

# Probabilistic Assessment and Risk Management of Grid Loadability due to the Quito City Subway Commissioning considering Electric Trains Stochastic Movement

## Evaluación Probabilística y Gestión del Riesgo de la Cargabilidad de la Red por la Puesta en Servicio del Metro de Quito considerando el Movimiento Estocástico de los Trenes Eléctricos

A. J. Riofrío<sup>1</sup> M. S. Chamba<sup>1</sup> J. Cepeda<sup>2</sup> Y. Lecaro<sup>3</sup> F. Chimarro<sup>3</sup> M. Mora<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CELEC EP Unidad de negocio Coca Codo Sinclair  
E-mail: [augusto.riofrio@celec.gob.ec](mailto:augusto.riofrio@celec.gob.ec); [marlon.chamba@celec.gob.ec](mailto:marlon.chamba@celec.gob.ec)

<sup>2</sup>Operador Nacional de Electricidad, CENACE  
E-mail: [jcepeda@cenace.org.ec](mailto:jcepeda@cenace.org.ec)

<sup>3</sup>Empresa Pública Metropolitana Metro de Quito, EPMMQ  
E-mail: [yirabel.lecaro@metrodequito.gob.ec](mailto:yirabel.lecaro@metrodequito.gob.ec); [franklin.chimarro@metrodequito.gob.ec](mailto:franklin.chimarro@metrodequito.gob.ec); [miguel.mora@metrodequito.gob.ec](mailto:miguel.mora@metrodequito.gob.ec)

### Abstract

This paper presents a methodological proposal to assess the effects of the Quito City Subway's mobile loads (electric trains) over the Empresa Eléctrica Quito's electric grid. This proposal, based on Monte Carlo simulation, allows generating random operation scenarios for mass electric transportation systems considering movement, energy consumption, and operating conditions for electric trains. This method gauges probabilistic power flows using probability density functions (PDFs). In the same way, it computes risk indexes to measure the minimum or maximum expected values of loadability characterizing factors, such as equipment loading, voltage profiles, among others taking into account a defined degree of confidence.

**Index terms**— Probabilistic power flow, uncertainty, risk index, risk management, Monte Carlo, underground railway system.

### Resumen

El presente artículo propone una metodología para evaluar el impacto de las cargas móviles (trenes eléctricos) del sistema eléctrico del Metro de Quito en la red de la Empresa Eléctrica Quito. Esta metodología, basada en simulación de Montecarlo, permite la generación aleatoria de escenarios de operación de transporte masivo considerando: el desplazamiento, consumo de energía y condiciones de operación de los trenes eléctricos. La propuesta metodológica permite la evaluación probabilística de flujos de potencia mediante funciones de densidad de probabilidad (PDF por sus siglas en inglés); y adicionalmente, propone el cálculo de índices de riesgo para medir, dado un grado de confianza, los mínimos o máximos valores esperados de nivel de carga, voltaje, entre otros factores que caracterizan el nivel de cargabilidad de una red.

**Palabras clave**— Flujo de potencia probabilístico, incertidumbre, riesgo, Montecarlo, sistema férreo subterráneo.

Recibido: 15-10-2018, Aprobado tras revisión: 09-01-2019

Forma sugerida de citación: Riofrío, J.; Chamba, M.; Cepeda, J. (2019). "Evaluación Probabilística y Gestión del Riesgo de la Cargabilidad de la Red por la Puesta en Servicio del Metro de Quito considerando el Movimiento Estocástico de los Trenes Eléctricos". Revista Técnica "energía". No. 15, Issue II, Pp. 1-11

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

© 2019 Operador Nacional de Electricidad, CENACE

## 1. INTRODUCCIÓN

La masificación en el uso de los automóviles particulares ha llevado a las grandes ciudades a enfrentar graves problemas de congestión vehicular y medioambientales. En el caso del Distrito Metropolitano de Quito, la municipalidad está trabajando en la implementación de medidas amigables con el medio ambiente que permitan mejorar la circulación vehicular mediante el uso masivo del transporte público [1] [2].

