividad recae en la protección de equipos eléctricos pues, reduce el riesgo de incendio o descarga eléctrica.

Los niveles de conductividad en C.D. (Corriente directa) y el factor de disipación en C.A. (corriente alterna), se asemejan con valores de $10-15 \Omega^{-1} * \text{cm}^{-1}$ en aceites nuevos y $10-12 \Omega^{-1} * \text{cm}^{-1}$ para aceites usados contaminados, en C.D.; para el caso de valores en C.A., se tiene $10-13 \Omega^{-1} * \text{cm}^{-1}$, correspondiendo a tangente del ángulo δ de 0.008 (Ceballos y García 2013).

Resistencia dieléctrica de aceites minerales

La resistencia dieléctrica en aceites minerales es una propiedad que se refiere a la capacidad de un material para resistir la propagación de una corriente eléctrica. Esta propiedad es fundamental para el aislamiento eléctrico. Los aceites minerales, como lubricantes, se usan para aislar y proteger los cables y otros componentes eléctricos de los efectos dañinos de las corrientes eléctricas. Estos aceites son compuestos orgánicos complejos formados por hidrocarburos saturados y alifáticos. La resistencia dieléctrica de los aceites aumenta con el aumento de la temperatura. Para los aceites minerales, y mayoría de líquidos aislantes, la resistencia dieléctrica varía con el estado de pureza de la muestra y con respecto a la materia y humedad.

Resistividad volumétrica

La resistividad volumétrica se define como la resistencia eléctrica encontrada cuando se aplica un potencial eléctrico entre las caras opuestas de un cubo. Se mide en Ohm.cm (Sanz 2017). Bajo condiciones de baja densidad de carga (< 500 V/mm) la resistividad de los aceites depende fundamentalmente de la medida en que puedan disociarse y formar iones.

Los contaminantes tales como agua, ácidos y materiales sólidos de carácter polar son la causa habitual de una baja resistividad (Sanz 2017).

Esta propiedad, además de la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas o Tang δ y la constante dieléctrica ϵ , juntas o por separado son importantes indicadores de la calidad intrínseca y del grado de contaminación o envejecimiento del líquido aislante. La tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas es la relación entre la parte reactiva y la parte resistiva de la impedancia de un conductor a una frecuencia dada. Esta relación se representa como $\tan(\delta)$, donde δ es el ángulo de pérdidas dieléctricas. Pueden utilizarse por tanto para interpretar la desviación de las características dieléctricas deseadas e influencia sobre el comportamiento del equipo (Sanz 2017).

Constante dieléctrica

La permitividad relativa, también llamada constante dieléctrica (ϵ) de un material aislante es la relación entre la capacidad C de un condensador en el que el espacio entre electrodos está ocupado por un material dieléctrico, a la capacidad de este en la que el espacio entre electrodos está el vacío, C0.

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} \quad (\text{ecuación 1})$$

La constante dieléctrica (ϵ) en transformadores de distribución es una medida de la resistencia eléctrica de un material al paso de la corriente eléctrica. Esta constante también es conocida como un factor de pérdidas dieléctricas además de medir mediante el cociente entre la energía absorbida por el material y la energía suministrada. Una constante dieléctrica alta indica que el material tiene una buena resistencia a la corriente eléctrica.

En las aplicaciones dieléctricas una buena constante dieléctrica depende de la constante dieléctrica, así como una bajo presión es el vacío, ya que no existe pérdida de energía debido a la ausencia de moléculas que pudieran ser polarizadas, mientras que, en los dieléctricos, el momento dipolar puede ser un factor de mayor o menor

importancia según su naturaleza. La constante dieléctrica será por tanto una medida de la ineficiencia del material como dieléctrico. Por tanto, cuanto menor sea su valor, mejores serán sus prestaciones como aislante (Ceballos y García 2013).

Tangente delta (δ)

La tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas es una medida de atenuación que se produce en un material a medida que se propaga a través de él. Esta medida se representa como la relación entre la potencia absorbida por el material y la potencia incidente en el material. El ángulo de pérdidas dieléctricas se define como el ángulo en el que la potencia absorbida es igual a la potencia incidente. Esta medida se expresa como el cociente entre la potencia absorbida y la potencia incidente y se representa como la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas (Granero 2017).

Cuando se aplica un voltaje alterno a un condensador, el dieléctrico queda sometido a tensiones y desplazamientos periódicos. Si el material fuera perfectamente elástico, no habría pérdida de energía, ya que la energía almacenada durante los períodos de aumento de la tensión sería cedida al circuito cuando esta disminuyese.

Sin embargo, la elasticidad eléctrica de los dieléctricos sólidos y líquidos no es perfecta, por lo que el voltaje aplicado debe vencer fricciones moleculares además de las fuerzas elásticas. Este trabajo de fricción se transforma en calor y representa una pérdida de energía utilizable (Pérez y López 2018).

La fricción propia de las moléculas del dieléctrico no es la única causa de pérdida de energía en un condensador. Además de esta, están las fricciones de los iones asociados, que intentan orientarse bajo la acción del campo eléctrico alternante, y la principal de todas, la producida por las corrientes de conducción de un electrodo a otro. Esta última se ve profundamente afectada por la humedad y la temperatura (Sanz 2017)

Cuando estas pérdidas de energía no son excesivas, la elevación de temperatura del dieléctrico es moderada (del orden de 3 a 5 °C), lo que está dentro de la zona de seguridad del aparato eléctrico; pero si estas pérdidas se elevan, la temperatura interna puede subir hasta 50 °C, con lo que se favorecen modificaciones en el dieléctrico que pueden llevar a fallos prematuros del condensador. Por eso, la medida de esta energía o el cambio de alguna magnitud con ella relacionada se usan actualmente para determinar el deterioro debido a la humedad, materiales extraños, envejecimiento en los dieléctricos y daños mecánicos del aparato. También se usa para anticipar fallos en servicio de ambos (Pérez y López 2018).

Normalmente es costumbre expresar las pérdidas en un condensador por su factor de potencia. En un circuito eléctrico, el factor de potencia viene dado por la razón entre la energía actual del circuito en Watios y la energía aparente (producto de voltios por amperios del mismo). Considerando el caso particular de un voltaje sinusoidal aplicado a un condensador perfecto, las ondas de la intensidad de corriente de carga llevan a las de voltaje una diferencia de fase de 90° , es decir, que la intensidad de corriente está en un máximo cuando el voltaje es cero y este desplazamiento de fase entre voltaje e intensidad permanece constante mientras no haya ninguna influencia externa sobre el circuito.

Representando estas magnitudes sobre un diagrama vector, obtenemos la siguiente figura

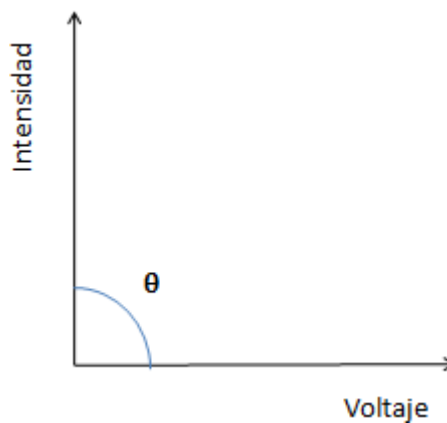


Figura 5. Representación vector intensidad frente a vector voltaje
Fuente: Sanz 2017

Un condensador perfecto tiene un consumo de energía igual a cero y por lo tanto no hay pérdidas de energía; de aquí se deduce que factor de potencia es cero. En la práctica, a causa de que los dieléctricos son imperfectos, una cantidad de energía relativamente pequeña se disipa en el condensador y el ángulo de fase θ entre ambos vectores se hace inferior a 90° y el factor de potencia será igual a $\cos \theta$ se puede ver en la figura:

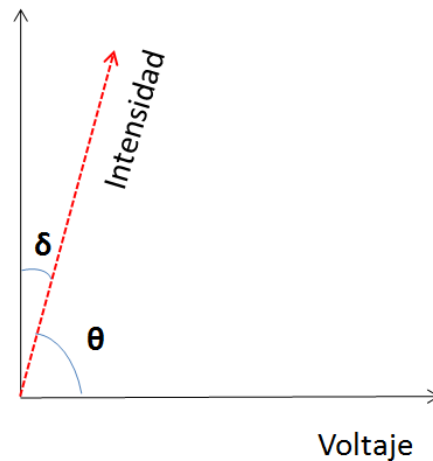


Figura 6. Representación vectores intensidad y voltaje en dieléctricos reales
Fuente: Sanz 2017

Si consideramos el ángulo δ , denominado “ángulo de pérdidas dieléctricas”, tenemos que:

$$\delta = 90 - \theta \quad \text{Cos } \theta = \text{Sin } \delta \quad (\text{ecuación 2})$$

Para valores del factor de potencia ($\theta < 0,05$), se tiene que:

$$\text{Sin } \delta = \text{tg } \delta \quad (\text{ecuación 3})$$

Siendo las unidades de δ en radianes. El nombre dado a $\text{tg } \delta$ es el de “factor de disipación” para evitar confusión de ideas con el factor de potencia al que se considera usualmente con valores próximos a la unidad. Si representamos un condensador con una capacitancia C (Faradios) en serie con una resistencia R y se aplica un voltaje sinusoidal de frecuencia f , el factor de disipación viene dado por la fórmula:

$$D = \text{tg } \delta = 2\pi fCR.$$

La pérdida de energía para un voltaje E viene dado por:

$$P = nfCE^2 \text{sin } \delta^2 \quad (\text{ecuación 4})$$

Si δ es pequeño, como es usual para aceites de transformador, $P = 2nfCE^2 \text{tg } \delta$, es decir:

$$P = wCE^2D$$

Donde D es el factor de disipación, C es la capacitancia, E es el voltaje, P es la pérdida de energía y w es la frecuencia.

De este análisis se desprende que la energía disipada en el dieléctrico guarda una relación directa con el ángulo de pérdidas dieléctricas, y además de aumentar los costos operativos del equipo, se manifiesta como una pérdida adicional de calor. Un factor determinante es el factor de disipación o el ángulo de pérdidas dieléctricas: su elevación puede ocasionar un incremento en la temperatura, lo cual reduciría la estabilidad del

dieléctrico. Aspectos como el tamaño molecular, la composición química, la orientación específica y la configuración electrónica también influyen en $\text{tg } \delta$. Sin embargo, a altas frecuencias y temperaturas suficientemente elevadas, las pérdidas pueden atribuirse exclusivamente a la conductividad del líquido, es decir, a la presencia de portadores de carga libres en el líquido. Por consiguiente, la evaluación de las propiedades dieléctricas en líquidos aislantes es fundamental como indicador de la pureza del fluido

Para una mejor interpretación de estos parámetros se debe comentar que, mientras cantidades relativamente grandes de impurezas producen comparativamente cambios pequeños en la constante dieléctrica, la $\text{tg } \delta$ puede verse fuertemente afectada por trazas de contaminantes disueltos o partículas coloidales.

Algunos líquidos, debido a su mayor polaridad en comparación con los hidrocarburos, son más susceptibles a la contaminación, lo que conlleva un mayor poder disolvente y capacidad de disociación. Por lo tanto, requieren un cuidado más riguroso en su manipulación en comparación con los hidrocarburos (Sanz, 2017)

6. Circulación del aceite en transformadores de distribución

El aceite circula desde el interior del transformador entre los devanados y el núcleo, aumentando su temperatura a medida que opera. Cuando llega a la parte superior del tanque, empieza a descender por los radiadores, disminuyendo su temperatura (ver Figura 14).

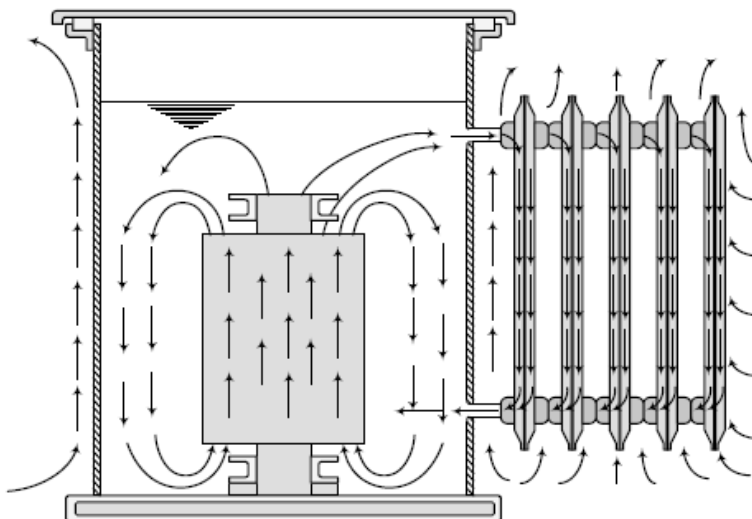


Figura 7. Circulación natural del aceite al interior del transformador

Para una óptima conducción del calor, la viscosidad debe ser baja para evitar un aumento en la viscosidad cinemática, que afecta la velocidad de movimiento de los dispositivos como los interruptores, los cambiadores de derivaciones de los transformadores, así como de las bombas y los reguladores. Una viscosidad elevada dificulta el arranque del equipo en condiciones climáticas frías. Por otro lado, la viscosidad controla procesos tales como la deshidratación, la desgasificación y la filtración de los aceites.

7. Tipos de aceites dieléctricos para transformadores

Los aceites dieléctricos para transformadores se dividen en dos tipos principales: aceites minerales y aceites sintéticos.

- *Aceites minerales:* estos aceites se obtienen de la destilación de petróleo crudo y son los más comunes en los transformadores. Estos aceites son económicos y tienen una excelente resistencia dieléctrica, lo que los hace ideales para el uso en transformadores.
- *Aceites sintéticos:* estos aceites se obtienen a través de procesos químicos y son más costosos que los aceites minerales. Estos aceites tienen propiedades dieléctricas ligeramente superiores a las de los aceites minerales, por lo que son especialmente útiles en situaciones de alta temperatura y humedad. Estos aceites pueden ser derivados del petróleo o fabricados a partir de compuestos sintéticos (J. Díaz et al. 2018; Meira et al. 2018; S. Pérez y López 2018)

7.1. Aceite dieléctrico mineral

El aceite dieléctrico mineral empleado en transformadores se obtiene a partir de la refinación de ciertos hidrocarburos derivados del petróleo. Estos hidrocarburos, compuestos principalmente de carbono e hidrógeno, contienen también trazas de azufre, nitrógeno, oxígeno y otros metales. El proceso de refinación tiene como objetivo principal eliminar estos últimos componentes para lograr un aceite de mayor pureza. La pureza se refiere aquí a la ausencia de contaminantes, como las pequeñas partículas mencionadas anteriormente, que pueden acelerar el deterioro o el envejecimiento del fluido. Por ende, al reducir estas impurezas se obtiene un aceite más puro que garantiza una óptima condición de servicio (Vélez 2016).

Según (Calderón et al. 2020), la mayoría de los aceites dieléctricos de origen mineral se obtienen de productos derivados del petróleo, cuyas principales características son los hidrocarburos nafténicos. Estos aceites tienen una composición típica compuesta por:

- 4 a 7 % de hidrocarburos aromáticos.
- 45 a 55 % de hidrocarburos isoparafínicos.
- 50 a 60 % de hidrocarburos nafténicos.

Estos aceites se utilizan principalmente en transformadores, interruptores de potencia, capacitores y cables. Las propiedades físicas, químicas y eléctricas del fluido varían entre fabricantes, es decir, cada industria desarrolla su aceite con características únicas. Sin embargo, existen acuerdos entre los encargados de refinar el aceite, los productores y los usuarios, con el fin de garantizar que el fluido cumpla con los parámetros (Pérez y López, 2018). Para saber si el aceite es apto para uso en transformadores se hace una comparación de los valores de este con los establecidos en las guías o especificaciones (Caballero y Pizarro 2017).

El aceite dieléctrico mineral para transformadores es de color amarillo claro compuesto principalmente por alcanos, naphthenes y aromáticos. Esta mezcla se usa como medio aislante debido a su alta resistencia a la descarga eléctrica, su bajo coeficiente de dilatación térmica y su buena resistencia a la oxidación. Además de ser un aislante eléctrico, el aceite mineral para transformadores también actúa como un medio de refrigeración. Esto se debe a su alta conductividad térmica, lo que permite que el aceite transfiera el calor generado por el transformador a una fuente de enfriamiento externa (Calderón et al. 2020).

El aceite mineral para transformadores está sujeto a diversas pruebas para comprobar su calidad y eficiencia. Estas pruebas incluyen la prueba de punto de inflamación, la prueba de resistencia dieléctrica y la prueba de sedimentación. El aceite mineral para transformadores es uno de los factores clave en la seguridad y el buen funcionamiento de los transformadores. Por lo tanto, es importante que el aceite se mantenga en buenas condiciones para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del transformador (Ceballos y García 2013).

Los beneficios que se obtienen a partir de la utilización de aceites minerales en transformadores son:

- Es estable a temperaturas altas: El aceite dieléctrico mineral resiste temperaturas de hasta 150 °C sin volverse inflamable. Esto lo hace ideal

para la aplicación en transformadores con altas temperaturas de operación.

- Económicamente accesible: El aceite mineral es uno de los lubricantes más baratos y es una buena opción para aquellas empresas que no tienen presupuesto para lubricantes más caros.
- Proporciona protección contra la corrosión: El aceite dieléctrico mineral ayuda a prevenir la corrosión de los componentes metálicos de los transformadores.
- Posee una excelente resistencia a la oxidación: El aceite dieléctrico mineral se oxida muy lentamente, por lo que es ideal para aplicaciones en las que el aceite permanecerá expuesto a elevadas temperaturas durante largos períodos de tiempo.

