

## Mobility and Energy Efficiency in the Public Transportation System of Ecuador a Mechanism to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions

### Movilidad Eléctrica y Eficiencia Energética en el Sistema de Transporte Público del Ecuador un Mecanismo para Reducir Emisiones de CO<sub>2</sub>

L. Paredes<sup>1</sup>M. Pozo<sup>2</sup><sup>1</sup> Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan - CONICET, San Juan, Argentina

E-mail: lparedes@iee.unsj.edu.ar

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

E-mail: marcelo.pozo@epn.edu.ec

#### Abstract

The aim and focus of this document is to continue with the development and advance of a predecessor work in relation to the theme of the public transport system of Continental Ecuador and the environmental benefits and in terms of energy efficiency that the country will incur with technological migration of diesel buses through systems based on electric mobility through electric buses, in three different scenarios of occurrence. The methodology has been developed in conjunction with the projections of demand for electric power that will be incurred by the National Interconnected System (SNI) due to the application of an electric mobility system through electric buses in the public passenger transportation service. Subsequently, an analysis of the calculation and evaluation of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions due to the diesel bus fleet is established, as well as the evaluation of CO<sub>2</sub> emissions from the Ecuadorian SNI with its fossil fuel-based thermal generation component once the buses have been technologically changed to electric mobility, in the period 2019-2025. The results reveal the reduction of CO<sub>2</sub> emissions to the environment due to the technological migration towards an electromobility system for public passenger transport even considering the premise that the Ecuadorian electricity sector has considerable participation of thermal power plants in its electricity supply matrix.

#### Resumen

El objetivo y enfoque de este documento es continuar con el desarrollo y avance de un trabajo predecesor en lo referente a la temática del sistema de transporte público del Ecuador Continental y los beneficios medioambientales y en términos de eficiencia energética que incurrirá el país con la migración tecnológica de autobuses diésel por sistemas basados en movilidad eléctrica a través de autobuses eléctricos, en tres distintos escenarios de ocurrencia. La metodología ha sido desarrollada en concomitancia de las proyecciones de demanda de energía eléctrica que incurrirá el Sistema Nacional Interconectado (SNI) debido a la aplicación de un sistema de movilidad eléctrica a través de autobuses eléctricos en el servicio de transportación pública de pasajeros. Posteriormente, se establece un análisis de cálculo y evaluación de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) debidas al parque automotor de autobuses diésel, así como también, la evaluación de emisiones de CO<sub>2</sub> del SNI ecuatoriano con su componente de generación térmica basado en combustibles fósiles una vez que se haya cambiado tecnológicamente los autobuses a movilidad eléctrica, en el período 2019-2025. Los resultados revelan la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente debido a la migración tecnológica hacia un sistema de electromovilidad para el transporte público de pasajeros aún teniendo en consideración la premisa de que el sector eléctrico ecuatoriano disponga una participación considerable de centrales de generación térmica en su matriz de oferta de energía eléctrica.

**Index terms**— Electric Mobility, Energy Efficiency, Electric Buses, Technology Migration, CO<sub>2</sub> Emissions.

**Palabras clave**— Movilidad Eléctrica, Eficiencia Energética, Autobuses Eléctricos, Migración Tecnológica, Emisiones de CO<sub>2</sub>.

Recibido: 14-10-2019, Aprobado tras revisión: 20-01-2020

Forma sugerida de citación: Paredes, L.; Pozo, M. (2020). "Movilidad Eléctrica y Eficiencia Energética en el Sistema de Transporte Público del Ecuador un Mecanismo para Reducir Emisiones de CO<sub>2</sub>". Revista Técnica "energía". No. 16, Issue II, Pp. 91-99

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2020 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



## 1. INTRODUCCIÓN

La Ley Orgánica de Eficiencia Energética (LOEE), se encuentra en vigencia desde el pasado 2019-03-19 una vez que ha sido publicada en el suplemento número 449 del Registro Oficial del gobierno ecuatoriano. Con base en este marco legal, se ha realizado el análisis para evaluar los beneficios que incurrirá el Ecuador Continental (EC) con el cambio en el Sistema de Transporte Público del Ecuador (STPE) de tecnologías asociadas a la combustión de energéticos de origen fósil hacia autobuses cuya tracción sea a través de sistemas eléctricos o también llamado movilidad eléctrica y sus implicancias desde el punto de vista de Eficiencia Energética (EE) y de Medio Ambiente (MA) a través de las reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero y particularmente anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera.

El Ecuador cuenta con una población aproximada de diecisiete millones de habitantes [1],[2]. De esta población el 60% aproximadamente hace uso del STPE para el desenvolvimiento de sus actividades diarias. En la actualidad, mayoritariamente los autobuses del STPE utilizan como energético principal el diésel para el sistema de tracción motriz de los motores de combustión interna, a excepción de una pequeña participación a nivel país del sistema Trolebús de la ciudad de Quito que funciona parcialmente con energía eléctrica [3].

Acorde a lo manifestado en [4], el índice de cobertura eléctrica del Ecuador para el año 2018 fue de 97,05%, destacándose este índice como uno de los mejores posicionados en términos de cobertura de electricidad en la región Latinoamérica. Lo que muestra el desarrollo y crecimiento sostenido del Sector Eléctrico Ecuatoriano (SEE). Es así que, se parte de la premisa hipotética que en términos de oferta y demanda desde el punto de vista energético el SEE estará en capacidad de suplir el recambio tecnológico, en concordancia a los escenarios expuestos en el Plan Maestro de Electricidad 2016-2025 [5].

Teniendo en consideración lo establecido en la LOEE, donde se menciona que a partir del año 2025, los vehículos que se incorporen al servicio de transporte público urbano e interparroquial en el Ecuador continental, deberán ser únicamente de medio motriz eléctrico [6]. En concomitancia a los resultados mostrados y publicados en [7]. En este trabajo se efectúan análisis de tipo comparativo en términos de consumo energético, medidas de EE y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al MA que se obtendrían debidas a la migración tecnológica de autobuses diésel por electromovilidad a través autobuses eléctricos para el STPE en consideraciones de diferentes escenarios de penetración.