Bajo este antecedente, a partir del año 2012 se planificó la construcción del primer sistema de movilidad eléctrica subterráneo en Ecuador, denominado: “Metro de Quito” (MQ). La primera línea de este sistema cuenta con una distancia aproximada de 22 kilómetros desde Quitumbe (extremo sur) hasta El Labrador (extremo norte) [3]. Adicionalmente, la primera etapa del “Metro de Quito” contará con 15 estaciones de pasajeros equitativamente distribuidas a lo largo del recorrido. Se estima que el tiempo de movilización para un recorrido completo, desde el Sur al Norte, será de aproximadamente 34 minutos; lo cual representa un considerable ahorro de tiempo para los pasajeros en comparación con los actuales sistemas de transporte (alrededor de 2 horas) [3] [4].

El sistema eléctrico del “Metro de Quito” se constituye por subsistemas de fuerza, mecánico, eléctrico y electrónico de alta complejidad, que permiten integrar los sistemas de alimentación con el equipamiento de tracción y los controladores [5]. Generalmente, estos subsistemas son diseñados y/o adquiridos por separado, sin considerar una modelación integral que permita comprender la operación del sistema. La modelación de estos subsistemas constituye una forma confiable de evaluar su desempeño y minimizar riesgos frente a posibles escenarios de operación que podrían no cumplir con los índices de calidad y seguridad.

El modelamiento de los sistemas de movilidad en redes eléctricas presenta la particularidad del desplazamiento de la carga (tren eléctrico) a lo largo de un recorrido establecido. En la Fig.1 se muestra didácticamente el desplazamiento de un tren desde un punto inicial ( $P_0$ ) hasta un punto final ( $P_f$ ), donde se observa la característica particular del tren eléctrico de moverse y conectarse en diferentes puntos de una red eléctrica, cambiando el punto de suministro de potencia/energía a lo largo de su recorrido. Además del desplazamiento del tren, es importante y necesario considerar la variación de la demanda de los trenes eléctricos, cuyo valor depende de: a) las condiciones de operación (aceleración, velocidad fija, frenado), b) las características de las vías (pendientes, peralte, entre otras), y c) el peso a transportar (número de pasajeros y horas de operación).

Estas características de la carga provocan cambios instantáneos en los flujos de potencia, nivel de armónicos y comportamiento dinámico de los sistemas eléctricos provocando, por ejemplo, cambios en los niveles de carga de los equipos, disminución de los voltajes en las barras, transitorios, entre otros. Por lo tanto, la estimación del consumo de energía de los sistemas eléctricos de movilidad constituye una de las variables de entrada más importantes para el análisis estacionario y dinámico del sistema eléctrico. Para ello, es necesario incluir las características físicas y eléctricas de los equipos que conforman los sistemas eléctricos de tracción.

Generalmente, el impacto de la inclusión de sistemas eléctricos de movilidad ha sido evaluado mediante flujos de potencia. En [6] se muestra un enfoque tradicional de evaluación de flujos de potencia y cargabilidad de la red, considerando a los trenes eléctricos como una carga estática invariante en el tiempo y el espacio. En este caso, los resultados son deterministas y no permiten evaluar el impacto real del desplazamiento de los trenes, ni el efecto de la variación de su demanda sobre el sistema eléctrico. Por otra parte, en [7], [8] y [9] se utilizan flujos de potencia probabilísticos resueltos mediante métodos matemáticos directos o iterativos como Montecarlo para la evaluación de sistemas eléctricos. No obstante, estas metodologías no son aplicadas en sistemas reales, ni tampoco evalúan posibles riesgos operativos de los sistemas.

Bajo este contexto, y con el propósito de mejorar el enfoque de las propuestas antes mencionadas, el presente trabajo realiza una modelación en detalle del sistema eléctrico del Metro de Quito (sistema de movilidad real próximo a entrar en operación) desarrollada en PowerFactory de DIGSILENT. Posteriormente, se propone una metodología de simulación estocástica aplicando el método de Montecarlo (controlada a través de las opciones de Python scripting), cuyos resultados son finalmente analizados usando criterios de gestión de riesgo.