El aceite dieléctrico mineral se ha utilizado durante mucho tiempo como medio aislante en los transformadores de distribución. Sin embargo, en los últimos años se ha utilizado menos debido a los riesgos potenciales de contaminación ambiental por parte de los compuestos orgánicos volátiles presentes en los aceites minerales generando ciertas desventajas al momento de emplearlos en transformadores:

- El aceite mineral es un combustible fósil, lo que lo hace una fuente no renovable. Esto significa que una vez que se agote, no hay manera de reemplazarlo.
- El aceite mineral es altamente corrosivo. Esto significa que puede dañar los componentes internos del transformador de distribución si se usan con demasiada frecuencia.
- El aceite mineral es una fuente de contaminación de la tierra. Esto significa que, si hay una fuga en el equipo, el aceite mineral puede entrar en el suelo o en el suministro de agua. Esto puede ser perjudicial para el medio ambiente.

7.2. Aceites sintéticos

Los aceites sintéticos para transformadores son una forma de lubricante sintético especialmente diseñada para el uso en transformadores eléctricos. Estos aceites se fabrican a partir de diferentes tipos de base, como ésteres, ésteres poli-olefínicos, alquil benceno sintéticos, y polifosfato de alquil benceno. Estos aceites tienen excelentes propiedades de enfriamiento, aislamiento, resistencia a la oxidación y estabilidad térmica. Estas propiedades hacen que los aceites sintéticos sean ideales para usar en

transformadores a alta potencia. Además, los aceites sintéticos pueden resistir temperaturas de hasta 250°C, lo que los hace adecuados para su uso en transformadores de alto voltaje. Estos aceites también tienen una excelente resistencia a la corrosión, lo que los hace ideales para su uso en ambientes hostiles.

7.3. Aceites bases

Son hidrocarburos que componen los aceites dieléctricos tienen un alto contenido en carbono e hidrógeno, con una cantidad relativamente pequeña de impurezas como azufre y nitrógeno. Estos compuestos son esenciales para el buen funcionamiento de transformadores e interruptores de potencia.

Aceites aromáticos

El coeficiente de expansión bajo de los aceites dieléctricos dificulta la disipación de calor, lo que impide el enfriamiento adecuado. Estos compuestos tienden a ser poco estables frente a la oxidación, pero forman productos químicos estables que impiden la reacción de oxidación. También tienen un alto poder de solvencia frente a lacas y resinas, lo que puede afectar el aislamiento de los devanados. Sin embargo, el lodo, resultado de la oxidación prematura de los aromáticos, se acumula en los conductos y dificulta la función refrigerante. Por ello, la presencia de algunos compuestos aromáticos en pequeña proporción actúa como inhibidores naturales de oxidación, resultando deseables y necesarios.

Aceite dieléctrico de origen vegetal

Están basados en oleaginosas y aditivos comestibles para mejorar su rendimiento. Son un refrigerante dieléctrico ecológicamente seguro que se degrada rápidamente en el suelo y en ambientes acuáticos. Está hecho de un color verde para destacar su perfil ambientalmente amigable y para distinguirlo del aceite mineral (Calderón et al. 2020).

Los aceites de origen vegetal son los aceites extraídos de fuentes vegetales, como semillas, hierbas. Estos incluyen aceites como el aceite de oliva, de coco, de sésamo, de girasol y de canola. Estos aceites son ricos en grasas saludables y son usados comúnmente para cocinar, al horno o para aliñar ensaladas. Estos aceites también se usan en la fabricación de productos cosméticos y alimenticios. Además, se usan como lubricantes y como lubricantes en transformadores eléctricos. Los aceites de origen

vegetal tienen un punto de inflamación más alto que los aceites minerales, lo que los hace más seguros para usar en aplicaciones de transformadores eléctricos. Estos aceites también son menos propensos a la oxidación, lo que los hace ideales para usar en aplicaciones de transformadores eléctricos.

Algunas de las ventajas más notables en el uso de aceite dieléctrico vegetal para transformadores de distribución son (Calderón et al. 2020).

- El aceite vegetal es un aislante natural y no tóxico: Esto significa que es seguro para el medio ambiente en caso de un derrame.
- El aceite vegetal se enfría más rápido que el aceite mineral, por lo que ofrece mejores características de refrigeración para los transformadores de distribución.
- No es tan inflamable como el aceite mineral, lo que disminuye el riesgo de incendios.

A pesar de tener grandes ventajas también se debe considerar el hecho de que el aceite vegetal tiene una vida útil más corta en comparación con los aceites minerales, por lo que, los transformadores con aceite vegetal deben ser rellenados con mayor frecuencia, además que tienen menor resistencia a la oxidación, es decir que se degrada con mayor facilidad (Carcedo et al. 2015).

Ésteres sintéticos

Los ésteres son una clase amplia de compuestos orgánicos sintetizados de ácidos orgánicos (ácido carboxílico) y alcohol. El origen de estos ésteres puede ser natural o sintético dependiendo de su tratamiento. Los ésteres naturales son derivados principalmente de semillas, por lo que son amigables con el medio ambiente, una sus características principales es la elevada resistencia que presentan al fuego, por lo cual brindan una mayor seguridad (Caballero y Pizarro 2017). Los polioles, que son ésteres sintéticos comúnmente conocidos como fluidos dieléctricos, se componen de una mezcla de alcohol y ácido orgánico. Hay una gran variedad de ésteres sintéticos que se pueden obtener según el alcohol y el ácido utilizados. Estos fluidos tienen excelentes propiedades dieléctricas, además de una homogeneidad en amplios rangos de temperatura. Sin embargo, el principal impedimento para su uso es su elevado costo.

El uso de fluidos aislantes dieléctricos sintéticos, como la silicona y los ésteres de ácido fático, ha sido limitado hasta ahora. Estas sustancias se están empleando actualmente en aplicaciones especiales donde se requiere un grado elevado de seguridad y un tiempo extendido de funcionamiento. Además, se están probando aceites

dieléctricos predominantemente parafínicos. El método de prueba y su interpretación son similar para los aceites sintéticos de silicona y los minerales. La prueba de oxidación no es necesaria para la silicona, ya que este material no se oxida (Carcedo et al. 2015).

Aceites siliconados

Estos compuestos están compuestos por átomos de silicio y oxígeno con grupos de metilo unidos a los átomos de silicio, haciéndolos una de las opciones más seguras y adecuadas disponibles. Estos líquidos son altamente estables y tienen una capacidad de resistencia al fuego superior a los aceites minerales, además son refrigerantes dieléctricos y no contaminantes. Si se usan en un transformador diseñado para aceite mineral, la potencia disminuirá entre 5 y 10% debido a su mayor viscosidad.

Es obvio que el empleo de líquidos dieléctricos que respeten el medio ambiente se está volviendo cada vez más común, al igual que ha sucedido en otros aspectos de la ingeniería, como por ejemplo en la refrigeración. Actualmente, su uso es una norma en los transformadores de distribución, aunque todavía no en los de mayor potencia. En la tabla 1 se expone el uso actual de los aceites en transformadores de distribución.

Tabla 2
Uso actual de aceites refrigerantes

| Tipo de aceite | Potencia | Distribución |
|-----------------------|-----------------|---------------------|
| Mineral | + | + |
| Silicona | * | + |
| Ester sintético | - | + |

+ **Muy utilizado** -**Menos utilizado** ***No utilizado**

Fuente: Carcedo et al. 2015

Se han desarrollado alternativas como los aceites sintéticos y los aceites de origen vegetal. Los aceites sintéticos ofrecen ventajas en términos de estabilidad térmica, durabilidad y seguridad, pero a menudo con costos más elevados y algunas limitaciones en resistencia al calor y estabilidad de oxidación.

Por otro lado, los aceites de origen vegetal, siendo menos inflamables, presentan un enfoque más amigable con el medio ambiente. Sin embargo, también pueden tener una vida útil más corta y pueden requerir un reemplazo más frecuente.

La elección del aceite dieléctrico adecuado dependerá de diversos factores, incluyendo la aplicación, el entorno operativo, los requisitos de seguridad y el impacto

ambiental. A medida que la conciencia ambiental y la demanda de soluciones más seguras aumentan, es probable que los aceites dieléctricos de origen vegetal y las alternativas sintéticas continúen ganando relevancia en el campo de los transformadores eléctricos. La selección cuidadosa de estos aceites no solo garantiza un rendimiento óptimo del transformador, sino que también contribuye a la sostenibilidad y seguridad en el sector eléctrico.

8. Comparación de las propiedades físico químicas de los aceites dieléctricos minerales y vegetales

Las propiedades de los aceites dieléctricos dentro de los transformadores eléctricos determinan la eficiencia del aceite como aislante y el desgaste que el mismo puede tener por el cambio de temperatura, arco eléctrico y en general el propio uso como aislante, cabe mencionar que las propiedades que se van a analizar son independientes del diseño del transformador.

En la tabla 2 se presenta una comparación entre las propiedades físico químicas de los aceites dieléctricos de origen mineral y vegetal:

Tabla 3
Comparación general de las características de aceites de diferente origen

| Característica | | Aceite de origen mineral | Aceite de origen vegetal |
|---|------------------------------|--|---|
| Uso | | Altamente utilizado en potencia, distribución y medida | Altamente utilizado en distribución, y poco utilizado en potencia |
| Origen | | Derivados del petróleo | Productos agrícolas |
| ¿Es renovable? | | No | Sí |
| Susceptibilidad a la oxidación | | Baja | Alta |
| Estabilidad a oxidación | Hasta 100 °C | Muy buena (condiciones de emergencia permitirían hasta 115 °C) | Aceptable pero más baja que aceite mineral |
| | Mayores a 100 °C | Muy mala (se degradan muy rápido las propiedades aislantes del aceite) | Mantienen la estabilidad hasta los 160 °C |
| Efecto principal de la oxidación | | Formación de ácidos carboxílicos (muy corrosivos) | Aumento de la viscosidad a largo plazo |
| Viscosidad | @ 40°C (mm ² /s) | 9 | 30 a 42 |
| | @ 100°C (mm ² /s) | 2,5 | 5,25 a 9 |
| Conductividad térmica @ 25°C (W/mK) | | 0,126 | 0,144 a 0,17 |
| Punto de combustión (°C) | | 170 -180 | > 350 |
| Punto de inflamación (°C) | | 160 - 170 | > 300 |
| Resistividad | | Menor | Mayor |
| Humedad contenida para rigidez dieléctrica = 30 kV/mm | | 50 ppm | 600 ppm aprox. |
| Tensión de ruptura (IEC 60156 2.5mm [28]) | | > 70 kV | > 75 kV |
| Capacidad térmica del aislamiento papel-aceite | | Menor | Mayor |
| Formación de lodos | | Sí, afectando la refrigeración | Casi inexistente |

| Característica | Aceite de origen mineral | Aceite de origen vegetal |
|---|---------------------------|--------------------------|
| Número de neutralización y factor de disipación | Varían según la oxidación | Varían según la humedad |
| Análisis de Gases Disueltos (DGA) | Gran base de datos | Faltan investigaciones |
| Costo | Menor | 2 a 3 veces mayor |

Fuente: Meira et al. 2018

El aceite de origen vegetal sobresale como una alternativa más sostenible, ya que es renovable, exhibe una mayor resistencia a la oxidación a altas temperaturas, lo que reduce la degradación de sus propiedades aislantes. Esta característica contribuye a la prolongación de la vida útil de los transformadores eléctricos y, por ende, a una menor necesidad de reemplazo y disposición de equipos, lo que disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción y desecho de transformadores.

Además, la menor susceptibilidad a la oxidación del aceite vegetal y su capacidad para operar a temperaturas más elevadas pueden brindar ventajas en términos de eficiencia energética, lo que es esencial para reducir el consumo de energía y su impacto ambiental.

Por otro lado, el aceite dieléctrico mineral, muestra una menor resistencia a la oxidación a altas temperaturas y puede tener una mayor susceptibilidad a la formación de ácidos corrosivos, no es biodegradable, es más económico.

La transición hacia alternativas más amigables con el clima es esencial para avanzar hacia una matriz energética más sostenible y reducir el impacto ambiental de la industria eléctrica en un contexto de cambio climático global (Castaño 2013; Meira et al. 2018).

9. El papel del aceite dieléctrico en las emisiones de GEI asociadas al proceso de transformación de la energía eléctrica

El papel del aceite dieléctrico en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al proceso de transformación de la energía eléctrica es un aspecto importante en términos de impacto ambiental. Aunque los aceites dieléctricos son esenciales para el funcionamiento eficiente y seguro de equipos eléctricos como transformadores, su uso puede tener implicaciones en las emisiones de GEI debido a ciertos factores.

- **Composición y Emisiones:** Los aceites dieléctricos utilizados en transformadores suelen estar basados en hidrocarburos, y en algunos casos,

pueden contener compuestos halogenados. Estos hidrocarburos pueden ser volátiles y liberar gases al medio ambiente, incluyendo a la atmósfera, en forma de emisiones fugitivas o debido a fugas en los equipos. Algunos compuestos halogenados tienen un alto potencial de calentamiento global (PCG), lo que significa que tienen una capacidad significativa para atrapar el calor en la atmósfera y contribuir al calentamiento global.

- **Fugas y Mantenimiento:** Las fugas de aceites dieléctricos en transformadores pueden resultar en la liberación de GEI, especialmente si estos aceites contienen compuestos halogenados. El mantenimiento inadecuado, la degradación del equipo o el envejecimiento del aceite pueden aumentar el riesgo de fugas y, por lo tanto, de emisiones involuntarias.
- **Potencial de Calentamiento Global:** Los compuestos halogenados, en particular, pueden tener un alto potencial de calentamiento global (PCG). Esto significa que, aunque pueden estar presentes en pequeñas cantidades, su capacidad para atrapar el calor en la atmósfera es mucho mayor en comparación con otros gases. Por lo tanto, incluso una pequeña liberación de estos compuestos puede tener un impacto significativo en el calentamiento global.
- **Gestión de Residuos:** Cuando los aceites dieléctricos llegan al final de su vida útil, deben ser gestionados adecuadamente. La disposición incorrecta de estos aceites usados puede llevar a la liberación de GEI, así como a la contaminación del suelo y el agua.

Para mitigar el impacto ambiental y las emisiones de GEI asociadas al uso de aceites dieléctricos, se pueden tomar medidas como:

- Utilizar aceites dieléctricos con bajo contenido de compuestos halogenados.
- Realizar inspecciones y mantenimiento regulares para prevenir fugas.
- Implementar sistemas de monitoreo y detección de fugas en los equipos.
- Establecer protocolos adecuados para la gestión y disposición de aceites dieléctricos usados, incluyendo el reciclaje y el tratamiento adecuado.

Es importante reconocer que, si bien los aceites dieléctricos son esenciales para la eficiencia y seguridad de los equipos eléctricos, su impacto ambiental debe ser considerado y gestionado de manera responsable para reducir las emisiones de GEI y minimizar su contribución al cambio climático (Caballero y Pizarro 2017).

La cantidad de emisiones de CO₂ asociadas con el aceite dieléctrico mineral varía según la fuente y la calidad del petróleo crudo utilizado en su producción, así como la cantidad y la distancia del transporte del aceite. Sin embargo, se estima que la producción de un litro de aceite dieléctrico mineral emite aproximadamente 2,7 kg de CO₂ a la atmósfera (Caballero y Pizarro 2017).

El uso de aceites dieléctricos en la transformación de energía eléctrica es esencial para garantizar la operación eficiente y segura de equipos como transformadores. Sin embargo, estos aceites pueden tener un impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido a su composición y a la posibilidad de fugas. Algunos compuestos halogenados presentes en los aceites tienen un alto potencial de calentamiento global y su liberación puede contribuir al cambio climático. Para mitigar este impacto, es crucial adoptar enfoques responsables, como la elección de aceites con menor contenido de compuestos halogenados, la realización de mantenimiento preventivo para evitar fugas, y la implementación de sistemas de monitoreo. Además, una gestión adecuada de los aceites dieléctricos usados y la promoción de prácticas sostenibles en la industria eléctrica son esenciales para reducir las emisiones de GEI y contribuir a un futuro más respetuoso con el medio ambiente.

10. El sistema energético en el Ecuador y el DMQ en particular y las oportunidades de mitigación de Cambio Climático

11.1. El papel de los transformadores en las emisiones del sector eléctrico y el cambio climático

El sector eléctrico contribuye significativamente a las emisiones globales de gases de efecto invernadero. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en 2010, el sector de la electricidad y la calefacción fue responsable del 25% de estas emisiones a nivel mundial (IPCC, 2014). En este contexto, los transformadores son esenciales para la transmisión y distribución de electricidad, aunque ellos mismos no generan emisiones de gases de efecto invernadero directamente.

11.2. Contribución de los transformadores a las emisiones del sector eléctrico

Aunque los transformadores no son los principales responsables de las emisiones en el sector eléctrico, su función en la red eléctrica los convierte en un componente clave a tener en cuenta. Un estudio de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) indica que los transformadores contribuyen aproximadamente con el 2% de las emisiones totales del sector eléctrico (IEA, 2017). Esta proporción puede parecer pequeña, pero dado el alcance global del sector eléctrico, incluso porcentajes modestos representan cantidades significativas de emisiones. Es por ello, que el presente estudio se desarrolla para poder cuantificar las emisiones que se pudieran evitar al cambiar el aceite dieléctrico mineral por aceite dieléctrico vegetal en el DMQ.

Para mitigar el impacto de los transformadores en las emisiones del sector eléctrico, existen varias estrategias:

Modernización de la infraestructura eléctrica: La actualización y el mantenimiento adecuado de la red eléctrica, incluyendo los transformadores, pueden mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas de energía (Fang et al., 2012).

La Comisión Técnica encargada de determinar los Factores de Emisión de gases de efecto invernadero (CTFE), concluyó que, en el sector eléctrico del país, las emisiones de dióxido de carbono se redujeron a 1.204 kilotoneladas en 2021, en comparación con las 5.922 kilotoneladas generadas en 2014. Este logro se atribuye a la adopción de energías renovables y al eficiente funcionamiento del Sistema Nacional Interconectado (SNI).

11.3. Ecuador

El sistema energético en Ecuador presenta particularidades que influyen en su camino hacia la mitigación del cambio climático. El país es conocido por su rica biodiversidad y su dependencia histórica de los recursos naturales, incluyendo los combustibles fósiles y la energía hidroeléctrica. Aunque la energía hidroeléctrica ha sido una fuente importante de generación eléctrica en Ecuador, la explotación de petróleo también ha sido un pilar económico clave.