El presente documento está organizado de la siguiente manera. En primera instancia se presenta el

marco jurídico vigente entorno a EE en el transporte, MA y situación del SEE. Posteriormente, se presenta la metodología de análisis empleada. Subsecuentemente, se muestran los comparativos y resultados de los diferentes escenarios en torno al cambio tecnológico y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Para finalmente, establecer las conclusiones y trabajos futuros que se deriven del análisis realizado.

## 2. MARCO JURÍDICO

### 2.1. Medio Ambiente

En consideración que los artículos 15 y 413 de la Constitución de la República del Ecuador ordena que el Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas renovables no contaminantes, diversificadas y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua. *Ibidem* el artículo 27 ordena que la educación se centrada en el ser humano y garantizará su derecho holístico, en el marco del respeto a los derechos humanos, el medio ambiente sustentable y a la democracia. Adicionalmente, el numeral 27 del artículo 66 de la Carta Magna, determina el derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza. El artículo 395 de la Constitución de la República del Ecuador reconoce los siguientes principios ambientales: i. El Estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras. ii. Las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional. iii. El Estado garantizará la participación activa y permanente de las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades afectadas, en la planificación, ejecución y control de toda actividad que genere impactos ambientales. iv. En caso de duda sobre el alcance de las disposiciones legales en materia ambiental, estas se aplicarán en el sentido más favorable a la protección de la naturaleza. El artículo 414 de la Constitución de la República del Ecuador describe que el Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo [8].

En concordancia a lo estipulado en el Código Orgánico del Ambiente, capítulo III: Medidas Mínimas para Adaptación y Mitigación, artículo 261, numerales: 6, 8, 9 y 10: “La cuantificación de la emisión de gases



de efecto invernadero, según los sectores priorizados y la promoción de las acciones de mitigación El impulso a la implementación de acciones preventivas y de control sobre las enfermedades derivadas de los efectos del cambio climático. La promoción y el fomento de programas de eficiencia energética, dentro de toda la cadena, así como el establecimiento de incentivos económicos y no económicos de energías renovables convencionales y no convencionales. El fomento de medios de transporte sostenibles y bajos en emisiones de gases de efecto invernadero” [9].

## 2.2. Eficiencia Energética

Tomando en consideración la LOEE en referencia a lo estipulado en el capítulo III, artículo 14, para lo cual se denomina Eficiencia Energética en el transporte, la cual se cita textualmente: “El transporte público, de carga pesada y de uso logístico por medios eléctricos se priorizará como medida de eficiencia energética en la planificación pública. Los proyectos se podrán ejecutar como iniciativas públicas o de asociaciones público privadas. El Ministerio rector de la política de transporte, y con aprobación del CNEE, establecerá de forma progresiva los límites en niveles de consumo y emisiones que deberán cumplir los vehículos automotores nuevos de cualquier tipo, que se comercialicen en el país. Esta política será definida como parte del PLANEE. Una política especial se desarrollará para el transporte terrestre y marítimo de las islas Galápagos. Para la comercialización de cualquier tipo de vehículo nuevo, éste contará y exhibirá con claridad la etiqueta de eficiencia energética que informe al consumidor sobre el cumplimiento de los límites y condiciones de eficiencia energética. El Gobierno Nacional a través de los ministerios competentes, crearán un plan de chatarrización para los vehículos de trabajo de personas naturales y del transporte público que salgan de servicio y que se reemplacen por vehículos de medio motriz eléctrico. Los GAD podrán en el ámbito de sus competencias establecer planes de chatarrización. A partir del año 2025 todos los vehículos que se incorporen al servicio de transporte público urbano e interparroquial, en el Ecuador continental, deberán ser únicamente de medio motriz eléctrico. En el caso de la región Insular, esta medida será evaluada por el CNEE. El rector de las políticas públicas de hidrocarburos incorporará dentro de su planificación y como anexo al PLANEE las políticas y acciones necesarias para garantizar la calidad de los combustibles necesaria para que se cumpla con la mejora progresiva de la eficiencia, niveles de consumo y emisiones en vehículos automotores. Además, incluirá también, las políticas necesarias para el fomento de la producción y consumo de biocombustibles a nivel nacional, así como las políticas, mecanismos e infraestructura necesaria para promover la movilidad eléctrica” [6].