La modelación estructurada considera: 1) alimentación/conexión con el sistema de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), 2) modelación de las subestaciones de tracción y rectificación AC/DC, 3) modelación de las catenarias en corriente directa DC, y 4) sistema de rectificación y alimentación de material rodante. La metodología propuesta, basada en simulación de Montecarlo, para la generación aleatoria de escenarios de operación de sistemas eléctricos de transporte masivo, considera las características propias del desplazamiento de la carga y sus condiciones de operación. Ésta es aplicada al modelo desarrollado en PowerFactory para evaluar múltiples escenarios

de demanda del Metro de Quito.

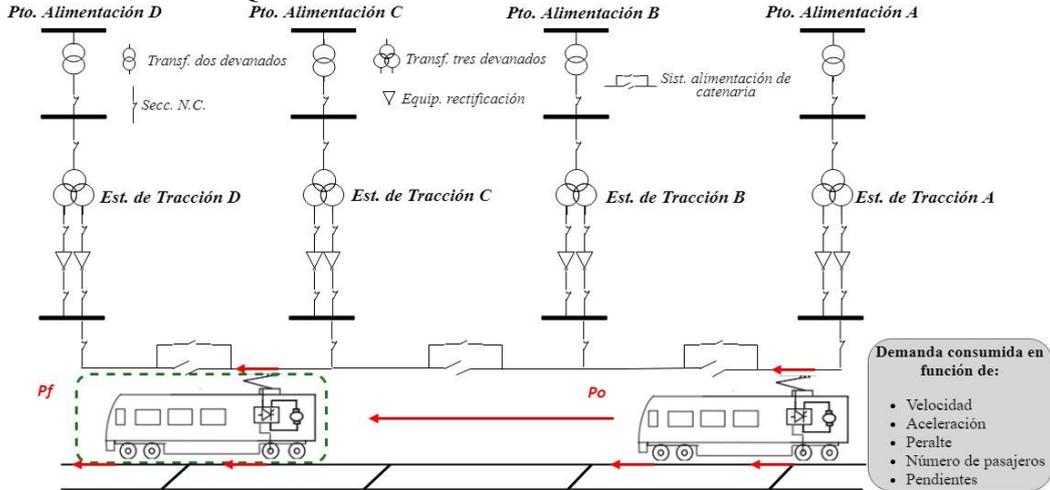


Figura 1: Particularidades de los sistemas de movilidad eléctrica

Los resultados presentados están enfocados en la evaluación de la calidad de voltaje y nivel de carga de los equipos del sistema eléctrico (cargabilidad de la red), cuyos datos se analizan probabilísticamente mediante PDFs e índices de gestión de riesgo.

El resto de este trabajo está estructurado de la siguiente manera: la sección II muestra el estado del arte detallado de la modelación estacionaria de sistemas eléctricos ferroviarios. En la sección III se describe la modelación del equipamiento eléctrico del Metro de Quito. La sección IV describe la metodología propuesta, mientras que en la sección V se usa el modelo desarrollado para evaluar la metodología propuesta. Finalmente, las conclusiones alcanzadas aparecen en la sección VI.

## 2. MODELACIÓN ESTACIONARIA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS FERROVIARIOS

El estudio de flujo de potencia es un análisis matemático aplicado a sistemas eléctricos de potencia (SEP) en estado estacionario [10], cuyos resultados permiten estudiar acciones para asegurar niveles de voltaje y corriente dentro márgenes predefinidos ante la inclusión de ciertos tipos cargas [11]. Sin embargo, la inclusión de generación y cargas variables (cargas especiales) en los sistemas eléctricos ha cambiado el enfoque de estos estudios con la inclusión de modelos estocásticos que representen con la mayor exactitud posible este tipo de comportamientos [12] [13]. La resolución de estos modelos se realiza mediante un flujo de potencia probabilístico que constituye un método macro estadístico que puede integrar, mediante funciones de densidad de probabilidad, las variaciones de la demanda, fallas de generación y transmisión, entre otras variables con incertidumbre [7].

La evaluación de sistemas eléctricos ferroviarios mediante flujos de potencia ha sido ampliamente utilizado; por ejemplo, en [14] se propone una variación del flujo de potencia denominada forward/backward sweep (FBS), el cual evalúa los sistemas férreos (alimentados en AC) calculando el esfuerzo de tracción de cada tren y asociándolo a su consumo energético.