Sin embargo, Ecuador ha tomado pasos significativos hacia la transición energética y la mitigación del cambio climático. El país ha establecido objetivos ambiciosos de generación de energía renovable, con la meta de llegar al 90% de energía renovable en la matriz eléctrica para 2030. Esta transición se basa en la explotación de su potencial hidroeléctrico, solar y eólico, lo que no solo disminuiría las emisiones de

GEI, sino que también reduciría la dependencia de los combustibles fósiles y fortalecería la seguridad energética (Castro 2011).

Además, la Constitución de Ecuador reconoce los derechos de la naturaleza, lo que ha llevado a la implementación de políticas y regulaciones que buscan el equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación del medio ambiente. El país también ha firmado acuerdos internacionales para abordar el cambio climático, como el Acuerdo de París.

A pesar de estos avances, hay desafíos en la transición energética de Ecuador. La dependencia histórica del petróleo y la inversión en infraestructuras relacionadas plantean retos para la diversificación de la matriz energética. Además, la incorporación de energías renovables debe realizarse de manera planificada y sostenible para evitar impactos negativos en el medio ambiente y las comunidades (Castro 2011).

Los costos de las fuentes de energía renovable son un factor importante para determinar la competitividad de determinada tecnología en el sector energético. De esta manera, si una tecnología genera electricidad por debajo del precio del mercado, estimado a largo plazo, es probable que los inversionistas la seleccionen para futuras expansiones. Si no se sigue un modelo de mercado en el sector eléctrico, los costos continúan siendo un factor crítico, ya que aquellas tecnologías que tengan costos competitivos respecto a las tradicionales del sector eléctrico tendrán mayor factibilidad y probabilidad de ser adoptadas.

11.4. En el Distrito Metropolitano de Quito

El sistema energético en Ecuador, y específicamente en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), enfrenta desafíos significativos en relación con la mitigación del cambio climático (CC) y la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. Ecuador, como muchos otros países, depende en gran medida de los combustibles fósiles para su generación de energía, lo que contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y al cambio climático.

En el caso del DMQ, como una de las áreas urbanas más importantes de Ecuador, la demanda de energía es alta debido a la concentración de población y actividades económicas. Esto puede resultar en mayores emisiones de GEI, como dióxido de carbono (CO₂), debido al consumo de energía en edificios, transporte y otras actividades. La dependencia histórica de los combustibles fósiles, como el petróleo y el

gas natural, para la generación de electricidad también contribuye a las emisiones y representa un reto en términos de sostenibilidad y mitigación.

No obstante, existen oportunidades concretas de mitigación en el sistema energético ecuatoriano y del DMQ. Estas oportunidades incluyen:

Eficiencia energética: Implementar medidas para mejorar la eficiencia energética en edificios, transporte y procesos industriales puede reducir significativamente el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones de CO₂.

Transporte sostenible: Promover el uso de transporte público, vehículos eléctricos y otras alternativas de movilidad sostenible puede reducir las emisiones relacionadas con el transporte en el DMQ y otras áreas urbanas.

Políticas y regulaciones: La implementación de políticas y regulaciones que fomenten la transición hacia energías limpias y prácticas sostenibles puede ser clave para la mitigación de Cambio Climático en el sistema energético.

Educación y concientización: Promover la educación y la conciencia pública sobre la importancia de la mitigación del cambio climático y el uso responsable de la energía puede incentivar cambios de comportamiento y adopción de prácticas más sostenibles (Castro 2011).

Una parte fundamental de esta transición implica la adopción de prácticas y tecnologías que reduzcan la liberación de GEI asociada al uso de aceites dieléctricos. Esto incluye la elección de aceites con menor contenido de compuestos halogenados, además, de la gestión adecuada de los aceites dieléctricos usados es esencial para evitar la liberación incontrolada de GEI y la contaminación ambiental. Mediante la recolección, el reciclaje y el tratamiento adecuado de los aceites usados, se puede minimizar su impacto ambiental (Castro 2011; Caballero y Pizarro 2017).

Capítulo tercero

Metodología

1. Procesos de producción de los diferentes tipos de aceite y las emisiones asociadas

La utilización de aceites dieléctricos en diversas aplicaciones industriales y eléctricas es un elemento fundamental en la protección y el rendimiento de equipos eléctricos, como transformadores y condensadores. Estos aceites desempeñan un papel crucial al aislar y refrigerar componentes eléctricos, evitando cortocircuitos y garantizando un funcionamiento seguro y eficiente. Dos tipos principales de aceites ampliamente utilizados en estas aplicaciones son los aceites dieléctricos vegetales y los aceites dieléctricos minerales (Pérez y López 2018).

Los aceites dieléctricos vegetales se obtienen a partir de fuentes naturales, como semillas oleaginosas (por ejemplo, la soja, la colza y el aceite de girasol) o frutos secos. Estos aceites se caracterizan por ser de origen renovable, lo que los convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente. Además, presentan propiedades dieléctricas adecuadas para su uso en equipos eléctricos y son conocidos por su alta capacidad de enfriamiento. La producción de aceites dieléctricos vegetales implica una serie de procesos, desde la extracción de aceite de la materia prima hasta su refinamiento y purificación, que pueden variar según el tipo de aceite vegetal utilizado (Gómez et al. 2011; Sanz 2017).

Por otro lado, los aceites dieléctricos minerales se derivan del petróleo crudo y han sido ampliamente utilizados durante décadas en aplicaciones eléctricas debido a sus propiedades aislantes y su estabilidad térmica. Estos aceites son conocidos por su capacidad de soportar altas temperaturas y su baja volatilidad, lo que los hace adecuados para aplicaciones de alta carga térmica. La producción de aceites dieléctricos minerales involucra la destilación y el tratamiento químico del petróleo crudo para obtener un producto con las propiedades requeridas (Mang 2007; Navas et al. 2012).

Se explorarán las características técnicas, las ventajas y desventajas de ambos tipos de aceites dieléctricos, y se examinarán los aspectos ambientales y de sostenibilidad relacionados con su fabricación y uso. Además, se destacarán las

tendencias actuales en la industria de los aceites dieléctricos en busca de soluciones más sostenibles y eficientes desde el punto de vista energético y ambiental.

Cada tipo de aceite tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección entre ellos depende de factores técnicos, económicos y ambientales. En la búsqueda de dar un aporte a la presente investigación, se ha planteado considerar si el aceite dieléctrico vegetal puede ser una herramienta para combatir al cambio climático.

La elección entre aceites dieléctricos vegetales y minerales dependerá en última instancia de los requisitos técnicos y de sostenibilidad de cada aplicación específica, teniendo en cuenta las consideraciones ambientales y económicas.

La transición hacia una mayor sostenibilidad en la industria de los aceites dieléctricos es un objetivo clave para minimizar el impacto ambiental y promover un futuro más limpio y seguro en la distribución y transformación de energía eléctrica.

Para la elaboración de este estudio, se comenzó con una revisión bibliográfica y la recopilación de valores de emisiones de aceite dieléctrico disponibles en la literatura. Posteriormente, con estos datos, se llevaron a cabo los cálculos necesarios para comparar las emisiones de ambos gases.

Cuantificación de la cantidad de transformadores en el DMQ

La EEQ actualmente cuenta con un total de 43.133 transformadores que utilizan aceite dieléctrico mineral (Empresa Eléctrica Quito 2019; Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables 2020). Cada año, 700 transformadores son retirados de la red y reemplazados (Empresa Eléctrica Quito 2019), por lo cual, dicho valor será tomado como base para los cálculos a efectuarse, se tomará una ventana de cambio de los transformadores de 20 años, que abarca desde el 2024 al 2044.

El Laboratorio de Transformadores de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), es el encargado de llevar a cabo el mantenimiento de diversos de equipos, incluyendo transformadores, seccionadores, celdas de distribución, y otros dispositivos eléctricos, está conformado por 20 profesionales.

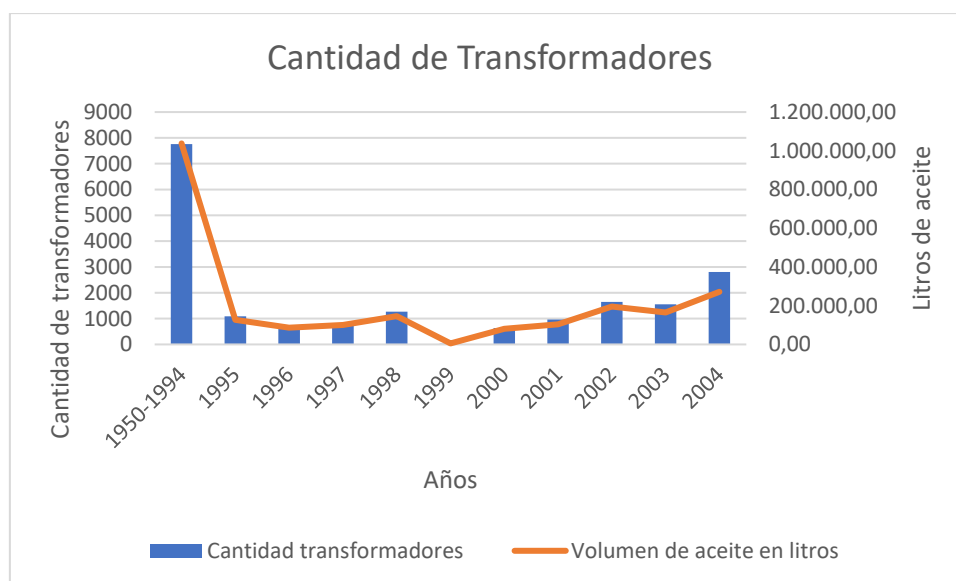
Este equipo de especialistas tiene la responsabilidad de evaluar el estado de los equipos. En caso de que se identifiquen unidades que han superado su vida útil o que presenten daños irreparables, el laboratorio toma la decisión de si es apropiado reintegrarlos a la red eléctrica o si deben ser retirados de manera definitiva para su disposición final.

Con base en los datos proporcionados por la Jefatura y Supervisor del Laboratorio de Transformadores de la EEQ, anualmente se someten a mantenimiento rutinario 1.200 transformadores. Durante estas inspecciones, se detecta que un número considerable de transformadores se encuentra en diferentes etapas de su ciclo de vida, y 700 de ellos han alcanzado el final de su vida útil. La elección de reemplazar 700 transformadores al año se fundamenta en la evaluación realizada por el Laboratorio de Transformadores, el cual identifica equipos que, debido a su obsolescencia, ya no pueden ser reincorporados a la red eléctrica. Este número específico de reemplazos anuales se determina siguiendo las recomendaciones emitidas por el laboratorio de transformadores. Esta medida garantiza la confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico.

En la tabla 3 se detallan los equipos con su año de fabricación desde el 1950 hasta el 2004, que han cumplido su vida útil y que requieren ser priorizado su reemplazo.

Tabla 4
Cantidad de transformadores de acuerdo a su año de fabricación en la red eléctrica de Quito

| Año de fabricación | Cantidad transformadores | Volumen de aceite en Litros |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1955-1994 | 7.760 | 1'037.939,00 |
| 1995 | 1.091 | 126.686 |
| 1996 | 735 | 86.234 |
| 1997 | 786 | 100.136 |
| 1998 | 1.270 | 145.609 |
| 1999 | 28 | 5.208 |
| 2000 | 636 | 80.277 |
| 2001 | 962 | 103.999 |
| 2002 | 1.644 | 195.404 |
| 2003 | 1.554 | 164.749 |
| 2004 | 2.805 | 271.964 |
| Total | 19.271 | 2'318.205 |



Fuente: Empresa Eléctrica Quito

Planteamiento de escenarios para sustitución de transformadores en el DMQ

La sustitución inmediata de todos estos transformadores y su reemplazo por aceites vegetales llevaría a una mitigación de emisiones de CO₂ significativa, estimada en un escenario hipotético de reducción total. Sin embargo, es importante reconocer que esta opción no se considera un escenario realista en la práctica debido a las limitaciones logísticas y económicas asociadas. Por lo tanto, se están evaluando varios ritmos de sustitución para reflejar una aproximación más viable desde el punto de vista operativo y económico.

Reemplazar 700 transformadores por año se considera una cantidad manejable desde una perspectiva de gestión. Esto implica que el equipo técnico y logístico de la EEQ puede llevar a cabo la tarea de manera eficiente sin sobrecargar los recursos disponibles. Esta cifra se basa en la capacidad de la organización para llevar a cabo inspecciones, pruebas y reemplazos de manera efectiva. La sustitución de 700 transformadores por año permite una distribución de costos que no sobrecarga significativamente los recursos financieros de la EEQ. Esto es fundamental para garantizar la sostenibilidad económica de la empresa y mantener tarifas razonables para los consumidores.

La sustitución gradual a lo largo del tiempo permite una transición suave y sostenible sin interrupciones en la provisión de energía eléctrica. Esto es esencial para garantizar la continuidad del suministro eléctrico a los usuarios.

Este enfoque proporciona la oportunidad de evaluar y aprender a medida que se implementa la sustitución. Los datos y experiencias recopilados en cada ciclo anual de reemplazo pueden ayudar a optimizar los procesos y tomar decisiones informadas el cual garantiza que la infraestructura eléctrica se mantenga actualizada y eficiente. Esto contribuye a la confiabilidad del sistema y a la reducción de pérdidas de energía.

Para esta investigación se propone contextualizar tres diferentes escenarios de reemplazo de transformadores, detallados a continuación:

Escenario 1: Sustitución gradual. Reemplazo a un ritmo constante de 700 transformadores por año. En este escenario, se considera un enfoque de sustitución gradual y constante, donde se reemplazan 700 transformadores por año.

Escenario 2: Sustitución ambiciosa. Reemplazo a un ritmo constante de 1.400 transformadores por año. En este escenario hipotético, el ritmo de reemplazo se duplica en comparación con el Escenario 1, con 1.400 transformadores reemplazados por año. Esto refleja una estrategia más ambiciosa que acelera la transición hacia tecnologías más sostenibles.

Escenario 3: Sustitución integral. Reemplazo a un ritmo variable de aumento comenzando con 700 transformadores en el primer año y aumentando cada año en un ritmo variable de 200 transformadores más que el incremento del año anterior, hasta el año 2044. Este escenario hipotético, tiene como objetivo acelerar la transición hacia tecnologías más limpias y maximizar la mitigación de emisiones en un plazo determinado.

2. Métodos usados para estimar las emisiones de GEI asociadas al uso de aceites dieléctricos

La estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al uso de aceites dieléctricos vegetales y minerales es fundamental para comprender y abordar el impacto ambiental en este ámbito de estas sustancias en aplicaciones eléctrica. Los GEI, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), contribuyen al calentamiento global cuando se liberan a la atmósfera. A continuación, proporcionaremos una introducción sobre los métodos utilizados para estimar las emisiones de GEI asociadas al uso de aceite dieléctrico vegetal y mineral (Navas et al. 2012).

Análisis del Ciclo de Vida (ACV): El ACV es una herramienta que evalúa las emisiones de GEI a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la

producción de materias primas hasta su disposición final. Este enfoque permite cuantificar las emisiones asociadas a la producción, el transporte, el uso y el eventual reciclaje o disposición del aceite dieléctrico vegetal (Batto 2014; Andrade et al. 2017; Jurado y Mercado 2010).

Mediciones directas: este método implica la instalación de sensores y equipos de medición en fuentes específicas de emisiones, se recopilan datos en tiempo real para cuantificar las emisiones de GEI (Castaño 2013).

La elección de la metodología para esta investigación consideró factores como los recursos disponibles y los objetivos del estudio. Por lo tanto, se optó por el método del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) debido a su capacidad para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto. Esto incluye aspectos como la producción, el transporte, el uso y la disposición final del producto.

Esta elección proporciona una visión completa y detallada de las implicaciones ambientales de un producto. Aunque las mediciones directas pueden capturar emisiones en puntos específicos, no ofrecen una imagen integral.

Realizar mediciones directas en todas las etapas del ciclo de vida de un producto puede ser costoso y logísticamente complicado. En contraste, el ACV utiliza datos disponibles y existentes, lo que puede ser más eficiente en términos de recursos.

Mientras que las mediciones directas son valiosas para comprender las emisiones en puntos específicos, el ACV destaca por su capacidad para proporcionar una perspectiva holística y sistemática. Esta perspectiva es esencial para la toma de decisiones ambientales y la planificación estratégica a largo plazo.

En cuanto a la eficiencia en comparación con otros métodos de estimación, el ACV tiene ventajas significativas:

Perspectiva holística: A diferencia de otros métodos que pueden centrarse en aspectos específicos, el ACV ofrece una visión completa de todo el ciclo de vida del producto, lo que permite identificar impactos ambientales en todas las etapas.

Comparabilidad: El ACV permite comparar productos o procesos similares de manera objetiva, lo que facilita la toma de decisiones basadas en datos sólidos.

Eficiencia de recursos: Utiliza datos existentes siempre que sea posible, lo que puede ser más eficiente en términos de recursos en comparación con mediciones directas en todas las etapas (Castaño 2013).

3. Implementación del Análisis de Ciclo de Vida

Para utilización del Análisis de Ciclo de Vida se tomó en consideración los siguientes puntos:

Definición del alcance: En esta etapa, se establecen los límites y los objetivos del análisis. Para la presente investigación se considera las emisiones de GEI desde la fabricación hasta la disposición final del aceite dieléctrico de origen mineral y vegetal.

Recopilación de datos: Se recopilan datos relevantes sobre las diferentes etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico, como la extracción de materias primas, la fabricación, transporte, uso y la disposición final. Estos datos fueron obtenidos de fuentes diversas, de la literatura existente.

Evaluación de GEI: En esta fase, se evalúan la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero y una comparativa económica entre ambos aceites en caso de darse una transición de tecnología.

Finalmente, se realizará la comparación de las emisiones de GEI de los aceites dieléctricos, para evaluar la cantidad de CO₂ equivalente que se podría evitar con el cambio y transición de tecnología, así como el costo al precio actual del mercado ecuatoriano, con la cantidad de aceite dieléctrico dentro de Distrito Metropolitano de Quito (Ceballos y García 2013).