## 3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada se resume en el diagrama de flujo mostrado en la Fig. 1.

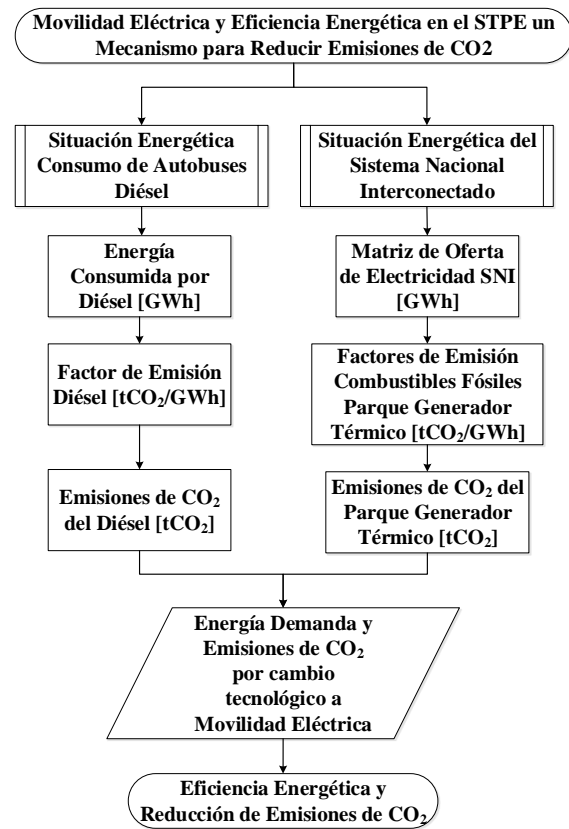


Figura 1: Diagrama de Flujo de la Metodología Empleada

## 4. SITUACIÓN ENERGÉTICA DEL SECTOR DE TRANSPORTE PÚBLICO EN EL ECUADOR CONTINENTAL

Según el último Balance Energético Nacional que data del 2017 [10], la demanda de todos los energéticos en el país se ha incrementado en un 43,8% durante el periodo de análisis de once años (2007-2017), pasando de 63 millones de Barriles Equivalentes de Petróleo (BEP, 1BEP= 0,0016282 GWh) en el año 2007 a 86,2 millones de BEP para el año 2017. En concordancia con la tendencia histórica del consumo energético del Ecuador, el sector transporte ha sido el mayor demandante de energía, con un valor promedio de 34 millones de BEP en el periodo de análisis.

El consumo energético total multisectorial en el Ecuador para el 2017, fue de 86 245 kBEP (140 424,11 GWh). En términos porcentuales, el sector de mayor consumo fue el de transporte con 52,39%, seguidos por el consumo energético de electricidad con 17,22%, el sector industrial con 14,90%, el sector residencial con 14,12% y otros sectores en general con 1,47% [10], tal como se muestra en la Fig. 2.

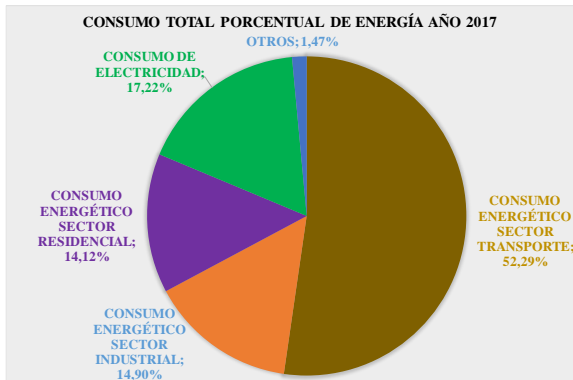


Figura 2: Consumo Total Porcentual de Energía multisectorial para el año 2017

Al año 2017 el sector del transporte tuvo la mayor participación en la demanda energética del Ecuador. Es decir, este sector ha tenido una representatividad considerable en lo que respecta a la importación de derivados del petróleo, en términos comparativos del año 2007 con respecto al año 2017 las importaciones de estos energéticos para suplir la demanda han aumentado en 50,1%. Desglosando el consumo de este sector, para el año 2017 se puede apreciar que el diésel es el de mayor representatividad con un 32,93% y el de naftas, gasolinas y otros derivados un consumo del 19,36% de todo el consumo energético del país.

Al ser los combustibles fósiles los de mayor requerimiento en la demanda en el mix energético del Ecuador, el diésel y la gasolina han sido las fuentes energéticas de mayor consumo, llegando a tasas porcentuales de incremento de 44% y de 77% respectivamente, en el periodo analizado del balance energético. El consumo de diésel para el sector del transporte al 2017, fue de 28 398 kBEP (46 237,62 GWh) que, en unidades volumétricas representa 1 190 935 miles de galones. De los cuales el 56% fueron a través de importaciones y un 44% correspondió a producción nacional [10]. Al desagregar el consumo del sector transporte por tipo de vehículo para el 2017, el transporte terrestre tuvo una participación en la demanda del 94% de todo este sector. A continuación, en la Fig. 3, se presenta la desagregación por tipo de transporte.

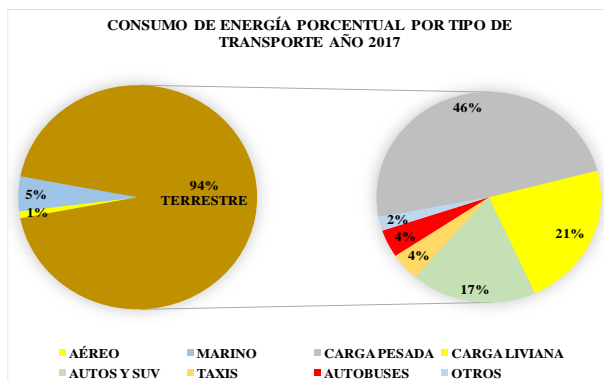


Figura 3: Consumo de Energía Porcentual por Tipo de Transporte año 2017

De esta composición porcentual para el sector los autobuses representan el 4% del consumo energético total [3],[10].

#### 4.1. Sistema de Transporte Público de Autobuses del Ecuador

En concordancia con los resultados obtenidos en [7], en la Tabla 1, se presentan los tres escenarios energéticos de análisis del presente trabajo, donde se considera una participación del 25%, 50% y 100% de conversión tecnológica anual del parque de autobuses diésel por autobuses basados en sistemas de movilidad eléctrica amparados en lo que estipula la normativa legal en [6].

Tabla 1: Consumo energético de autobuses eléctricos en tres escenarios de ingreso al sistema de transporte público de pasajeros [7]

Año	ESCENARIO 1			ESCENARIO 2			ESCENARIO 3		
	25%	Diésel [GWh]	Eléctrico [GWh]	50%	Diésel [GWh]	Eléctrico [GWh]	100%	Diésel [GWh]	Eléctrico [GWh]
2019	7 380	511	119	14 759	1 022	237	29 519	2 044	475
2020	13 347	924	215	23 004	1 593	370	31 248	2 164	503
2021	18 255	1 264	294	27 991	1 938	450	32 978	2 283	531
2022	22 368	1 549	360	31 349	2 171	504	34 707	2 403	558
2023	25 885	1 792	416	33 893	2 347	545	36 437	2 523	586
2024	28 955	2 005	466	36 030	2 495	580	38 167	2 643	614
2025	31 691	2 194	510	37 963	2 628	611	39 896	2 762	642
Resto	95 072	6 583	1 530	37 963	2 628	611	0	0	0

Las proyecciones de demanda eléctrica anual que corresponden a los autobuses eléctricos en los diferentes escenarios de análisis se muestran en la Fig. 4.