Por otro lado, en [8] se utiliza un flujo de potencia probabilístico para evaluar el nivel de carga de subestaciones de tracción aplicando un estimador de densidad variable tipo kernel. Adicionalmente, en [9] se aplican flujos de potencia probabilísticos en sistemas férreos considerando las posiciones de los trenes mediante la simulación de Montecarlo.

Bajo este antecedente, el sistema eléctrico del Metro de Quito ha sido previamente modelado en algunos trabajos con la finalidad de verificar la viabilidad técnica del proyecto y evaluar el impacto sobre las redes de distribución. En [4] se desarrolla una proyección del consumo energético del sistema ferroviario utilizando un software especializado usado previamente para la modelación de carga del Metro de Santiago. Con estos datos se determina la cantidad y características técnicas del equipamiento eléctrico, así como también la topología de la red eléctrica de la línea 1 del Metro de Quito. Sin embargo, en este trabajo aún no son consideradas las condiciones de explotación del Metro de Quito considerando la movilidad de los trenes eléctricos.

Complementariamente, en [6] se evalúa el impacto en la calidad de suministro de energía que provoca la inclusión del sistema eléctrico del Metro de Quito en la red eléctrica de la EEQ. Para ello, se realiza el análisis estático de flujos de potencia y flujo de armónicos del sistema considerando una demanda promedio para los trenes y servicios

auxiliares. Si bien este trabajo presenta una buena aproximación a la topología real del Metro de Quito, no se contempla la modelación completa del material rodante considerando el movimiento de los trenes eléctricos. Además, el modelo desarrollado no considera el control electrónico sobre los motores de tracción de los trenes, el cual es muy importante para la posterior evaluación de la respuesta dinámica del sistema.

### 3. MODELACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO “METRO DE QUITO”

El sistema eléctrico del Metro de Quito es modelado en el software PowerFactory considerando información actualizada de diseño y construcción, cuyas características se detallan a continuación.

#### 3.1. Subestaciones de interconexión con la EEQ

En la Tabla 1 se muestran los datos de las cuatro subestaciones de interconexión modeladas. Actualmente, las subestaciones Eugenio Espejo, Chilibulo y Vicentina se encuentran en operación; mientras que, la subestación Nuevo Bicentenario entrará en operación en el año 2019 para alimentar al Metro de Quito y futuras cargas del sector norte de la ciudad de Quito.

En la Tabla 2 se muestran las características de los alimentadores modelados, los cuales interconectan las subestaciones de la EEQ con las subestaciones de tracción (SET) del sistema eléctrico del Metro de Quito (Quitumbe, La Magdalena, Universidad Central y El Labrador).

**Tabla 1: Características de subestaciones de la EEQ que alimentarán el Metro de Quito**

Subestaciones (S/E)	Nivel de voltaje [kV]	Potencia [MVA]	No. Transf.	No. Aliment.
Eugenio Espejo	138/22,8	33	3	2
Chilibulo	138/22,8	33	3	2
Vicentina	138/22,8	33	2	1
Nuevo Bicentenario	138/22,8	33	2	1

**Tabla 2: Características de los circuitos de alimentación - Metro de Quito**

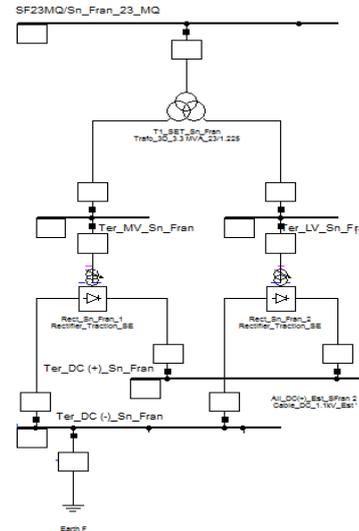
Recorrido	Nivel de voltaje [kV]	Tipo Conductor	Distancia [km]
S/E Eu. Espejo hacia cocheras y SET Quitumbe	22,8	Al 750 [MCM]	2,3
S/E Chilibulo hacia SET La Magdalena	22,8	Al 750 [MCM]	2
S/E Vicentina hacia SET Un. Central	22,8	Al 750 [MCM]	3,5
S/E Nuevo Bicentenario hacia SET el Labrador	22,8	Al 750 [MCM]	0,5

#### 3.2. Subestaciones de tracción

Las 11 subestaciones de tracción del Metro de Quito permiten reducir y rectificar el voltaje para suministrar energía a los dispositivos eléctricos y

electrónicos del material rodante.