4. Aplicación de los resultados del Software Building for environmental and Economic Sustainability (BEE 4.0)

El estudio de Zúñiga y Morales 2022 analizó las ventajas y desventajas del uso del aceite dieléctrico de origen vegetal en comparación con el aceite dieléctrico mineral. Dado que el aceite vegetal es una opción relativamente nueva, no existen bases de datos históricas de uso para este tipo de aceite. El estudio se centró en la comparación de propiedades eléctricas y económicas entre ambas opciones.

Como resultado de su análisis, llegaron a la conclusión de que el aceite dieléctrico mineral no es ambientalmente amigable y representa un problema.

Esta conclusión se respalda por diversas razones, entre las cuales destaca que el aceite vegetal ofrece varias ventajas ambientales notables en contraste con el aceite mineral, no presenta toxicidad para la vida acuática y su contenido de material biológico supera el 95 %. En cuanto a las emisiones de carbono, su impacto ambiental total es solo el 25 % del impacto causado por el aceite mineral. Estos atributos hacen que el aceite vegetal sea considerablemente más amigable con el medio ambiente en

comparación con el aceite mineral, reforzando así la conclusión de que el aceite dieléctrico mineral plantea un problema desde el punto de vista ambiental (Zuñiga y Morales 2022).

Por otro lado, el documento de Cargill Incorporated (2021) presenta una ficha técnica con especificaciones sobre el aceite dieléctrico vegetal que comercializa.

Los autores en mención produjeron sus estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero usando del programa Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide (BEES 4.0). BEES es un sistema de evaluación de ciclo de vida desarrollado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de los Estados Unidos. Utiliza un enfoque de ciclo de vida completo para evaluar el impacto ambiental a lo largo de su vida útil, desde la extracción de materias primas hasta la fabricación, transporte, uso y eventual disposición. Esta evaluación implica no solo las emisiones de GEI, sino también otros impactos ambientales significativos. El proceso general de análisis que utiliza BEES se puede dividir en las siguientes etapas:

Definición del Sistema: En esta etapa, se define el alcance del análisis, es decir, se determina qué elementos se incluirán en la evaluación y cuál será la “unidad funcional” o referencia. También se seleccionan los impactos ambientales que se medirán, como las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero.

Recopilación de Datos: BEES utiliza una amplia gama de datos de ciclo de vida de productos, incluyendo el proceso de extracción de materias primas, la fabricación, el transporte, el uso y la disposición final. Los datos se obtienen de diversas fuentes, como estudios de ACV, bases de datos de inventario de ciclo de vida y fuentes de la industria.

Análisis de Ciclo de Vida: En esta etapa, BEES realiza el cálculo de los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida del producto o sistema en cuestión. Esto implica el seguimiento de todas las entradas y salidas de materiales, energía y emisiones a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final.

Normalización y ponderación: Para facilitar la comparación entre diferentes impactos ambientales, BEES normaliza y pondera los resultados. La normalización ajusta los impactos a una escala común, mientras que la ponderación asigna un peso relativo a cada impacto según su importancia.

Resultados y conclusiones: BEES genera informes detallados que desglosan los impactos por categoría (por ejemplo, emisiones de CO₂, uso de agua, etc.)

En el siguiente capítulo nos basamos en los resultados generados por Cargill Incorporated, (2021) y Zúñiga y Morales (2022) quienes implementaron el software BEES para producir una estimación de las emisiones asociadas a diferentes etapas del ciclo de vida de transformadores de origen mineral y vegetal.

Para la estimación de gases de efecto invernadero se utilizó los resultados del software BEES 4.0 (Building for Environmental and Economic Sustainability), que mide el desempeño ambiental de los productos utilizando el enfoque de evaluación del ciclo de vida ambiental especificado en las normas ISO 14040 (Lippiatt 2007).

5. Unidad de medición y ventana temporal considerada

Para poder realizar la comparación entre los dos tipos de aceites, es esencial tener la misma unidad, la base para los cálculos para el programa fue los que requiere un transformador de 500 galones durante 30 años, los resultados obtenidos de este análisis son basados en datos de la industria de Estados Unidos, por lo cual para el caso de Ecuador se deberá realizar el análisis de emisiones de transporte de importación del mencionado país a territorio ecuatoriano. El BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) no incorpora análisis de incertidumbre debido a la falta de datos específicos de los fabricantes.

En cuanto al periodo de estudio, se optó aquí en utilizar una ventana de 20 años para analizar los datos de transformadores. La elección de este período se basa en la conveniencia de agrupar la información en intervalos significativos para facilitar el análisis temporal. Esta elección permite la identificación de patrones y tendencias a lo largo del tiempo, además, el periodo de 20 años se alinea con los ciclos de vida útil comunes de los transformadores (Empresa Eléctrica Quito, 2019; Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020), ofreciendo información sobre la longevidad y el reemplazo, este intervalo proporciona una perspectiva integral para evaluar cambios a largo plazo en la fabricación de transformadores.

Capítulo cuarto

Emisiones generadas en la producción de aceite dieléctrico

La producción y uso de aceite dieléctrico, es un componente esencial en transformadores eléctricos, es un aspecto crítico de los sistemas de energía eléctrica que rara vez se considera de manera detenida en el contexto de la mitigación del cambio climático. Este capítulo se adentra en un análisis de las estimaciones de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la producción de aceite dieléctrico de origen mineral y vegetal, mediante los datos de la literatura de los análisis de ciclo de vida.

A medida que la demanda de energía eléctrica sigue creciendo en todo el mundo, se ha intensificado la producción de transformadores eléctricos y, por lo tanto, la necesidad de aceites dieléctricos. Sin embargo, la producción el uso y el desecho de estos aceites no es un proceso libre de impacto ambiental. Aquí nos interesamos en específico al examen detallado las emisiones de GEI asociadas a sus ciclos de vida.

En el presente capítulo, nos dedicamos a caracterizar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generadas durante las diferentes etapas que constituyen el ciclo de vida de los aceites dieléctricos mineral y vegetal, desde la extracción o cultivo de materia prima, pasando por su producción, uso en transformadores y su eventual disposición. Se proporcionan detalles de estas etapas y las emisiones de GEI asociadas. La extracción implica la obtención del aceite mineral del petróleo crudo y su refinamiento. En la fabricación agrega aditivos para mejorar sus propiedades. El transporte involucra la distribución del aceite a las empresas eléctricas. El uso en equipos eléctricos se extiende durante la vida útil del transformador, y la disposición final genera emisiones de CO₂ durante la incineración.

Para estimar las emisiones de CO₂ en cada etapa, se utilizan datos de la literatura y cálculos propios. Zúñiga y Morales (2022) proporcionaron estimaciones de emisiones en gramos de CO₂ por unidad (transformador de 1000 kVA con 500 galones de aceite). Estos valores se utilizarán para evaluar las emisiones de GEI en términos de CO₂ equivalente a lo largo del ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral. Estos datos proporcionan una evaluación de las emisiones de GEI asociadas al aceite dieléctrico

mineral y vegetal a lo largo de su ciclo de vida y son fundamentales para comprender su impacto ambiental.

1. Identificación de las etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral

En esta sección, queremos caracterizar el ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral, identificando las diversas fases y estimando sus respectivas contribuciones a las emisiones de gases de efecto invernadero.

2. Etapas del ciclo de vida

El ciclo de vida de los aceites dieléctricos minerales puede variar dependiendo de sus usos y aplicaciones, pero en general se puede dividir en las etapas detalladas en el esquema de la figura 15. Para las diferentes etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral, fueron extraídas de la literatura, el esquema proporciona una visión integral del trayecto del aceite dieléctrico mineral desde su creación hasta su disposición final, destacando la importancia de la gestión adecuada de este componente en sistemas eléctricos (Lippiatt 2007).



Figura 8. Diagrama del ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral. Proporciona una visión integral del trayecto del aceite dieléctrico mineral desde su creación hasta su disposición final, el cual está basado en el Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide. (Lippiatt 2007)

3. Detalles de las etapas y su potencial en términos de emisiones

A continuación, se detallan las principales etapas involucradas en la estimación de emisiones de GEI en la producción de aceite dieléctrico mineral, lo que incluye la

extracción y producción de materias primas, la fabricación, el transporte, el uso y mantenimiento, y finalmente la disposición final.

3.1. Extracción

El aceite mineral se extrae del petróleo crudo en yacimientos petrolíferos. Durante esta etapa, se llevan a cabo procesos de extracción y refinamiento para obtener el aceite mineral puro (Ceballos y García 2013). El aceite dieléctrico mineral es muy sensible a la presencia de agua, ya que puede reducir su capacidad dieléctrica y causar fallas en el equipo eléctrico. Por lo tanto, la primera etapa de la refinación del aceite mineral dieléctrico es la deshidratación. Esto se logra mediante el uso de equipos especiales que eliminan la humedad del aceite mineral. Una vez obtenido el aceite mineral, se lleva a cabo su producción, que puede implicar la mezcla con otros aditivos para mejorar sus propiedades de lubricación, protección y conservación, la presencia de gases en el aceite mineral dieléctrico también puede reducir su capacidad dieléctrica y afectar su rendimiento (Navas et al. 2012).

3.2. Fabricación del aceite dieléctrico

En esta etapa, se fabrica el aceite dieléctrico mineral a partir del petróleo refinado, a este producto, se añaden depresores del punto de fluidez y otros aditivos como antioxidantes para darle al aceite del transformador las propiedades que necesita.

La información detallada sobre estos aditivos no puede ser divulgada debido a consideraciones de confidencialidad. No obstante, es relevante destacar que los datos relacionados con la producción de estos aditivos se han obtenido de la base de datos de SimaPro, este *software* se utiliza para evaluar de manera integral el impacto ambiental de productos y procesos a lo largo de su ciclo de vida, abarcando desde la extracción de materias primas hasta la disposición final.

3.3. Transporte

El aceite dieléctrico almacena en tanques y contenedores antes de su uso y se distribuye a las diferentes empresas eléctricas.

3.4. Uso en equipos eléctricos

La cantidad de aceite utilizada en un transformador depende del tamaño del transformador. Se supone un transformador de tamaño relativamente pequeño (1 000

kV• A), que requiere alrededor de 1.892 litros de fluido para enfriarse (Lippiatt 2007). El software BEES incluye la electricidad necesaria para reacondicionar el aceite cuando las pruebas de análisis de gases disueltos indican la necesidad, el reacondicionamiento es un proceso necesario para mantener la calidad y la eficiencia del aceite, así como para prolongar la vida útil del transformador. Cuando las pruebas de análisis de gases disueltos indican la necesidad de reacondicionar el aceite, significa que se han detectado niveles anormales de gases disueltos en el aceite, lo que puede ser un indicio de problemas en el transformador. Cabe recalcar que durante el uso del aceite en equipos eléctricos no emiten emisiones significativas de gases de efecto invernadero.

3.5. Disposición final

La disposición final de los aceites dieléctricos usados se generan las emisiones de CO₂ en el proceso de incineración, se supone ninguno de los productos se deposita en vertederos (Lippiatt 2007).

El aceite mineral dieléctrico es un producto químico peligroso y no se puede desecharlo en el medio ambiente ni en vertederos ordinarios. La disposición final inadecuada del aceite puede causar contaminación del suelo, el agua y el aire, y representar un riesgo para la salud pública (Sánchez 2019).

4. Estimación de las emisiones de CO₂ las etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral

En esta sección, queremos producir una estimación de las emisiones de GEI asociadas a cada etapa del ciclo de vida de los aceites dieléctricos minerales. Usamos las cifras presentes en la literatura. Nos apoyamos en los resultados de Zúñiga y Morales quienes implementaron el programa BEES para producir las emisiones de gases de efecto invernadero en todas las etapas de fabricación aceite dieléctrico mineral, se obtuvieron los resultados siguientes:

Tabla 5

Resultados tomados de la literatura de las estimaciones del programa BEES para el aceite dieléctrico mineral

| Etapas | Emisiones gCO₂/U | Emisiones gCO₂/L |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Extracción materia prima | 1'048.184 | 554 |
| Fabricación del aceite dieléctrico | 544.363 | 288 |
| Transporte | 122.475 | 65 |
| Uso en equipos eléctricos | 154.124 | 81 |
| Disposición final | 30.825 | 16 |

Fuente: Zuñiga y Morales 2022

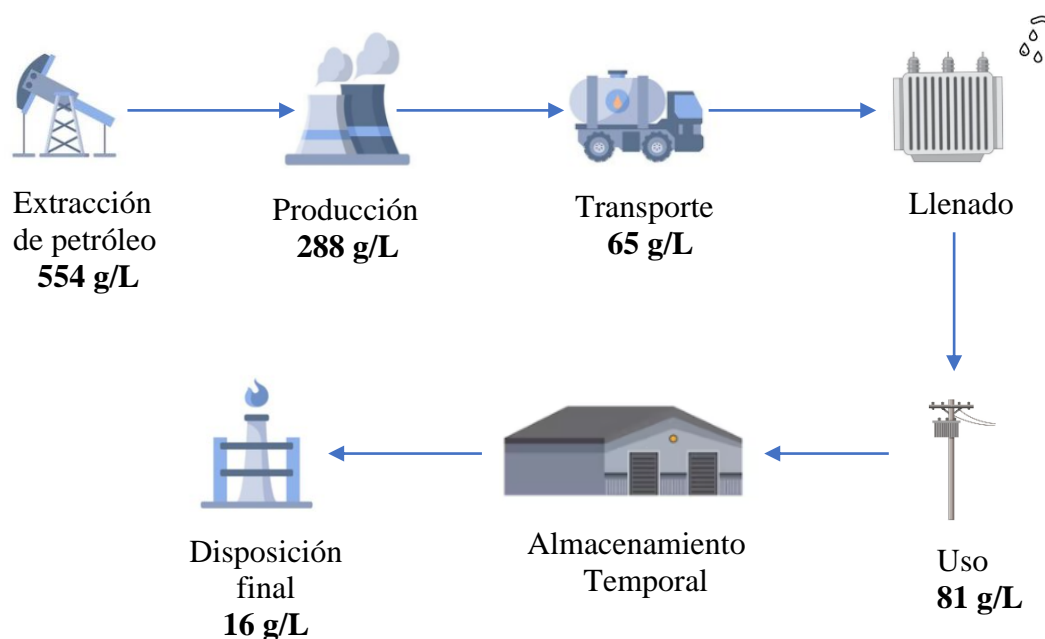


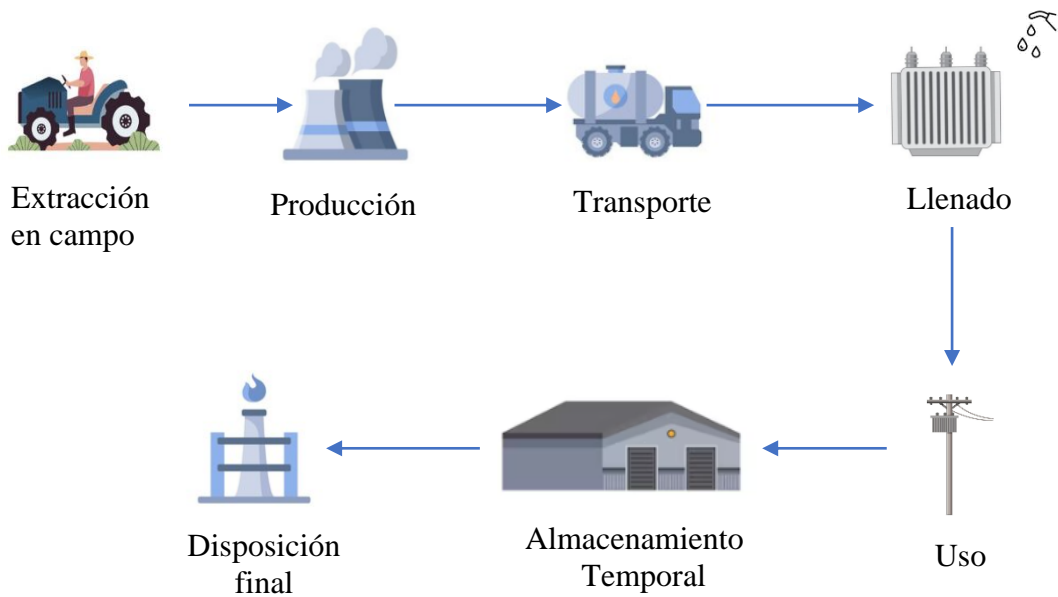
Figura 9. Estimación de las emisiones de CO₂ equivalente en el ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral

El diagrama de la figura 16 es una réplica del de la figura 15, esta vez con las emisiones estimadas de cada etapa considerada.

5. Identificación de las etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico vegetal

El ciclo de vida del aceite dieléctrico vegetal es un proceso que abarca desde el cultivo de las materias primas vegetales utilizados en su producción hasta su eventual desecho y reciclaje. Este ciclo comprende una serie de etapas interconectadas que incluyen la agricultura sostenible, la extracción y refinamiento de aceite vegetal, su transporte, almacenamiento, uso en transformadores y equipos eléctricos, y la gestión de residuos al final de su vida útil. Cada una de estas etapas tiene implicaciones

ambientales y energéticas que merecen un análisis detallado. En esta sección, procuramos identificar y caracterizar las etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico vegetal y sus respectivas contribuciones a las emisiones de gases de efecto invernadero. Basándonos en la literatura existente de Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide (Lippiatt 2007), en la cual, se describen las etapas del ciclo de vida del aceite vegetal:



Este diagrama proporciona una visión integral del trayecto del aceite dieléctrico vegetal desde su creación hasta su disposición final, el cual está basado en el Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide.

Figura 10. Diagrama del ciclo de vida del aceite dieléctrico vegetal.

5.1. Extracción del aceite

Las semillas vegetales son procesadas para extraer el aceite vegetal mediante diferentes técnicas, como prensado mecánico, solventes químicos o pretratamiento con calor. En esta etapa se generan subproductos, como las tortas de semillas, que pueden ser utilizados como alimento para animales (Navas et al. 2012; Zuñiga y Morales 2022).