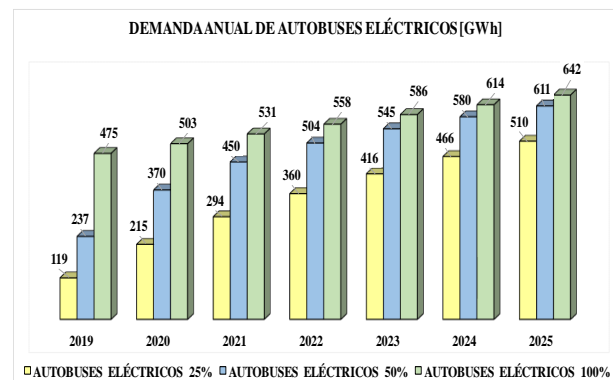


Figura 4: Proyección de Demanda Anual de Electricidad debida al Ingreso de Autobuses Eléctricos, período 2019-2025

#### 5. SITUACIÓN ENERGÉTICA DEL SECTOR DE ELÉCTRICO EN EL ECUADOR

Al año 2018, la energía eléctrica bruta total producida por el parque generador del SNI fue 25 375,92 GWh, cuya participación energética por tipo de tecnología corresponde así: hidráulica 20 661,59 GWh, biomasa 382,44 GWh, eólica 73,71 GWh, biogás 45,52 GWh, solar fotovoltaica 34,77 GWh y térmica 4 177,89



GWh [4]. Ésta última tiene una participación porcentual por tipo de combustible de la siguiente manera: fuel oil 4-6 11,43%, gas natural 3,55%, diésel 0,54% y otros combustibles fósiles 0,95%. Es decir la generación térmica representa el 16,46% del SNI [11]. En la Fig. 5, se muestra la participación porcentual de todo el parque generador de energía eléctrica para el SNI ecuatoriano.

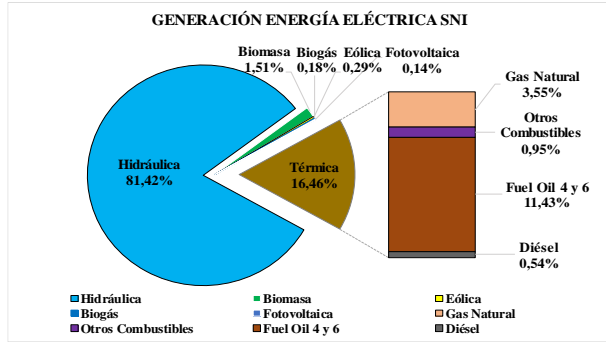


Figura 5: Participación Porcentual Parque Generador SNI

Cabe mencionar que las proyecciones de demanda debidas a los autobuses eléctricos que se plantearon en la sección 4.1, servirá de insumo para analizar los escenarios de demanda de todo el sector electricidad para cada uno de los años hasta el 2025, en los escenarios establecidos con anterioridad.

### 5.1. Escenario de Proyección de Demanda de Electricidad SNI, período 2019-2025

Tomando en consideración la hipótesis número dos expuesta en [5], mediante la cual se exponen proyecciones de demanda eléctrica en relación a varios sectores demandantes, únicamente se hace mención que el sector transporte demandará electricidad en los proyectos: Metro de Quito, Tranvía de Cuenca y una estimación de proyección de vehículos eléctricos de uso particular. Además, se considera las proyecciones establecidas de la demanda de electricidad hasta el año 2025 guardando concordancia con el alcance del presente estudio. En la Fig. 6, Se exponen las proyecciones de demanda de electricidad para cada año.

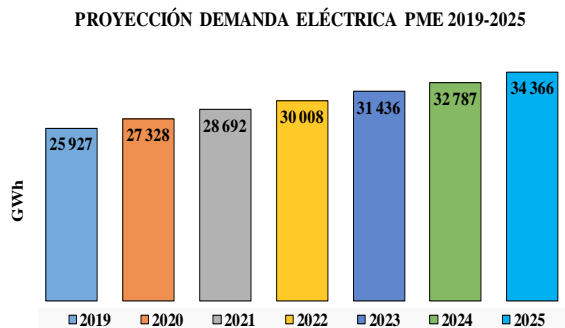


Figura 6: Proyección Demanda Eléctrica SNI PME 2019-2025

Por lo expuesto, a continuación, se presentarán los tres escenarios considerados en relación a la demanda de electricidad en la que incurrirá el sector eléctrico del

Ecuador debido al cambio tecnológico de autobuses diésel por autobuses de movilidad eléctrica.

### 5.2. Escenario 1, 25% de penetración de autobuses eléctricos interanuales

Para el presente escenario, la demanda máxima alcanzada del sistema de movilidad eléctrica a través de autobuses eléctricos obedece a 510 GWh para el año 2025. Lo cual, según las proyecciones energéticas establecidas en el PME 2016-2025 [5], no provocaría un déficit energético en la oferta de energía eléctrica, alcanzando así una demanda total de 34 876 GWh para el año 2025. En la Fig. 7, se muestra las proyecciones interanuales de demanda de electricidad consideradas.

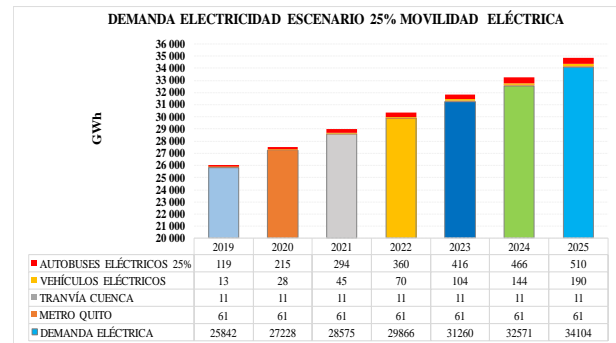


Figura 7: Demanda de Autobuses Eléctricos Escenario 1

### 5.3. Escenario 2, 50% de penetración de autobuses eléctricos interanuales

Para el presente escenario, la demanda máxima alcanzada del sistema de movilidad eléctrica a través de autobuses eléctricos obedece a 611 GWh para el año 2025. Lo cual, según las proyecciones energéticas establecidas en el PME 2016-2025 [5], no provocaría un déficit energético en la oferta de energía eléctrica, alcanzando así una demanda total de 34 997 GWh para el año 2025. En la Fig. 8, se muestra las proyecciones interanuales de demanda de electricidad consideradas.

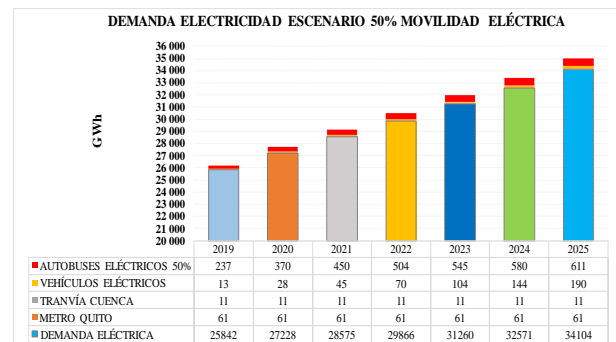


Figura 8: Demanda de Autobuses Eléctricos Escenario 2

### 5.4. Escenario 3, 100% de penetración de autobuses eléctricos interanuales

Para el presente escenario, la demanda máxima alcanzada del sistema de movilidad eléctrica a través de



autobuses eléctricos obedece a 611 GWh para el año 2025. Lo cual, según las proyecciones energéticas establecidas en el PME 2016-2025 [5], no provocaría un déficit energético en la oferta de energía eléctrica, alcanzando así una demanda total de 34 977 GWh para el año 2025. En la Fig. 9, se muestra las proyecciones interanuales de demanda de electricidad consideradas.

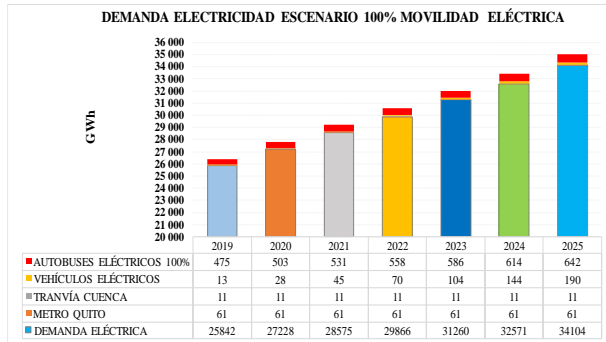


Figura 9: Demanda de Autobuses Eléctricos Escenario 3

## 6. CÁLCULO DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

### 6.1. Emisiones de CO<sub>2</sub> debidas al Parque Generador Térmico del Sistema Nacional Interconectado

El insumo metodológico para evaluar las emisiones de CO<sub>2</sub> del parque generador del SNI ecuatoriano guarda concordancia con la metodología ACM0002 expuesta en [12],[13]. En correspondencia a lo mostrado en la Fig. 5, la generación de electricidad de mayor participación es la hidráulica con el 81,42%, de acuerdo a la clasificación de ACM0002 este tipo de generación se considera de bajo costo. Por lo que, de las diferentes opciones de evaluación y cálculo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y particularmente CO<sub>2</sub> en este trabajo se utiliza el Método Margen de Operación Simple Ajustado, en concomitancia al acceso a la información del sistema de generación del SNI en términos de energía anual y el tipo de combustibles empleados para el parque térmico. Por lo tanto, la focalización principal de este trabajo será la evaluación de las emisiones del parque generador térmico del SNI, con la consideración hipotética de que los porcentajes de participación por tipo de combustible dentro del mix energético de generación de energía eléctrica es invariante en el periodo de análisis. En la Tabla 2 se muestra el tipo de combustible fósil empleado en el parque generador térmico, así como también, su respectivo coeficiente de poder calorífico neto y factor de emisión [13],[14].

Tabla 2. Combustibles Fósiles del Parque Generador del SNI

Tipo de Combustible Parque Generador	Poder Calorífico Neto [TJ/1000t]	Factor de Emisión [tCO <sub>2</sub> /GWh]
Diésel	41,8	261,36
Fuel Oil 4	39,8	271,80
Fuel Oil 6	39,7	263,88
Gas Natural	46,5	195,48
Nafta	41,8	249,48

Bunker	39,7	263,88
--------	------	--------

A través de (1) se procedió a evaluar las emisiones de CO<sub>2</sub> en toneladas equivalentes debidas al parque generador del SNI [12].

$$eCO_{2\text{totales}} = \sum_{k,i} [FE_{k,i} \cdot E_{k,i}] \quad (1)$$

Donde:

$eCO_{2\text{totales}}$ : son las emisiones de CO<sub>2</sub> totales debidas al parque generador térmico del SNI [tCO<sub>2</sub>].

$FE_{k,i}$ : es el Factor de Emisión del combustible k, para el periodo i [tCO<sub>2</sub>/GWh].

$E_{k,i}$ : energía producida por el combustible k, para el periodo i [GWh].

Por lo tanto, las toneladas equivalentes de emisiones de CO<sub>2</sub>, para el parque generador del SNI en el periodo de evaluación se muestran en la Tabla 3 y Fig. 10.