Los datos sobre la producción de soja provienen de la base de datos de EE. UU. Los datos de producción de aceite de soja provienen del estudio ACV del Laboratorio Nacional de Energías Renovables sobre el uso de biodiésel en un autobús urbano, en el que el aceite de soja desgomado se modela como precursor del biodiésel a base de soja. Los aditivos utilizados en el aceite dieléctrico incluyen una mezcla de ésteres naturales y resinas de metacrilato, compuestos fenólicos y colorantes. Estos aditivos no se especifican por cuestiones de confidencialidad, pero están incluidos en el modelo y los

datos del ciclo de vida para su producción provienen del contenido general de la base de datos SimaPro LCA (Lippiatt 2007).

5.2. Refinación del aceite vegetal

Se realiza con el objetivo de eliminar impurezas y mejorar su estabilidad térmica y eléctrica, para que pueda cumplir con los requisitos de funcionamiento y seguridad en los transformadores eléctricos. El proceso de refinación del aceite vegetal para su uso en transformadores eléctricos incluye las siguientes etapas, desgomado, blanqueo, desodorización (Navas et al. 2012; Sanz 2017).

Después de la refinación, el aceite vegetal se somete a pruebas de calidad para asegurarse de que cumple con los requisitos de funcionamiento y seguridad en los transformadores eléctricos. Estas pruebas incluyen la medición de la estabilidad eléctrica, la tensión interfacial, la acidez y la resistividad (Sanz 2017).

Es importante mencionar que la refinación del aceite vegetal para su uso en transformadores eléctricos es un proceso delicado y requiere de equipos y procedimientos especiales para asegurar la calidad del producto final. Además, el aceite vegetal utilizado en transformadores eléctricos debe cumplir con las normas y regulaciones locales y nacionales para garantizar la seguridad del equipo y de las personas que lo utilizan (Navas et al. 2012).

5.3. Transporte

En el transporte de aceite vegetal dieléctrico es prácticamente el mismo que el aceite mineral, debido a que los procesos de transporte generalmente son iguales, ya que incluyen traslados por tierra y por mar (Castaño 2013).

5.4. Uso en equipos eléctricos

Durante su vida útil, el aceite dieléctrico vegetal funciona como un aislante en equipos eléctricos, lo que ayuda a mantener la integridad y eficiencia de los sistemas eléctricos. Este aceite tiene propiedades dieléctricas que previenen cortocircuitos y aíslan las partes conductoras (Rebolledo 2014). En el modelado del BEES se incluye la electricidad necesaria para reacondicionar el aceite cuando las pruebas de análisis de gases disueltos indican la necesidad. Se supone que el reacondicionamiento se realiza cada cinco años. Se supone que tiene una vida útil de 30 años (Lippiatt 2007). Cabe

recalcar que durante el uso en equipos eléctricos no se emiten emisiones significativas de gases de efecto invernadero.

5.5. Disposición final

Al final de su vida útil, el aceite vegetal puede ser tratado para su regeneración y reutilización, o puede ser desechado de manera responsable, de acuerdo con las regulaciones locales y nacionales. En algunos casos, el aceite vegetal puede ser utilizado como fuente de energía para la generación de electricidad o como combustible para calderas industriales (Sanz 2017). Al final de la vida útil de 30 años del transformador, se modela de la misma manera que la mayoría de los demás aceites para transformadores en el programa BEES: al año 30, se supone que el aceite será reacondicionado. En el modelado del final de su vida útil se incluye la electricidad necesaria para reacondicionar el aceite (Lippiatt 2007).

La disposición final del aceite dieléctrico vegetal es crucial para su gestión ambiental. La regeneración y el reciclaje son opciones preferibles que prolongan la vida útil del aceite y reducen su huella ambiental. Cuando no es posible, la disposición final debe realizarse de acuerdo con las regulaciones ambientales nacionales.

6. Estimación de las Emisiones de CO₂ de aceite dieléctrico vegetal

En esta sección, usaremos las cifras presentes en la literatura, centrándonos en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que se generan a lo largo de su ciclo de vida del aceite dieléctrico vegetal. Esto incluye la fabricación, el transporte, la utilización y, en última instancia, la disposición del aceite dieléctrico vegetal.

Con la base de datos del software BEES se obtienen los siguientes resultados (Zuñiga y Morales 2022):

Extracción materia prima: -381.590 g/U. El valor negativo es debido a la suposición de que en la etapa de cultivo el CO₂ es secuestrado, por lo cual no se emitiría CO₂ a la atmósfera (Cuevas 2010; Castaño 2013).

Tabla 6

Resultados tomados de la literatura de las estimaciones del programa BEES para el aceite dieléctrico mineral

| Etapa | Emisiones de gCO ₂ /U | Emisiones de gCO ₂ /L |
|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Extracción materia prima | -381.590 | -202 |
| Fabricación del aceite dieléctrico | 160.212 | 85 |
| Transporte | 71.498 | 38 |
| Uso en equipos eléctricos | 153.450 | 81 |
| Disposición final | 30.690 | 16 |

Fuente: Zuñiga y Morales 2022

Los resultados se presentan de forma gráfica en la figura 18, que proporciona una visión integral del trayecto del aceite dieléctrico mineral desde su creación hasta su disposición final, con las emisiones estimadas del software BEES.

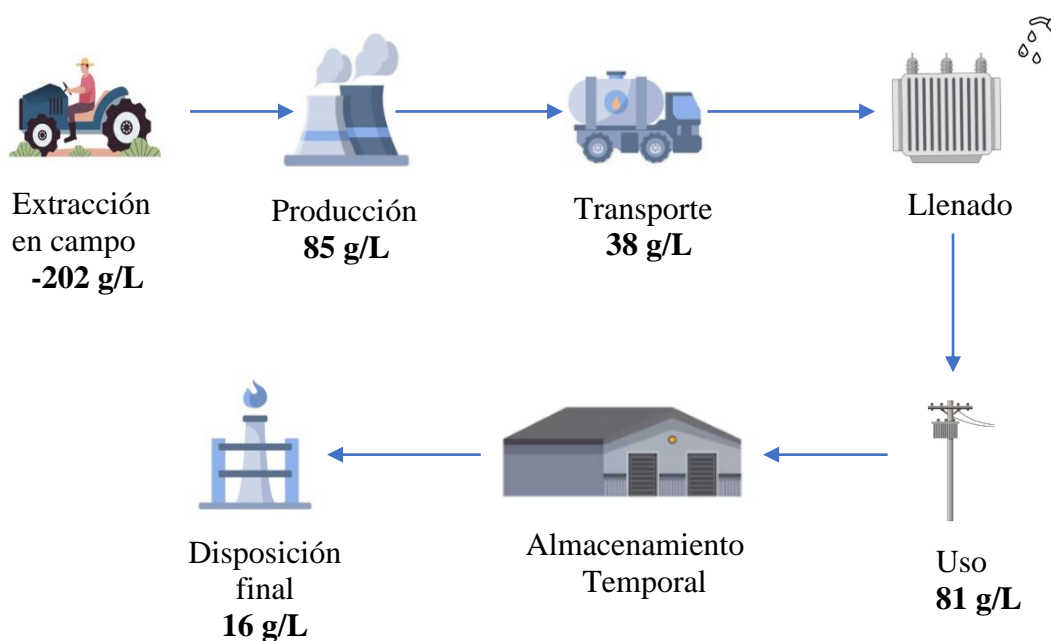


Figura 11. Estimación de las emisiones de CO₂ equivalente en el ciclo de vida del aceite dieléctrico vegetal

El diagrama de la figura 18 es una réplica del de la figura 17, esta vez con las emisiones estimadas de cada etapa considerada.

7. Comparación de las emisiones de GEI asociadas al ACV de los aceites dieléctricos

En esta sección, examinamos y compararemos las emisiones de los ciclos de vida de los aceites dieléctricos minerales y vegetales. La tabla 6 proporciona una síntesis de los resultados obtenidos.

Tabla 7
Comparación de emisiones de CO₂ equivalente del aceite dieléctrico mineral y vegetal

| Aceite dieléctrico mineral | | | | Aceite dieléctrico vegetal | | | |
|------------------------------------|---|--|--|------------------------------------|---|--|--|
| Etapas | Cantidad de GEI emitida (gCO ₂ eq / U) | Cantidad de GEI emitida (gCO ₂ eq /Litro) | Fuente | Etapas | Cantidad de GEI emitida (gCO ₂ eq / U) | Cantidad de GEI emitida (gCO ₂ eq /Litro) | Fuente |
| Extracción materia prima | 1'048.184 | 554 | (Cargrill Incorporated 2021; Zuñiga y Morales 2022). | Extracción materia prima | -381.590 | -202 | (Cargrill Incorporated 2021; Zuñiga y Morales 2022). |
| Fabricación del aceite dieléctrico | 544.363 | 288 | | Fabricación del aceite dieléctrico | 160.212 | 85 | |
| Transporte | 122.478 | 65 | | Transporte | 71.498 | 38 | |
| Uso en equipos eléctricos: | 154.124 | 81 | | Uso en equipos eléctricos: | 153.450 | 81 | |
| Disposición Final | 30.825 | 16 | | Disposición Final | 30.690 | 16 | |
| Total | 1.899.974 | 1.003,84 | | Total | 34.260 | 18,10 | |

Fuente: Cargrill Incorporated 2021; Zuñiga y Morales 2022

Constatamos que la producción y uso de aceite dieléctrico vegetal emite significativamente menos gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con el aceite dieléctrico mineral. El aceite dieléctrico vegetal emite significativamente menos gases de efecto invernadero (GEI) en todo su ciclo de vida, y emite menos GEI en todas las etapas del ciclo en comparación con su homónimo mineral. Su extracción se basa en materias primas renovables y de bajo impacto ambiental, lo que reduce drásticamente las emisiones asociadas a la extracción de recursos naturales. Además, su producción y uso generan una fracción mínima de las emisiones de GEI en comparación con el aceite

dieléctrico mineral, esto lo convierte en una elección más responsable desde el punto de vista ambiental y contribuye a la mitigación del cambio climático.

De los resultados expuestos en la tabla 6, se evidencia que el aceite dieléctrico vegetal representa una clara ventaja en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la etapa de extracción de materia prima, emitiendo significativamente menos GEI ($-202 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{L}$) en comparación con el aceite dieléctrico mineral ($554 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{L}$). Esto sugiere que la producción del aceite vegetal es menos intensiva en carbono en esta etapa. El aceite dieléctrico vegetal es altamente favorable en esta etapa.

En la etapa de fabricación del aceite, el aceite dieléctrico mineral ($288 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{L}$) emite más GEI en comparación con el aceite dieléctrico vegetal ($85 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{L}$). Esto puede deberse a procesos más intensivos en energía y emisiones asociadas con la producción de aceite mineral.

El transporte de ambos tipos de aceites muestra una diferencia, el aceite dieléctrico mineral ($65 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{U}$) genera más GEI que el aceite dieléctrico vegetal ($38 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{U}$). Esto puede depender de las ubicaciones geográficas de las materias primas y las instalaciones de producción.

Las emisiones de GEI durante el uso en equipos eléctricos y disposición final, son prácticamente equivalentes para ambos aceites, con valores cercanos a $81 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{L}$ y $16 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{L}$ respectivamente. Esto indica que el tipo de aceite dieléctrico utilizado en los equipos eléctricos tiene un impacto de emisiones relativamente bajo en comparación con otras etapas del ciclo de vida.

El total de emisiones de GEI a lo largo del ciclo de vida completo muestra una marcada diferencia. El aceite dieléctrico mineral acumula un total de $1.003,84 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{L}$, mientras que el aceite dieléctrico vegetal presenta un total mucho menor de $18,10 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{L}$. Esto confirma que, en general, el aceite dieléctrico vegetal tiene un impacto ambiental significativamente menor en términos de emisiones de GEI en comparación con el aceite mineral.

Los resultados de la tabla 6 sugieren que el aceite dieléctrico vegetal es una opción más sostenible desde el punto de vista de las emisiones de GEI en la industria eléctrica en comparación con el aceite dieléctrico mineral.

8. Incertidumbre y límites de la estimación

Las estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un ciclo de vida completo, como la presentada en la tabla 6, conlleva ciertos límites e incertidumbres. Algunos de los límites e incertidumbres que podrían estar asociados a esta tabla incluyen las detalladas a continuación.

Variabilidad en la fuente de datos: Los datos utilizados para calcular las emisiones pueden variar según la región geográfica y la fuente de producción. La precisión y representatividad de los datos utilizados pueden influir en las estimaciones de emisiones.

Variabilidad geográfica y de prácticas agrícolas: Las emisiones de GEI en la etapa de extracción de materia prima para el aceite dieléctrico vegetal pueden variar significativamente según la ubicación geográfica de los cultivos y las prácticas agrícolas utilizadas. Por lo tanto, los valores presentados en la tabla pueden no ser aplicables a todas las regiones o situaciones específicas.

Variabilidad en la composición del aceite: La composición química del aceite dieléctrico mineral y vegetal puede variar entre diferentes productos y proveedores. Esto puede influir en las emisiones asociadas a cada etapa del ciclo de vida.

Datos específicos de la producción: Las estimaciones de emisiones en la etapa de fabricación del aceite dieléctrico dependen de datos específicos de la planta de producción, como la eficiencia energética y el tipo de energía utilizada. Estos detalles pueden variar de una instalación a otra y pueden influir en las emisiones reales.

Precisión de los datos de transporte: Las emisiones de GEI asociadas al transporte de materias primas y aceites pueden verse afectadas por las rutas de transporte, los modos de transporte y la eficiencia logística. Los datos presentados en la tabla pueden no reflejar todas las variaciones posibles en estas variables.

Variabilidad en los sistemas eléctricos: Las emisiones durante la etapa de uso en equipos eléctricos pueden depender de la eficiencia y la carga de los sistemas eléctricos específicos en los que se utiliza el aceite dieléctrico. Las emisiones pueden variar en función de la tecnología y la eficiencia de los transformadores y equipos eléctricos individuales.

Otras fuentes de emisiones: La tabla se enfoca en las emisiones de GEI directamente atribuidas al ciclo de vida del aceite dieléctrico. Sin embargo, podría haber otras fuentes de emisiones indirectas, como la producción de energía para las instalaciones de producción y transporte, que no se incluyen en estos valores.

Cambios en la disposición final: La forma en que se dispone finalmente del aceite dieléctrico usado puede variar. Por ejemplo, la incineración puede ser reemplazada por métodos de reciclaje o reutilización, lo que afectaría las emisiones en la etapa de disposición final.

Las incertidumbres presentadas pueden influir en la tabla 6, sin embargo, son útiles como una referencia general, pero es importante tener en cuenta que estas estimaciones están sujetas a variaciones y posibles incertidumbres asociadas a los datos y las condiciones específicas de producción y uso. La incertidumbre puede disminuir con el tiempo a medida que se obtienen datos más precisos o se mejoran los métodos de cálculo. Por lo tanto, es aconsejable realizar análisis de ciclo de vida periódicos y actualizar los resultados a medida que se disponga de información más confiable (Caballero & Pizarro 2017; Carcedo et al. 2015; Castaño 2013a; Enguidanos 2019; Gómez et al. 2011; Navas et al. 2012; Rebolledo 2014; Sanz 2017; Uribe 2019).

Capítulo quinto

Potencial ahorro de las emisiones de GEI por uso progresivo de aceite dieléctrico vegetal en transformadores del DMQ

La transición hacia prácticas más sostenibles en la industria eléctrica se ha vuelto imperativa en el contexto actual de cambio climático. En este sentido, la comparación detallada de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al ciclo de vida del aceite dieléctrico mineral y el aceite dieléctrico vegetal en transformadores del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) se presenta como un análisis fundamental para evaluar el potencial de ahorro de emisiones de GEI.

Los datos en la tabla 6 serán el pilar de partida sobre las emisiones a lo largo del ciclo de vida de estos aceites. Esta información plantea interrogantes sobre la viabilidad de una transición hacia el uso progresivo del aceite dieléctrico vegetal en los transformadores del DMQ como una estrategia para reducir los GEI y ver si puede ser considerada una herramienta para mitigación del Cambio Climático. La introducción de este cambio podría tener implicaciones ambientales significativas y alinearse con los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones de GEI en el sector eléctrico. Por lo tanto, este análisis busca explorar el potencial ahorro de emisiones de GEI que podría derivarse de la adopción gradual del aceite dieléctrico vegetal en los transformadores del DMQ.

Escenario 1: Sustitución gradual de (700 /año)

Como se menciona en el capítulo 3, la Empresa Eléctrica Quito, realiza el reemplazo de 700 transformadores al año. El número de 700 transformadores reemplazados por año se toma como base en las prácticas actuales de la Empresa Eléctrica Quito. Esto indica que esta cantidad es consistente con sus operaciones y actividades regulares (Empresa Eléctrica Quito 2019).

Al utilizar la misma tasa de reemplazo que la Empresa Eléctrica Quito, el Escenario 1 se alinea con la capacidad operativa y logística existente de la organización. Esto garantiza que el reemplazo de transformadores sea factible y no cause interrupciones significativas en el suministro de energía.

El Escenario 1 se justifica en función de la práctica existente de la Empresa Eléctrica Quito y su capacidad operativa.

Para calcular el reemplazo de 700 transformadores, el primer paso implicó estimar el volumen de aceite dieléctrico contenido en dichos transformadores. Para realizar esta estimación, se determinó un valor promedio considerando todos los equipos de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), lo que resultó en un promedio de 122 litros por transformador. Esto nos proporcionó un volumen total de aproximadamente 85.400 litros.

Como se mencionó anteriormente, las emisiones de transporte se basan en movimientos dentro de los Estados Unidos. Por lo tanto, se calcula las emisiones generadas por la importación de aceite dieléctrico desde ese país a Ecuador. Con los datos de la tabla 7 se calcula las emisiones relacionadas con el transporte de importación y se incorporan estos datos en el cálculo de las emisiones totales de los aceites dieléctricos.

Con ayuda del Google MAPS se procedió a obtener la distancia entre EEUU (Kansas) y Ecuador para la importación del aceite dieléctrico, y también la distancia que hay entre Guayaquil y Quito, esto con el objetivo de obtener las emisiones por el transporte.

Tabla 8

Distancia de Estados Unidos a Ecuador



Distancia: 4.688 km



Distancia: 406,5 km

Fuente: Google Maps

De acuerdo con la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEE) el factor de emisión de barcos es de 245 gramos CO_2/km y el factor de emisión de diésel 2,613 $KgCO_2/L$ el consumo de diésel para ese recorrido es de 42.3 litros (Agencia Europea del Medio Ambiente 2015; Instituto Meteorológico Nacional 2020).

$$EB = 245 \frac{gCO_2}{Km} * 4.688km * \frac{1Kg}{1000g} = 11.485,60KgCO_2$$

$$EC = 2,613 \frac{KgCO_2}{L} * 42,3L = 110,52KgCO_2$$

Donde:

EB= emisión de barcos

EC=emisión de camión

Emisiones totales= 11.596 $KgCO_2$

Con estos cálculos preliminares completados, procedemos ahora a realizar el cálculo de las emisiones de CO_2 con los datos proporcionados en la Tabla 6.

$$EAM = 1.003,84 \frac{gCO_{2eq}}{Litros} * 85.400 Litros * \frac{1t}{1000000g} = 85,728tCO_{2eq} + 11,596tCO_2 = \mathbf{97,32 tCO_2}$$

$$EAV = 18,10 \frac{gCO_{2eq}}{Litros} * 85.400 Litros * \frac{1t}{1000000g} = 1,546tCO_{2eq} + 11,596tCO_2 = \mathbf{13,14tCO_2}$$

Donde:

EAM= Emisiones de aceite Mineral

EAV= Emisiones de aceite Vegetal

Los resultados obtenidos se procederán por cada año hasta a ver logrado el reemplazo de 700 por año transformadores en el período de 20 años.

Tabla 9
Cálculo de las emisiones por el cambio a aceite dieléctrico vegetal para el escenario 1 (700/año)

| Año | Total de los transformadores reemplazados | Emisiones aceite mineral tCO ₂ | Emisiones aceite vegetal tCO ₂ | Emisiones evitadas tCO ₂ |
|------|---|---|---|-------------------------------------|
| 2024 | 700 | 97 | 13 | 84 |
| 2025 | 1.400 | 183 | 15 | 168 |
| 2026 | 2.100 | 269 | 16 | 253 |
| 2027 | 2.800 | 355 | 18 | 337 |
| 2028 | 3.500 | 440 | 19 | 421 |
| 2029 | 4.200 | 526 | 21 | 505 |
| 2030 | 4.900 | 612 | 22 | 589 |
| 2031 | 5.600 | 697 | 24 | 673 |
| 2032 | 6.300 | 783 | 26 | 758 |
| 2033 | 7.000 | 869 | 27 | 842 |
| 2034 | 7.700 | 955 | 29 | 926 |
| 2035 | 8.400 | 1.040 | 30 | 1.010 |
| 2036 | 9.100 | 1.126 | 32 | 1.094 |
| 2037 | 9.800 | 1.212 | 33 | 1.179 |

| | | | | |
|------|--------|-------|-----|-------|
| 2038 | 10.500 | 1.298 | 35 | 1.263 |
| 2039 | 11.200 | 1.383 | 36 | 1.347 |
| 2040 | 11.900 | 1.469 | 38 | 1.431 |
| 2041 | 12.600 | 1.555 | 39 | 1.515 |
| 2042 | 13.300 | 1.640 | 41 | 1.599 |
| 2043 | 14.000 | 1.726 | 43 | 1.684 |
| 2044 | 14.700 | 1.812 | 276 | 1.768 |

Fuente y elaboración propias

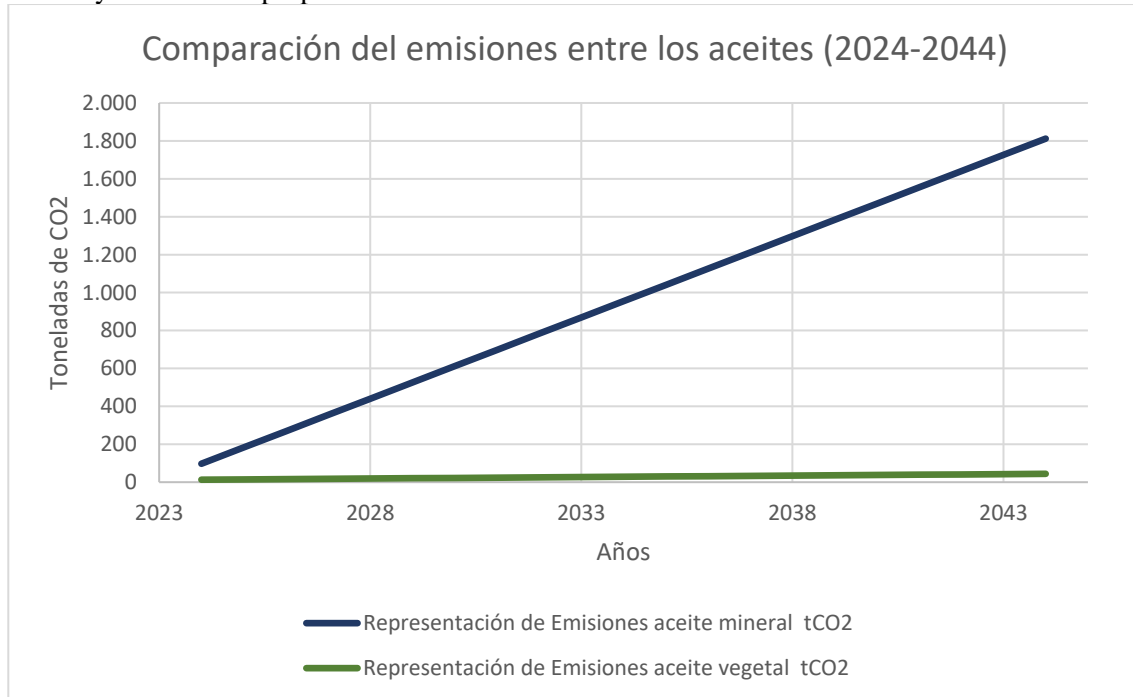


Gráfico 1. Representación de las toneladas de CO₂ del 2024-2044 escenario 1 (700/año)

Estos datos representan una estimación de las emisiones de dióxido de carbono equivalente (tCO₂) asociadas al uso de aceite dieléctrico mineral y aceite dieléctrico vegetal en transformadores a lo largo de varios años.

Los resultados muestran una clara tendencia de reducción en las emisiones de CO₂ equivalente a medida que se reemplaza el aceite dieléctrico mineral por el aceite dieléctrico vegetal. Esta reducción se debe a las características más sostenibles del aceite vegetal en comparación con el aceite mineral.

A medida que se completa el proceso de reemplazo, las emisiones evitadas alcanzan niveles significativos, estos datos reflejan una estrategia de reemplazo progresivo que permite una transición sostenible hacia el uso de aceite dieléctrico vegetal en transformadores.

Los resultados indican una clara tendencia de reducción en las emisiones de CO₂ equivalente a medida que se adopta el aceite dieléctrico vegetal en lugar del aceite dieléctrico mineral. Esta transición es consistente con los esfuerzos para abordar el cambio climático y es un ejemplo de cómo las decisiones en el sector eléctrico pueden tener un impacto positivo en la mitigación del cambio climático a largo plazo.

A lo largo de los 20 años representados en la tabla, se evitan más de mil toneladas de emisiones de CO₂. De acuerdo a la EPA un automóvil típico emite alrededor de 4.6 toneladas de CO₂ por año en promedio. La cantidad de CO₂ evitada en 20 años sería equivalente a las emisiones anuales de aproximadamente 384 automóviles.

Escenario 2: Sustitución ambiciosa (1.400 /año)

La consideración de un aumento en la tasa de reemplazo de transformadores de 700 a 1.400 por año implica una evaluación crucial de los factores logísticos y complejidades operativas. Se debe tener en cuenta que este aumento es puramente hipotético y requiere un análisis detallado antes de su implementación. Un enfoque gradual y escalonado podría ser considerado para adquirir experiencia y superar los desafíos logísticos en esta situación hipotética.

Este escenario implica un enfoque más ambicioso en comparación con el Escenario 1. En este caso, se lleva a cabo la sustitución de 1.400 transformadores por año. A diferencia de la estrategia gradual del Escenario 1, aquí se duplica la velocidad de reemplazo. Esto conlleva a varias implicaciones y consideraciones importantes:

Aceleración de la Transición: El principal objetivo de este escenario es acelerar significativamente la transición hacia el uso de aceite dieléctrico de origen vegetal en los transformadores. Al reemplazar un número considerablemente mayor de transformadores cada año, se busca reducir las emisiones de CO₂ de manera más rápida y efectiva.

Reducción de Emisiones Acelerada: La principal ventaja de este escenario es que acelera la reducción de emisiones de CO₂ de manera notable. Si la mitigación del cambio climático es una prioridad y se dispone de los recursos necesarios, este enfoque puede ser altamente efectivo en la lucha contra las emisiones de gases de efecto invernadero.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos con esta nueva variable:

Tabla 10
Cálculo de las emisiones por el cambio a aceite dieléctrico vegetal escenario 2 (1.400/año)

| Año | Total de los transformadores reemplazados | Emisiones aceite mineral tCO₂ | Emisiones aceite vegetal tCO₂ | Emisiones evitadas tCO₂ |
|------------|--|---|---|---|
| 2024 | 1.400 | 183 | 15 | 168 |
| 2025 | 2.800 | 355 | 18 | 337 |
| 2026 | 4.200 | 526 | 21 | 505 |
| 2027 | 5.600 | 697 | 24 | 673 |
| 2028 | 7.000 | 869 | 27 | 842 |
| 2029 | 8.400 | 1.040 | 30 | 1.010 |
| 2030 | 9.800 | 1.212 | 33 | 1.179 |
| 2031 | 11.200 | 1.383 | 36 | 1.347 |
| 2032 | 12.600 | 1.555 | 39 | 1.515 |
| 2033 | 14.000 | 1.726 | 43 | 1.684 |
| 2034 | 15.400 | 1.898 | 46 | 1.852 |
| 2035 | 16.800 | 2.069 | 49 | 2.020 |
| 2036 | 18.200 | 2.241 | 52 | 2.189 |
| 2037 | 19.600 | 2.412 | 55 | 2.357 |
| 2038 | 21.000 | 2.583 | 58 | 2.525 |
| 2039 | 22.400 | 2.755 | 61 | 2.694 |
| 2040 | 23.800 | 2.926 | 64 | 2.862 |
| 2041 | 25.200 | 3.098 | 67 | 3.031 |
| 2042 | 26.600 | 3.269 | 70 | 3.199 |
| 2043 | 28.000 | 3.441 | 73 | 3.367 |
| 2044 | 29.400 | 3.612 | 77 | 3.536 |

Fuente y elaboración propias

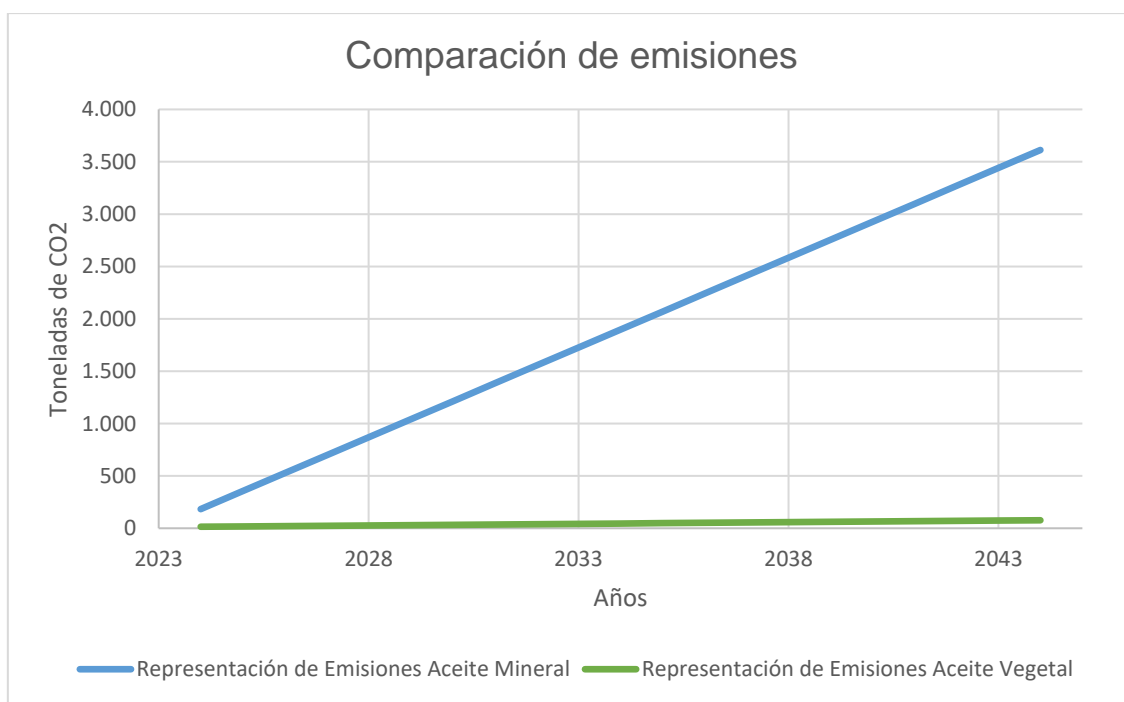


Gráfico 2. Representación de las toneladas de CO₂ del 2024-2044 escenario 2 (1.400/año)

El gráfico 2 muestra una clara diferencia en las emisiones entre el aceite dieléctrico mineral y el aceite dieléctrico vegetal. Las emisiones de aceite dieléctrico vegetal son considerablemente menores en comparación con las de aceite mineral en todos los años. Esto demuestra que la transición hacia el aceite dieléctrico vegetal tiene un impacto positivo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. A medida que se reemplazan más transformadores, las emisiones evitadas aumentan significativamente. Esto destaca el potencial de la transición hacia el aceite dieléctrico vegetal como una estrategia efectiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La tendencia de incremento de transformadores reemplazados y la consiguiente reducción de emisiones sugiere que esta transición tendrá un impacto positivo a largo plazo en la mitigación del cambio climático y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en la ciudad de Quito.

Escenario 3: Sustitución integral reemplazo a un ritmo variable de 200 transformadores hasta el año 2044

Este escenario combina dos fases de reemplazo con el objetivo de maximizar la eficiencia en la reducción de emisiones de CO₂ en un plazo determinado. A continuación, se detallan las características y consideraciones clave de este escenario:

En este escenario, se sigue un ritmo variable de reemplazo de 200 transformadores por año. Esta velocidad de reemplazo es más rápida que la del Escenario 1 y refleja un enfoque ambicioso para acelerar la transición hacia tecnologías más sostenibles.

Resultados a largo plazo: El impacto principal de este escenario se sentirá a lo largo del tiempo, especialmente después del año 2044. A medida que más transformadores operen con aceite dieléctrico de origen vegetal, se espera una reducción significativa y sostenida de las emisiones de CO₂ en el futuro.

Tabla 11
Cálculo de las emisiones por el cambio a aceite dieléctrico vegetal escenario 3

| Año | Total de los transformadores reemplazados | Emisiones aceite mineral tCO₂ | Emisiones aceite vegetal tCO₂ | Emisiones evitadas tCO₂ |
|------------|--|---|---|---|
| 2024 | 700 | 97 | 13 | 84 |
| 2025 | 900 | 122 | 14 | 108 |
| 2026 | 1.300 | 171 | 14 | 156 |
| 2027 | 1.900 | 244 | 16 | 228 |
| 2028 | 2.700 | 342 | 18 | 325 |
| 2029 | 3.700 | 465 | 20 | 445 |
| 2030 | 4.900 | 612 | 22 | 589 |
| 2031 | 6.300 | 783 | 26 | 758 |
| 2032 | 7.900 | 979 | 29 | 950 |
| 2033 | 9.700 | 1.200 | 33 | 1.167 |
| 2034 | 11.700 | 1.444 | 37 | 1.407 |
| 2035 | 13.900 | 1.714 | 42 | 1.672 |
| 2036 | 16.300 | 2.008 | 48 | 1.960 |
| 2037 | 18.900 | 2.326 | 53 | 2.273 |
| 2038 | 21.700 | 2.669 | 60 | 2.610 |
| 2039 | 24.700 | 3.037 | 66 | 2.970 |
| 2040 | 27.900 | 3.428 | 73 | 3.355 |
| 2041 | 31.300 | 3.845 | 81 | 3.764 |
| 2042 | 34.900 | 4.286 | 89 | 4.197 |
| 2043 | 38.700 | 4.751 | 97 | 4.654 |
| 2044 | 42.700 | 5.241 | 106 | 5.135 |

Fuente y elaboración propias

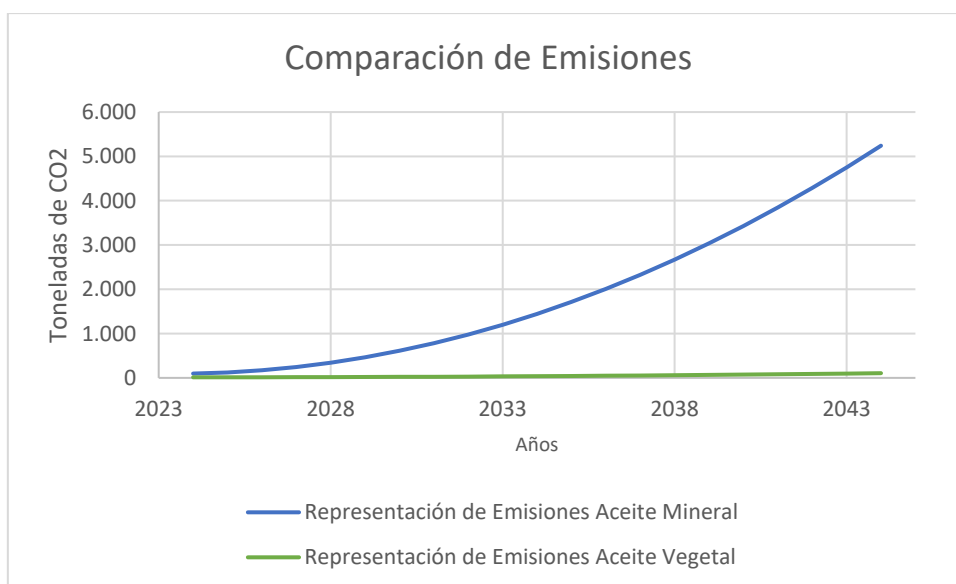


Gráfico 3. Representación de las toneladas de CO₂ del 2024-2044 escenario 3

Síntesis y discusión

En esta sección, se llevará a cabo una síntesis y discusión de los resultados obtenidos a través de una tabla que presenta las emisiones evitadas en toneladas de CO₂, relacionadas con tres distintos ritmos de cambio en la estrategia de reemplazo de transformadores. Estos resultados proporcionan una visión clara de cómo las decisiones tomadas en cuanto al ritmo de reemplazo tienen un impacto directo en la reducción de emisiones y, por ende, en la contribución a la mitigación del cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 12
Emisiones evitadas de acuerdo al ritmo de cambio a aceite dieléctrico vegetal

| Emisiones evitadas en tCO ₂ | Ritmo de cambio | Comparación en % con emisiones del DMQ 2019 (5'170.579) |
|--|-----------------------|---|
| 1.768 | Escenario 1:700/año | 0,03% |
| 3.536 | Escenario 2:1.400/año | 0,07% |
| 5.135 | Escenario 3: 200/año | 0,10% |

Fuente y elaboración propias

Como se muestra en la Tabla 11, se obtuvo el porcentaje de comparación con las emisiones de CO₂ del DMQ del año 2019, el reemplazo de 700 transformadores al año evita 1.768 toneladas de CO₂, lo que representa un 0,03% de las emisiones del Distrito

Metropolitano de Quito (DMQ). En el escenario 2 se evidencia que se evita la emisión de 3.536 toneladas de CO₂, lo que representa un 0,07 % de las emisiones DMQ.