Tabla 3. Emisiones Totales del Parque Generador del SNI

Año	Emisiones t CO <sub>2</sub>
2019	1 086 601
2020	1 145 317
2021	1 202 482
2022	1 257 635
2023	1 317 483
2024	1 374 103
2025	1 440 279

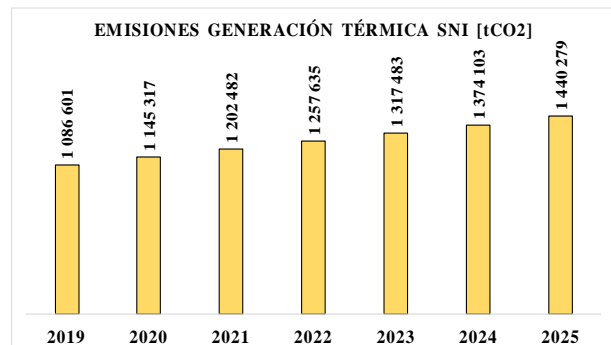


Figura 10: Emisiones Generación Térmica SNI, período 2019-2025

### 6.2. Emisiones de CO<sub>2</sub> del Sistema de Transporte Público de Pasajeros del Ecuador Continental.

Para determinar el Factor de Emisión (FE) asociado a la combustión del energético diésel para el STPE que utiliza el energético fósil diésel se ha sido considerado 2,61 kgCO<sub>2</sub>/l según lo señalado en [14]. Adicionalmente, se realiza conversiones de unidades físicas teniendo en cuenta que el poder calorífico inferior del diésel tipo Euro III es 35,86 MJ/l [15]. En (2), se estable el FE<sub>D</sub> para los autobuses diésel a ser considerados en los distintos escenarios de este trabajo.

$$FE_D = \frac{2,61 \text{ kg CO}_2}{1 \cdot 35,86 \frac{\text{MJ}}{\text{T}} \cdot \frac{277,78 \cdot 10^{-9} \text{ GWh}}{1 \text{ MJ}}} = 262,02 \frac{\text{t CO}_2}{\text{GWh}} \quad (2)$$

Donde:

$FE_D$ : es el Factor de Emisión del diésel tipo Euro III [tCO<sub>2</sub>/GWh].

La cantidad de toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> que se emitiesen a la atmósfera debida al parque automotor del STPE se calcula acorde a (3) [16], partiendo en primera instancia del escenario donde no haya migración tecnológica de diésel hacia movilidad eléctrica, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4 y Fig. 11.

$$eCO_{2D,i} = \sum_i [FE_{D,i} \cdot E_{D,i}] \quad (3)$$

Donde:

$eCO_{2D,i}$ : son las emisiones de CO<sub>2</sub> totales debidas al consumo de diésel Euro tipo III del STPE, para el periodo  $i$  [tCO<sub>2</sub>].

$E_{D,i}$ : energía consumida por autobuses diésel, para el periodo  $i$  [GWh].

Tabla 4. Emisiones CO<sub>2</sub> Autobuses Diésel.

Año	Total Buses	Energía GWh	Emisiones t CO <sub>2</sub>
2019	29 519	2 044	535 513
2020	31 248	2 164	566 891
2021	32 978	2 283	598 270
2022	34 707	2 403	629 648
2023	36 437	2 523	661 027
2024	38 167	2 643	692 405
2025	39 896	2 762	723 783

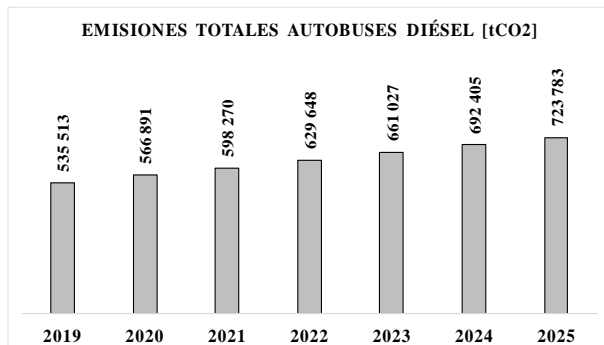


Figura 11: Emisiones Totales Autobuses Diésel, período 2019-2025.

### 6.3. Emisiones de CO<sub>2</sub> Movilidad Eléctrica Sistema de Transporte Público de Pasajeros del Ecuador Continental, escenario 1 – 25% penetración

En relación a lo expuesto en las secciones 6.1 y 6.2, en la Fig. 12, se muestra la evolución en términos de emisión de toneladas CO<sub>2</sub> para el escenario de 25% de migración tecnológica de autobuses diésel hacia autobuses eléctricos. Además, se presentan las emisiones de CO<sub>2</sub> propias del SNI.

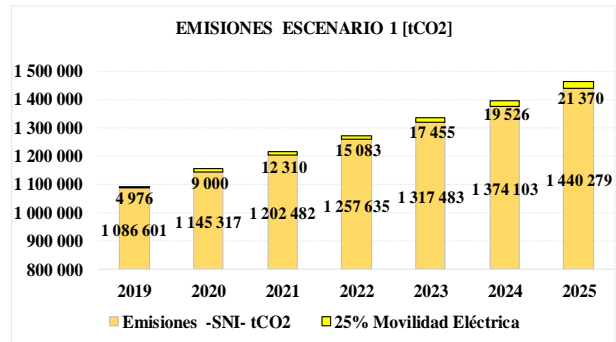


Figura 12: Emisiones Totales Toneladas CO<sub>2</sub> Escenario 1

### 6.4. Emisiones de CO<sub>2</sub> Movilidad Eléctrica Sistema de Transporte Público de Pasajeros del Ecuador Continental, escenario 2 – 50% penetración

En relación a lo expuesto en las secciones 6.1 y 6.2, en la Fig. 13, se muestra la evolución en términos de emisión de toneladas CO<sub>2</sub> para el escenario de 50% de migración tecnología de autobuses diésel hacia autobuses eléctricos. Además, se presentan las emisiones de CO<sub>2</sub> propias del SNI.

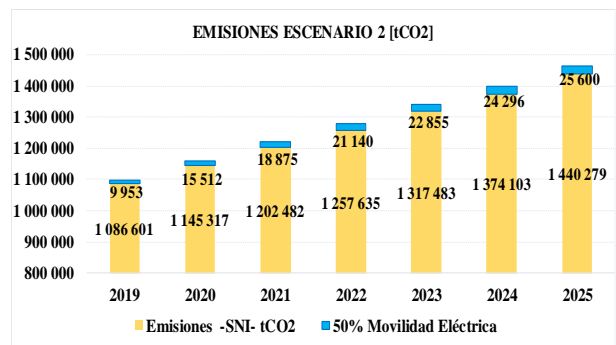


Figura 13: Emisiones Totales Toneladas CO<sub>2</sub> Escenario 2

### 6.5. Emisiones de CO<sub>2</sub> Movilidad Eléctrica Sistema de Transporte Público de Pasajeros del Ecuador Continental, escenario 3 – 100% penetración

En relación a lo expuesto en las secciones 6.1 y 6.2, en la Fig. 14, se muestra la evolución en términos de emisión de toneladas CO<sub>2</sub> para el escenario de 100% de migración tecnológica de autobuses diésel hacia autobuses eléctricos. Además, se presentan las emisiones de CO<sub>2</sub> propias del SNI.

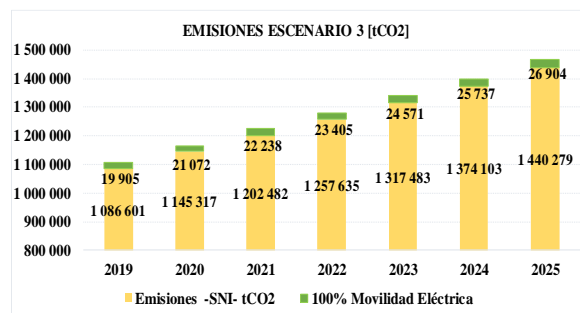


Figura 14: Emisiones Totales Toneladas CO<sub>2</sub> Escenario 3



### 6.6. Comparativo de emisiones multiescenario e interanual, periodo 2019-2025

Toda vez que se ha mostrado los resultados obtenidos de los tres escenarios de evaluación en lo que respecta a la cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub> que se emiten a la atmosfera y su considerable reducción en términos de emisión debida a la migración tecnología hacia sistemas basados en eficiencia energética y movilidad eléctrica, en la Fig. 15, se muestra la gráfica comparativa de las emisiones en toneladas de CO<sub>2</sub> para el STPE siendo parte de la demanda de energía eléctrica del SNI.

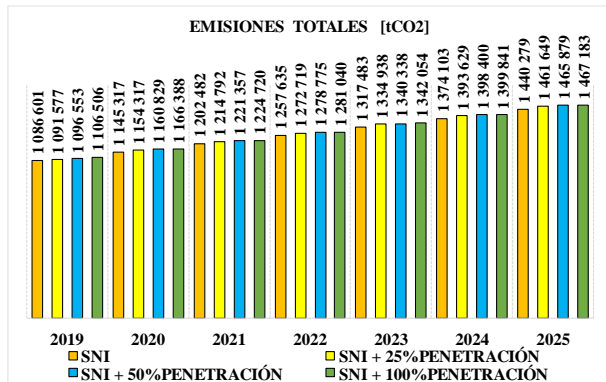


Figura 15: Emisiones Totales Multiescenario, periodo 2019-2025

### 6.7. Comparativo de emisiones debidas autobuses diésel versus emisiones debidas al cambio tecnológico de autobuses eléctricos

En la Fig. 16, se muestra los resultados comparativos en relación a la cantidad de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> que se emitiesen anualmente debidas a los autobuses diésel del STPE, así como también, la cantidad de emisiones que se producirían al incorporar los sistemas de movilidad eléctrica a la matriz energética de electricidad del SNI, para los tres escenarios analizados.

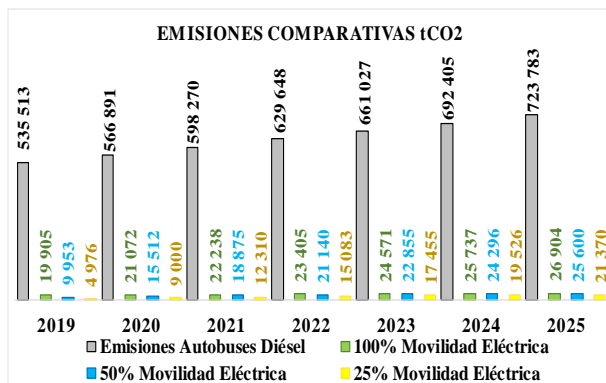


Figura 16: Emisiones Totales Toneladas CO<sub>2</sub> Escenario 3

Para el escenario de 100% de migración tecnológica a electromovilidad, en términos comparativos de emisiones de la tecnología diésel versus autobuses eléctricos, se puede determinar que para el período analizado con movilidad eléctrica se alcanzaría un

96,28% de reducción promedio en emisiones de CO<sub>2</sub>.

En la Fig. 17, se muestra comparativamente los niveles de emisiones en toneladas de CO<sub>2</sub>, primeramente, teniendo en cuenta las emisiones emanadas por los autobuses diésel más las emisiones producidas por el parque generador térmico del SNI. Seguidamente, se muestra las emisiones totales producidas por el SNI considerando la demanda propia de electricidad más la incorporación del 100% de migración tecnológica a movilidad eléctrica. Es notoria la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> para todo el período analizado.