Para el escenario 3, el aumento de transformadores genera una reducción más significativa de emisiones, alcanzando un 0,10% de las emisiones del DMQ.

Aunque la sustitución de transformadores con aceite dieléctrico mineral por aceite dieléctrico vegetal muestra una contribución positiva en la reducción de emisiones de CO₂, es crucial destacar que los valores absolutos de emisiones evitadas, en términos porcentuales respecto a las emisiones totales del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), son modestas. A pesar de la eficacia en la mitigación del cambio climático, la magnitud de estas reducciones, representada por el 0,03 % en el escenario 1, 0,07 % en el escenario 2 y 0,10 % en el escenario 3, resalta la necesidad de implementar estrategias complementarias y más amplias para abordar de manera integral el problema de las emisiones de gases de efecto invernadero. La sustitución de transformadores, aunque beneficiosa, debe ser considerada como parte de un enfoque más amplio y diversificado para abordar los desafíos del cambio climático.

Es importante destacar que los resultados presentados en la tabla 11, muestran las emisiones evitadas en toneladas de CO₂ en función de diferentes ritmos de cambio, pueden estar sujetos a ciertas limitaciones e incertidumbres. Algunos de los elementos a considerar son:

Variabilidad de condiciones operativas: Las condiciones operativas de los transformadores pueden variar significativamente. Factores como la carga, la temperatura ambiente y las fluctuaciones de voltaje pueden afectar la vida útil y el rendimiento de los transformadores.

Factores económicos y financieros: Las fluctuaciones en los costos de equipos, mano de obra y recursos financieros disponibles pueden influir en la viabilidad de la estrategia de reemplazo y en su efectividad a lo largo del tiempo.

Impacto de eventos inesperados: Eventos imprevistos, como desastres naturales o interrupciones en la cadena de suministro, pueden afectar la capacidad de reemplazar transformadores de acuerdo al plan establecido.

Cambios normativos y tecnológicos: Las regulaciones y avances tecnológicos en el campo de la eficiencia energética y la mitigación del cambio climático pueden influir en la estrategia de reemplazo.

A continuación, se presenta un análisis económico de lo que costaría el cambio tecnológico.

Costo del aceite dieléctrico

Tabla 13
Costo del aceite dieléctrico

| Tipo | Costo/Litro dólares |
|----------------------------|---------------------|
| Aceite dieléctrico Mineral | 5,01 |
| Aceite dieléctrico Vegetal | 7,92 |

Fuente: Laboratorio de Transformadores de la Empresa Eléctrica Quito

Tabla 14
Cálculo del costo de cambio de aceite en los tres escenarios en el período 2024-2044

| Escenario | Transformadores cambiados | Costo Aceite Mineral | Costo Aceite vegetal | Diferencia de costos |
|-----------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 14.700 | \$9.001.561 | \$14.212.991 | \$5.211.430 |
| 2 | 29.400 | \$18.003.123 | \$28.425.983 | \$10.422.860 |
| 3 | 42.700 | \$26.147.392 | \$41.285.356 | \$15.137.964 |

Fuente y elaboración propias

Tabla 15
Cálculo del costo de cambio de aceite anual

| Transformadores cambiados | Costo Aceite Mineral | Costo Aceite vegetal | Diferencia de costos |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 700 | \$428.646 | \$676.809 | \$248.163 |

El presupuesto anual de inversión de la Empresa Eléctrica Quito es de 56.916.216 dólares (Empresa Eléctrica Quito 2022). De acuerdo a la información de los técnicos de la EEQ, anualmente se reemplazan 700 equipos, con los datos de la tabla 15 se puede apreciar que el costo anual tiene una diferencia de \$248.163, sin embargo, el aceite vegetal es menos tóxico que el aceite mineral. Esto significa que, en caso de una fuga o derrame, el impacto ambiental será mucho menor, el costo de remediación del suelo sería nulo. Con la creciente preocupación por el cambio climático y la sostenibilidad, esta ventaja no puede ser subestimada.

El aceite dieléctrico vegetal tiene un punto de inflamación más alto que el aceite dieléctrico mineral, lo que reduce significativamente el riesgo de incendios. Esta característica no solo mejora la seguridad operativa, sino que también puede resultar en ahorros considerables al minimizar los accidentes. Los costos asociados a incendios en transformadores, incluyendo daños materiales, interrupciones del servicio y potenciales lesiones, pueden ser muy elevados. El uso de aceite vegetal podría disminuir estos riesgos y, por ende, los costos relacionados. Algunas investigaciones sugieren que los

aceites vegetales pueden prolongar la vida útil de los transformadores debido a sus mejores propiedades térmicas y dieléctricas. Aunque el costo inicial es mayor, la inversión podría recuperarse a largo plazo a través de una mayor eficiencia y menor necesidad de reemplazo y mantenimiento (Mejía, 2020).

Cada vez más regulaciones están promoviendo o incluso exigiendo el uso de alternativas más ecológicas en diversas industrias para el caso de Quito se tiene el PACQ. Adoptar el aceite dieléctrico vegetal ahora podría adelantarse a futuras regulaciones y evitar costos adicionales asociados con el cumplimiento de nuevas normativas.

El presente proyecto de investigación evaluó el potencial que representa sustituir el aceite dieléctrico de origen mineral por el aceite vegetal en todos los transformadores de distribución eléctrica, dentro del área del Distrito Metropolitano de Quito, en términos de reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Los resultados revelaron que el aceite dieléctrico vegetal presenta emisiones de gases de efecto invernadero considerablemente inferiores, se registraron valores de 1,003.84 gCO_{2eq}/Litro para el aceite dieléctrico mineral y 18.10 gCO_{2eq}/Litro para el aceite dieléctrico vegetal. Este análisis demuestra que el aceite dieléctrico vegetal emite tan solo el 1.8% de las emisiones de GEI comparado con el aceite dieléctrico mineral a lo largo de todas las etapas de su vida.

Se examinaron 3 escenarios de sustitución, en el Escenario 1, se propone una sustitución gradual con la meta de reemplazar 700 transformadores representando un enfoque constante a lo largo del tiempo. Por otro lado, el Escenario 2 presenta una estrategia más ambiciosa al duplicar el ritmo de reemplazo a 1,400 transformadores, finalmente, el escenario 3 introduce una sustitución integral que combina un ritmo variable, reemplazando a un ritmo variable de 200 transformadores hasta el año 2044.

Los resultados para el primer escenario muestran que se logra evitar 1.768 toneladas de CO₂, lo que representa un 0.03% de las emisiones del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Para el escenario 2, se observa una reducción de emisiones más rápida y sustancial, lo que puede contribuir más eficazmente a los esfuerzos de mitigación del cambio climático, logra una reducción de 3.536 toneladas de CO₂ (0.07% de las emisiones del DMQ). Sin embargo, aumentar la tasa de reemplazo plantea desafíos logísticos y financieros considerables y requiere un compromiso adicional en términos de recursos y planificación.

Finalmente, el escenario 3 revela una reducción sustancial de las emisiones de CO₂ equivalente a medida que se acelera la tasa de reemplazo, se evitan 5.135 toneladas de CO₂ (0.07% de las emisiones del DMQ). Este aumento en el ritmo de reemplazo conlleva una disminución más rápida y significativa de las emisiones a lo largo de dos décadas.

Una contribución muy modesta que invita a pensar de manera estratégica las medidas de reducción de emisiones.

La sustitución de transformadores con aceite dieléctrico mineral por aceite dieléctrico vegetal muestra una contribución positiva en la reducción de emisiones de CO₂ en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Sin embargo, en términos porcentuales respecto a las emisiones totales, estas reducciones son irrisorias (0,03% en el escenario 1, 0,07% en el escenario 2 y 0,10% en el escenario 3). Aunque esta medida reduce las emisiones de GEI, requiere implementar estrategias complementarias y más amplias para abordar integralmente el desafío de las emisiones de gases de efecto invernadero. La sustitución de transformadores se presenta como una pieza valiosa, pero debe ser considerada dentro de un enfoque más amplio y diversificado para enfrentar los desafíos del cambio climático

Los valores asociados al cambio de aceite dieléctrico en los tres escenarios propuestos, se observa un incremento significativo en los costos al utilizar aceite dieléctrico vegetal en comparación con el aceite mineral en una relación de 1 a 1.5. Se debe contemplar que al usar esta transición los costos aumentan considerablemente y los beneficios en reducción de GEI es irrisoria en comparación con los GEI del DMQ.

Al evaluar las emisiones evitadas, se ha considerado el ciclo de vida completo de los transformadores, integrando no solo las emisiones en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), sino también aquellas asociadas a otras partes del mundo. Esta perspectiva ampliada refleja una evaluación más holística de los impactos ambientales y resalta la importancia de considerar no solo las emisiones locales, sino también aquellas relacionadas con la cadena de suministro global.

Es esencial llevar a cabo una evaluación minuciosa de los aspectos económicos y ambientales al considerar la transición a tecnologías más respetuosas con el medio ambiente. Los beneficios muy modestos en términos de emisiones evitadas para una ciudad como Quito destacan la necesidad de elaborar de manera debidamente informada las estrategias de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, para privilegiar las acciones que conducen a una reducción óptima de éstas. Sin embargo,

aunque la investigación actual revela que el cambio de tecnología no conlleva una contribución significativa a la reducción de las emisiones de CO₂, hay que reconocer los beneficios adicionales del aceite dieléctrico vegetal en términos de sostenibilidad ambiental. Entre estos beneficios, se destacan su origen renovable, su carácter no tóxico. Aunque los beneficios directos en la reducción de emisiones pueden ser limitados, estos aspectos respaldan la adopción de tecnologías más ecológicas, respaldando así un enfoque equilibrado y sostenible hacia la gestión de recursos en el sector eléctrico.

El análisis económico revela que, a medida que se opta por aceite dieléctrico vegetal en lugar de aceite dieléctrico mineral, los costos aumentan significativamente en cada escenario. Este aumento se traduce en considerables diferencias monetarias, siendo más pronunciado en escenarios con un mayor número de transformadores cambiados. El análisis de costo directo, es crucial para evaluar los beneficios ambientales asociados con el uso de aceite dieléctrico vegetal, incluyendo la reducción de emisiones de CO₂.

La decisión final debería basarse en una evaluación integral que considere tanto los aspectos económicos como los impactos ambientales, la sostenibilidad y otros factores relevantes. Por lo expuesto, se deja abierto el estudio económico para futuras investigaciones, con el objetivo de analizar en detalle los costos a largo plazo y los beneficios asociados al uso del aceite vegetal en transformadores.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La sustitución del aceite dieléctrico mineral por aceite vegetal en transformadores eléctricos representa una medida efectiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el Distrito Metropolitano de Quito, aportando a las emisiones que se requieren evitar para el PACQ, se destaca que, si bien la sustitución de transformadores con aceite dieléctrico vegetal puede reducir las emisiones de GEI, los costos asociados aumentan significativamente en comparación con el uso de aceite mineral. Es crucial considerar una evaluación minuciosa de los aspectos económicos y ambientales al planificar esta transición.

Los escenarios planteados, desde una sustitución gradual hasta una sustitución acelerada de transformadores, ofrecen diferentes enfoques para abordar la transición hacia el uso de aceite dieléctrico vegetal.

La sustitución gradual de 700 transformadores al año se considera factible dado que se alinea con la capacidad operativa y logística existente de la Empresa Eléctrica Quito. Aunque puede limitar la reducción inmediata de emisiones de GEI, su implementación gradual facilita la adaptación a los cambios y minimiza posibles impactos negativos en el suministro de energía, lo que lo hace una opción viable a largo plazo. Para el escenario 2 y 3 la reducción de las emisiones incrementa considerablemente, se limita en el factor económico, ya que se sobre sale de la logística de manejo de la Empresa Eléctrica Quito, por lo cual, el escenario, en donde es factible tanto en costos económicos como logísticos es el escenario 1. Con ello se podría dar cumplimiento a las metas que establecidas en el PACQ de Quito.

Si bien los tres escenarios ofrecen oportunidades para reducir las emisiones de GEI mediante la sustitución de aceite dieléctrico mineral por aceite vegetal en transformadores eléctricos en Quito, la factibilidad de cada uno dependerá de la disponibilidad de recursos, la planificación adecuada y la capacidad de adaptación a los cambios necesarios para lograr una transición exitosa hacia nuevas tecnologías.

Recomendaciones

Es prudente advertir sobre la necesidad de ejercer cautela al considerar la sustitución de productos basándose exclusivamente en la métrica de carbono. En este contexto particular, el reemplazo de transformadores puede conllevar costos sustanciales para obtener ganancias modestas en términos de emisiones evitadas. Por lo tanto, se recomienda una evaluación integral que considere medidas de reducción que sean cuantitativamente eficientes para evitar inversiones desproporcionadas con beneficios limitados en la mitigación de emisiones de carbono.

Lista de referencias

- Abigail Samantha, Vega Aguilar, Celia Cristina, Malla Ceferino, Holger Fabrizzio, y Bejarano Copo. “Evidences of climate change in Ecuador”. *Revista Científica Agroecosistemas* 8, n.º 1 (2020): 72-6.
- Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. “Estadística eléctrico ecuatoriano”. *Controlrecursosyenergia*, 2020, n.º 1. <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2021/06/Atlas-2020-baja.pdf>.
- Agencia Europea del Medio Ambiente. *La Unión Europea y el medio ambiente*. Luxemburgo: Comisión Europea, 2015. <https://www.corteidh.or.cr/tablas/28602.pdf>.
- Álvarez, Julio. “Transformadores”, 2009. https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6735/mod_resource/content/1/7_transformador.pdf.
- Andrade, Hernán, Cristhian Arteaga, y Milena Segura. “Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima Colombia”. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 18, n.º 1 (2017): 103-12. doi:10.21930/rcta.vol18.
- Aquino, Diego, y Cristhian Zuñiga, “Diseño y construcción de un transformador monofásico de distribución 15kva tipo tanque para el laboratorio de alta tensión de la UPS-GYE”. Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil Ecuador, 2018. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15473>.
- Batto, Amos B. “La problemática de las emisiones de gases de efecto invernadero en Bolivia”. Bolivia, 2014. <http://unfccc.int/di/DetailedByParty.do>.
- Caballero, Pedro, y Karen Pizarro. “Análisis comparativo de los materiales utilizados en transformadores de distribución sumergidos en aceite vegetal”. Tesis de pregrado, Universidad de la Costa, Sede Colombia, 2017. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/242>.
- Calderón, Amigdael, Juan Pérez, y Ramiro Pérez. “Análisis comparativo del uso de aceite mineral y aceite vegetal en transformadores de distribución”. Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador, Sede Ciudad Universitaria, 2020. <https://ri.ues.edu.sv/21061/1/An%C3%A1lisis%20comparativo%20del%20uso>

%20de%20aceite%20mineral%20y%20aceite%20vegetal%20en%20transformadores%20de%20distribuci%C3%B3n.pdf.

- Calvin, Katherine, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter W. Thorne, Christopher Trisos, & José Romero. “Climate change 2023: AR6 Synthesis Report”. IPCC, 2023. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- Carcedo, Juan, Inmaculada Fernández, Alfredo Ortiz, Fernando Delgado, Carlos J. Renedo, y Carmen Pesquera. “Aging Assessment of Dielectric Vegetable Oils”. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 31, n.º 6 (2015): 1–9. doi:10.1109/MEI.2015.7303258.
- Castaño, John. “Metodología de Gestión Ambiental para Aceite Dieléctrico de Transformador: Análisis del Ciclo de Vida (ACV)”. Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2013. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/21270>.
- Castro, Miguel. *Hacia una matriz energética diversificada en Ecuador*. Quito: CEDA Editorial, 2011.
- Ceballos, José, y Ernesto García. “Análisis técnico del líquido contenido como refrigerante y aislante en transformadores”. Tesis de pregrado, Instituto Politécnico Nacional, Sede México, 2013. <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/12969>.
- Chapman, Stephen. *Máquinas eléctricas*. Ciudad de México: McGraw-Hill, 2012.
- Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. “Primera contribución determinada a nivel nacional para el acuerdo de París bajo la convención marco de Naciones Unidas sobre cambio climático”. Ecuador, marzo de 2019. <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Primera%20NDC%20Ecuador.pdf>.
- Cortines, Felipe. “Análisis comparativo de impactos ambientales de tecnologías de generación eléctrica en un contexto regional mediante análisis de ciclo de vida”. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Sede Santiago de Chile, 2017. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145404>.
- Cubillos, Adela, y Fernando Estenssoro, comps. *Energía y medio ambiente, una ecuación difícil para América Latina: Los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. Santiago de Chile: Universidad Santiago de Chile / Clacso, 2011.