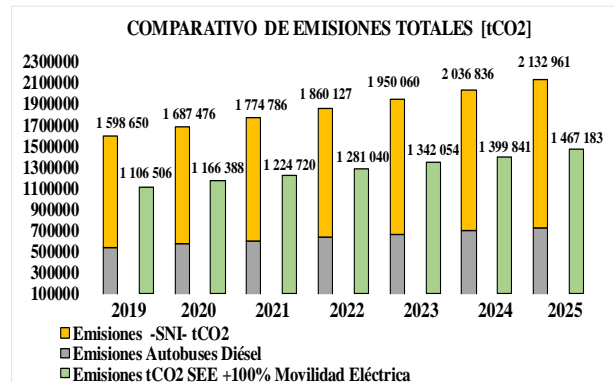


Figura 17: Emisiones Comparativas SNI + Autobuses Diésel versus Sistema de Movilidad Eléctrica

## 7. CONCLUSIONES

La legislación ecuatoriana en los sectores eléctrico, de medio ambiente y con la incorporación reciente de la ley de eficiencia energética brindan un sustento legal que permita agilizar los mecanismos de factibilidad para la migración y/o incorporación sustentable de los sistemas de movilidad eléctrica en el STPE.

Los autobuses eléctricos al ser más eficientes en términos de consumo y aprovechamiento de energía, permiten reducir el consumo de combustibles fósiles, particularmente diésel en el sector transporte, siendo este el de mayor participación en la matriz de energéticos del Ecuador, lo que permitiría un ahorro económico al Estado debido a la importación de este combustible.

En los tres escenarios mostrados se demuestra que, en términos de oferta de la matriz de generación de energía eléctrica del Ecuador, no habrá déficit energético aun teniendo en consideración una penetración del 100% de autobuses eléctricos para el STPE.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> que en la actualidad produce el parque automotor de autobuses diésel, representa en términos comparativos el 49,28% de las emisiones de la generación térmica del SNI sin la demanda de movilidad eléctrica. Para el escenario 3 de máxima migración tecnológica hacia electromovilidad, la reducción de emisiones de dióxido de carbono igual a





635 778 tCO<sub>2</sub> lo que representa un 31,21% de reducción de emisiones inclusive teniendo en cuenta las emisiones producidas por el parque generador térmico del SNI. Con la migración tecnológica hacia sistemas basados en movilidad eléctrica para el STPE se ha demostrado las mejoras en términos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente y de eficiencia energética.

Como trabajos futuros se plantea continuar con el análisis de demanda eléctrica debida a los sistemas de electromovilidad teniendo en cuenta las restricciones de los sistemas de transmisión y distribución y otros escenarios de generación térmica en el SNI.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Censos - INEC, "Proyección Cantonal Total 2010-2020." p. 1, 2016.
- [2] El Comercio, "La población del Ecuador superó 17 millones de habitantes," Quito, 13-Oct-2018.
- [3] INEC, "Estadística del Anuario de Transporte 2017." 2018.
- [4] Agencia de Regulación y Control de Electricidad - ARCONEL, "Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2018," 2019.
- [5] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, "Plan Maestro de Electricidad 2016-2025," 2017.
- [6] Asamblea Nacional República del Ecuador, "Ley Orgánica de Eficiencia Energética." 2019.
- [7] L. A. Paredes, "Electromovilidad y Eficiencia Energética en el Transporte Público de Pasajeros del Ecuador Continental" Rev. Técnica "energía," vol. 16, no. I, pp. 91–100, 2019.
- [8] Asamblea Nacional República del Ecuador, "Constitución de la República del Ecuador," no. 449. pp. 1–129.
- [9] Asamblea Nacional República del Ecuador, "Código Orgánico del Ambiente Del Ecuador," no. 983. pp. 1–68, 2017.
- [10] Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables., "Balance Energético Nacional 2017," 2019.
- [11] Operador Nacional de Electricidad CENACE, "Informe Anual 2018," 2019.
- [12] L. Haro and J. Oscullo, "Factor Anual de Emisión de CO<sub>2</sub> Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, Mediante la Aplicación de la Metodología de la Convención Marco Sobre el Cambio Climático UNFCCC, para el Periodo 2009-2014," Rev. Politécnica, vol. 37, no. 1, 2016.
- [13] Ministerio del Ambiente República del Ecuador,

"Factor de Emisión de CO<sub>2</sub> del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador," 2013.

- [14] Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Cambio Climático, "Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)," 2011.
- [15] R. Edwards, J.-F. Larive, V. Mahieu, and P. Rounveiolles, "Well-to-wheels Analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context," 2007.
- [16] J. Oscullo, "Evolución de las Emisiones de CO<sub>2</sub> Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador para el Periodo 2010-2015," Rev. Técnica "energía," vol. 13, pp. 191–195, 2017.



**Luis Angel Paredes.** – Nació en Quito, Ecuador en 1987. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2012 y de Magíster en Gestión de Energías en 2016. Además, ha realizado varios cursos y especializaciones en temáticas de energía eléctrica en Estados Unidos, China, Perú, Chile y Brasil. Su experiencia profesional ha sido desarrollada en varias empresas e instituciones del sector eléctrico y energético del Ecuador. Actualmente es candidato a Doctor en Ingeniería Eléctrica (Ph.D.) del Instituto de Energía Eléctrica (IEE) de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) en Argentina. Sus campos de investigación están relacionados con: Resiliencia de los Sistemas Eléctricos, Estabilidad y Control en Microrredes Eléctricas, FACTS, Electromovilidad, Energías Renovables y Eficiencia Energética.



**Marcelo Pozo.** – Nació en Quito, Ecuador. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. En 2002 obtuvo el título de Master en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Dresden-Alemania. A partir de septiembre del 2009 se desempeña como Profesor Principal a tiempo completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI) de la EPN. Entre 2010 y 2015 realizó su Doctorado en Ingeniería en la Universidad de Siegen-Alemania, especializándose en Electrónica de Potencia y Control Electrónico de Máquinas Eléctricas. Sus áreas de interés son: Electrónica de Potencia, Control Electrónico Industrial y de Máquinas Eléctricas, Calidad y Uso Eficiente de la Energía, Control y Conversión Estática a partir de Fuentes de Energía Alternativas, Regenerativas y Renovables, Smart Grids, Sistemas de Transporte y Movilidad Eléctricos.