- <https://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/engov/20130827052932/engMAalCubillosEstenssoro.pdf>.
- Cuevas, Phoebe. “Comparative life cycle assessment of biolubricants and mineral based lubricants”. Tesis de posgrado, Universidad de Pittsburgh, 2010. <https://d-scholarship.pitt.edu/6829/>.
- Díaz, Héctor. “Diferencias entre el aceite vegetal vs. aceite mineral para Transformadores”. *Energética Hoy*. 22 de noviembre de 2021. <https://www.energetica hoy.com/post/ventajas-del-aceite-vegetal>.
- Díaz, Josué, José Contreras, y Jesús Ávila. “Aplicación de un éster natural base soya en transformadores”. *EEE Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII)* 38, n.º 1 (2018): 1-6, doi: 10.1109/CONCAPAN.2018.8596519.
- Distrito Metropolitano de Quito. “Plan de acción climática de Quito”. Distrito *Metropolitano de Quito*, 2020. <https://gobiernoabierto.quito.gob.ec/wpcontent/uploads/documentos/quitoparticipa/dmq/Presentaci%C3%B3n%20Asamblea%20de%20Quito.pdf>.
- Ecuador. *Decreto ejecutivo 371*. Registro Oficial 234, Suplemento, 19 de abril de 2018.
- Empresa Eléctrica Quito. “Plan de Expansión 2019-2028”, 2019. <https://www.eeq.com.ec/plan-de-expansion>.
- Enguidanos, Elia. “Estimación de la huella de carbono en el sector del aceite de oliva en la provincia de Toledo”. Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid, Sede Madrid, 2019. <https://oa.upm.es/56931/>.
- Ecuador Ministerio del Ambiente. “Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador”, 2012. www.ambiente.gob.ec.
- Ecuador Ministerio del Ambiente. “Quinto Informe Nacional para el Convenio sobre la Diversidad Biológica”, 2017. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/06/QUINTO-INFORME-BAJA-FINAL-19.06.2015.pdf>
- Ecuador. “Plan Nacional del Buen Vivir”, 2017. <https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2017/09/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>.
- Fang, Xi, Misra Satyajayant, Xue Guoliang, Yang Dejun. “The new and improved power grid: A survey”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14 n.º. 4, 2012. doi: 10.1109/SURV.2011.101911.00087.

- Gallach, Cristina, Leire Pajín, Francisco Zaragoza, Carlos Fernández, José Carretero, Carlos Mataix, Cástor Díaz, Gemma Pinyol, Inmaculada Ballesteros, María Quintero, Teresa Navajas, Ricardo Ibarra, y Vicente Baeza. “Desafíos de la agenda 2030”. *OHCHR*. 2019. https://www.ohchr.org/sites/default/files/Documents/Issues/CulturalRights/Call_ClimateChange/Fundacion-alternativas-3.pdf.
- Gómez, Neffer, Rodrigo Abonia, Hector Cadavid, e Ines Vargas. “Chemical and spectroscopic characterization of a Vegetable oil used as dielectric coolant in distribution Transformers”. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 22, n.º 12 (2011): 2293-303. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532011001200009>.
- Granero, Andrés. “Guía de aplicaciones de la aparata de media tensión”. 25 de enero de 2017. https://imseingenieria.blogspot.com/2017/01/ensayos-dielectricos-de-transformadores.html#google_vignette.
- INELDEC. “Especificaciones técnicas de transformadores”, 2022. <https://ineldec.com/producto/transformador-trifasico-convencional-de-150-kva-rymel-magnetron/>.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). “Derretimiento de Glaciares”, 2018. <https://www.inamhi.gob.ec/>.
- Instituto Meteorológico Nacional. “Factores de emisión de gases de efecto invernadero”, 2020. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-decima-edicion-2020/>.
- IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- IEA. Digitalization & Energy. International Energy Agency, Paris, France, 2017.
- Jurado, Mario y Mercado Iván. “Emisiones de gases de efecto invernadero: ¿Las ecotecnologías, soluciones a un problema ambiental?”, 2010. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3440824>.
- Leiva, Esperanza. “Análisis de Ciclo de Vida” Madrid 2016. <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/80958/analisis-de-ciclo-de-vida>
- Lippiatt, Barbara. “NISTIR 7423 Building for environmental and economic sustainability technical manual and user guide”, 2007. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=60000EQ6.TXT>.

- Mang, Theo. *Lubricants and lubrication*. Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Editorial, 2007.
- Meira, Matias, Raúl Álvarez, Leonardo Catalano, Cristian Ruschetti, y Carlos Verucchi. “Gases production in mineral and Vegetable dielectric oils: a critical comparison”. *EEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)* 1, n.º 1 (2018): 1-8. doi: 10.1109/ARGENCON.2018.8646003.
- Mejía, Mario. (2020). Estudio de factibilidad técnico-económica para la implementación de transformadores de distribución.
- Navas, Diego, Héctor Ramírez, y Diego Ibarra. “Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos”. *Redalyc* 16, n.º 1 (2012): 201-23.
- Pérez, Pedro. *Transformadores de distribución*. México: Reverté Editorial, 2008.
- Pérez, Sandra, y José López. *Transformadores eléctricos*. Colombia: UTP Editorial, 2018
- Pichs-Madruga, Ramón, Ottmar Edenhofer, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Patrick Eickemeier, Patrick Matschoss, Gerrit Hansen, Susanne Kadner, Steffen Schlömer, Timm Zwickel, Christoph, von Stechow. “Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático”, 2011. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf.
- Podestá, Andrea, María Silvina, Rubén Lisperguer, y René Pavez. “Políticas de atracción de inversiones para el financiamiento de la energía limpia en América Latina”. *Cepal*, 2022. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48084-politicas-atraccion-inversiones-financiamiento-la-energia-limpia-america-latina>
- Rebolledo, Guissela. “Evaluación de la viabilidad técnica y económica de la utilización del aceite dieléctrico vegetal como sustituyente del aceite dieléctrico mineral en transformadores de distribución nuevos y usados en las empresas municipales de Cali”. Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Occidente, Sede Colombia, 2014. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/5819/T03826.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Reinoso, Paulina. “Obstáculos a la transición energética en Ecuador: El caso de la generación eléctrica a partir de fuentes fotovoltaicas”. Tesis de posgrado, Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, 2023. <https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/9311>.

- Rodríguez, Josué. “Análisis de gases disueltos en el líquido aislante de un transformador a escala: Comparación entre un aceite vegetal y un aceite minera”. Tesis de posgrado, Tecnológico de Monterrey, 2009. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/569403>.
- Rodríguez, Miguel. “Transformadores”, 2012. <https://personales.unican.es/rodrigma/pdfs/trafos.pdf>
- Sánchez, Jacqueline. “Evaluación técnica y ambiental de la sustitución de lubricantes minerales por biolubricantes en las plantas hidroeléctricas Reventazón, Angostura y Río Macho”. Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Cartago, 2019. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/10872>
- Sánchez, Luis, y Orlando Reyes. “Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe”. *Cepal*, 2015. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39781-medidas-adaptacion-mitigacion-frente-al-cambio-climatico-america-latina-caribe>.
- Sanz, Francisco. “Herramienta de diagnóstico para evaluar el estado de aceites dieléctricos biodegradables”. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2017. <https://oa.upm.es/52153/>.
- Secretaría Nacional del Agua (Senagua). “Plan de control”, 2019. <https://www.gob.ec/senagua>.
- Trujillo, Juan. “Estado del avance sobre los compromisos de reducción de emisiones en el sector transporte: Un análisis sobre las ciudades de Quito, Bogotá y Lima”. Tesis posgrado, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, FLACSO Ecuador, 2022. <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/18517>.
- Uribe, Eduardo. “El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina”. *Cepal*, 2019. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39855-cambio-climatico-sus-efectos-la-biodiversidad-america-latina>.
- Zuñiga, Cristhian, y Juan Morales. “Eficiencia y rendimiento de transformadores de distribución eléctrica considerando las propiedades dieléctricas de refrigerantes de origen vegetal y mineral”. Tesis de posgrado, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil, 2022. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23679>.

ANEXOS

Cálculos de emisiones

Tabla 16
Cálculo de las emisiones por el cambio a aceite dieléctrico vegetal escenario 1 (700/año)

| Año | Factor de cambio | Transformadores a ser reemplazados | Litros de aceite por equipo | Litros de aceite | Representación de Emisiones aceite mineral TCO2 | Representación de Emisiones aceite vegetal TCO2 | Emisiones evitadas TCO2 |
|------|------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------|---|---|-------------------------|
| 2024 | 700 | 700 | 122 | 85.400 | 97 | 13 | 84 |
| 2025 | 700 | 1.400 | 122 | 170.800 | 183 | 15 | 168 |
| 2026 | 700 | 2.100 | 122 | 256.200 | 269 | 16 | 253 |
| 2027 | 700 | 2.800 | 122 | 341.600 | 355 | 18 | 337 |
| 2028 | 700 | 3.500 | 122 | 427.000 | 440 | 19 | 421 |
| 2029 | 700 | 4.200 | 122 | 512.400 | 526 | 21 | 505 |
| 2030 | 700 | 4.900 | 122 | 597.800 | 612 | 22 | 589 |
| 2031 | 700 | 5.600 | 122 | 683.200 | 697 | 24 | 673 |
| 2032 | 700 | 6.300 | 122 | 768.600 | 783 | 26 | 758 |
| 2033 | 700 | 7.000 | 122 | 854.000 | 869 | 27 | 842 |
| 2034 | 700 | 7.700 | 122 | 939.400 | 955 | 29 | 926 |
| 2035 | 700 | 8.400 | 122 | 1.024.800 | 1.040 | 30 | 1.010 |
| 2036 | 700 | 9.100 | 122 | 1.110.200 | 1.126 | 32 | 1.094 |
| 2037 | 700 | 9.800 | 122 | 1.195.600 | 1.212 | 33 | 1.179 |
| 2038 | 700 | 10.500 | 122 | 1.281.000 | 1.298 | 35 | 1.263 |
| 2039 | 700 | 11.200 | 122 | 1.366.400 | 1.383 | 36 | 1.347 |
| 2040 | 700 | 11.900 | 122 | 1.451.800 | 1.469 | 38 | 1.431 |
| 2041 | 700 | 12.600 | 122 | 1.537.200 | 1.555 | 39 | 1.515 |
| 2042 | 700 | 13.300 | 122 | 1.622.600 | 1.640 | 41 | 1.599 |
| 2043 | 700 | 14.000 | 122 | 1.708.000 | 1.726 | 43 | 1.684 |
| 2044 | 700 | 14.700 | 122 | 1.793.400 | 1.812 | 276 | 1.768 |

$$EAM = 1.003,84 \frac{gCO_{2eq}}{Litros} * 700 * 122 Litros * \frac{1t}{1000000g} = 85,728tCO_{2eq} + 11,596tCO_2 = \mathbf{97,32 tCO_2}$$

$$EAV = 18,10 \frac{gCO_{2eq}}{Litros} * 700 * 122 Litros * \frac{1t}{1000000g} = 1,546tCO_{2eq} + 11,596tCO_2 = \mathbf{13,14tCO_2}$$

Tabla 17
Cálculo de las emisiones por el cambio a aceite dieléctrico vegetal escenario 2 (1.400/año)

| Año | Factor de cambio | Transformadores a ser reemplazados | Litros de aceite por equipo | Litros de aceite | Representación de Emisiones aceite mineral TCO2 | Representación de Emisiones aceite vegetal TCO2 | Emisiones evitadas TCO2 |
|------|------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------|---|---|-------------------------|
| 2024 | 1400 | 1.400 | 122 | 170.800 | 183 | 15 | 168 |
| 2025 | 1400 | 2.800 | 122 | 341.600 | 355 | 18 | 337 |
| 2026 | 1400 | 4.200 | 122 | 512.400 | 526 | 21 | 505 |
| 2027 | 1400 | 5.600 | 122 | 683.200 | 697 | 24 | 673 |
| 2028 | 1400 | 7.000 | 122 | 854.000 | 869 | 27 | 842 |
| 2029 | 1400 | 8.400 | 122 | 1.024.800 | 1.040 | 30 | 1.010 |
| 2030 | 1400 | 9.800 | 122 | 1.195.600 | 1.212 | 33 | 1.179 |
| 2031 | 1400 | 11.200 | 122 | 1.366.400 | 1.383 | 36 | 1.347 |
| 2032 | 1400 | 12.600 | 122 | 1.537.200 | 1.555 | 39 | 1.515 |
| 2033 | 1400 | 14.000 | 122 | 1.708.000 | 1.726 | 43 | 1.684 |
| 2034 | 1400 | 15.400 | 122 | 1.878.800 | 1.898 | 46 | 1.852 |
| 2035 | 1400 | 16.800 | 122 | 2.049.600 | 2.069 | 49 | 2.020 |
| 2036 | 1400 | 18.200 | 122 | 2.220.400 | 2.241 | 52 | 2.189 |
| 2037 | 1400 | 19.600 | 122 | 2.391.200 | 2.412 | 55 | 2.357 |
| 2038 | 1400 | 21.000 | 122 | 2.562.000 | 2.583 | 58 | 2.525 |
| 2039 | 1400 | 22.400 | 122 | 2.732.800 | 2.755 | 61 | 2.694 |
| 2040 | 1400 | 23.800 | 122 | 2.903.600 | 2.926 | 64 | 2.862 |
| 2041 | 1400 | 25.200 | 122 | 3.074.400 | 3.098 | 67 | 3.031 |
| 2042 | 1400 | 26.600 | 122 | 3.245.200 | 3.269 | 70 | 3.199 |
| 2043 | 1400 | 28.000 | 122 | 3.416.000 | 3.441 | 73 | 3.367 |
| 2044 | 1400 | 29.400 | 122 | 3.586.800 | 3.612 | 77 | 3.536 |

$$EAM = 1.003,84 \frac{gCO_{2eq}}{Litros} * 1.400 * 122 Litros * \frac{1t}{1000000g} = 171,45tCO_{2eq} + 11,596tCO_2 = \mathbf{183,05 tCO_2}$$

$$EAV = 18,10 \frac{gCO_{2eq}}{Litros} * 1.400 * 122 Litros * \frac{1t}{1000000g} = 3,092tCO_{2eq} + 11,596tCO_2 = \mathbf{14,68tCO_2}$$

Tabla 18
Cálculo de las emisiones por el cambio a aceite dieléctrico vegetal escenario 3 (200/año)

| Año | Factor de cambio | Transformadores a ser reemplazados | Litros de aceite por equipo | Litros de aceite | Representación de Emisiones aceite mineral TCO2 | Representación de Emisiones aceite vegetal TCO2 | Emisiones evitadas TCO2 |
|------|------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------|---|---|-------------------------|
| 2024 | 700 | 700 | 122 | 85.400 | 97 | 13 | 84 |
| 2025 | 200 | 900 | 122 | 109.800 | 122 | 14 | 108 |
| 2026 | 400 | 1.300 | 122 | 158.600 | 171 | 14 | 156 |
| 2027 | 600 | 1.900 | 122 | 231.800 | 244 | 16 | 228 |
| 2028 | 800 | 2.700 | 122 | 329.400 | 342 | 18 | 325 |
| 2029 | 1000 | 3.700 | 122 | 451.400 | 465 | 20 | 445 |
| 2030 | 1200 | 4.900 | 122 | 597.800 | 612 | 22 | 589 |
| 2031 | 1400 | 6.300 | 122 | 768.600 | 783 | 26 | 758 |
| 2032 | 1600 | 7.900 | 122 | 963.800 | 979 | 29 | 950 |
| 2033 | 1800 | 9.700 | 122 | 1.183.400 | 1.200 | 33 | 1.167 |
| 2034 | 2000 | 11.700 | 122 | 1.427.400 | 1.444 | 37 | 1.407 |
| 2035 | 2200 | 13.900 | 122 | 1.695.800 | 1.714 | 42 | 1.672 |
| 2036 | 2400 | 16.300 | 122 | 1.988.600 | 2.008 | 48 | 1.960 |
| 2037 | 2600 | 18.900 | 122 | 2.305.800 | 2.326 | 53 | 2.273 |
| 2038 | 2800 | 21.700 | 122 | 2.647.400 | 2.669 | 60 | 2.610 |
| 2039 | 3000 | 24.700 | 122 | 3.013.400 | 3.037 | 66 | 2.970 |
| 2040 | 3200 | 27.900 | 122 | 3.403.800 | 3.428 | 73 | 3.355 |
| 2041 | 3400 | 31.300 | 122 | 3.818.600 | 3.845 | 81 | 3.764 |
| 2042 | 3600 | 34.900 | 122 | 4.257.800 | 4.286 | 89 | 4.197 |
| 2043 | 3800 | 38.700 | 122 | 4.721.400 | 4.751 | 97 | 4.654 |
| 2044 | 4000 | 42.700 | 122 | 5.209.400 | 5.241 | 106 | 5.135 |

$$EAM = 1.003,84 \frac{gCO_{2eq}}{Litros} * 700 * 122 Litros * \frac{1t}{1000000g} = 85,728tCO_{2eq} + 11,596tCO_2 = \mathbf{97,32 tCO_2}$$

$$EAV = 18,10 \frac{gCO_{2eq}}{Litros} * 700 * 122 Litros * \frac{1t}{1000000g} = 1,546tCO_{2eq} + 11,596tCO_2 = \mathbf{13,14tCO_2}$$