La Fig.2 muestra el esquema de una subestación de tracción modelada en PowerFactory, la cual consta de: transformador de tracción de 22,8 kV (AC) a 1,225 kV (AC), grupos transformadores-rectificadores de 1,225 kV (AC) a 1,5 kV (DC), barras de corriente continua y sistemas de puesta a tierra.



**Figura 2: Subestaciones de tracción “Metro de Quito” modelada en PowerFactory de DgSILENT**

Las características técnicas de los transformadores y rectificadores modelados se muestran en las Tablas 3 y 4, respectivamente. Los transformadores de tracción modelados corresponden a transformadores de tres devanados de clase VI utilizados específicamente en aplicaciones ferroviarias, mientras que los grupos de transformación-rectificación están formados por dos rectificadores conectados en paralelo del tipo puente de graetz.

**Tabla 3: Características técnicas transformadores de tracción - Metro de Quito**

Potencia [MVA]	3,3/1,650-1,650
Voltaje [kV]	22,8/1,225-1,225
Grupo de conexión	Dd0dy11
Tomas de ajuste de tensión primario [%]	+/-2,5 +5 +7,5%
Máxima tensión del sistema AT/BT-BT [kV]	24/3,6-3,6
Impedancia de cortocircuito [%]	8
Pérdidas en vacío [kW]	7
Frecuencia [Hz]	60
Clase	VI

**Tabla 4: Características técnicas transformadores-rectificadores - Metro de Quito**

Tipo	Doble Puente Graetz, trifásico (DB)
Tipo de diodo	Diodo de disco de avalancha controlada.
Potencia [MW]	3
Voltaje [kV]	1,5
Corriente [kA]	2,28
Clase	VI

### 3.3. Sistema de alimentación de trenes

En la Fig. 3 se muestran los elementos modelados en PowerFactory, donde se incluyen barras, seccionadores y cables para simular el sistema de catenaria rígida y el sistema de puesta a tierra que alimentan a los trenes eléctricos.

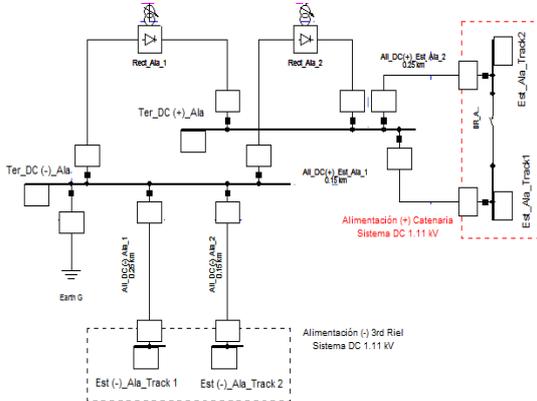


Figura 3: Sistema de alimentación de trenes en PowerFactory de DIgSILENT

En las Tabla 5 y 6 se presentan los datos técnicos de los conductores de alimentación y catenaria, respectivamente.

Tabla 5: Datos técnicas cables de alimentación a trenes - Metro de Quito

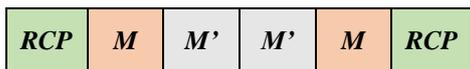
Número de núcleos	1
Sección Transversal [mm <sup>2</sup> ]	400
Resistencia- DC (a 20° C) [mΩ/km]	77,80
Resistencia- DC (a 60° C) [mΩ/km]	90,3
Tipo	Al XLPE
Corriente [kA]	0,821

Tabla 6: Datos técnicos cables de catenaria riel de alimentación a trenes - Metro de Quito

Sección Transversal [mm <sup>2</sup> ]	AlMgSi 2300 Cu 150
Resistencia- DC (a 20° C) [mΩ/km]	13,628
Resistencia- DC (a 60° C) [mΩ/km]	15,754
Tipo	AlMgSi y Cu
Corriente [kA]	3,423

### 3.4 Material rodante (trenes eléctricos)

La primera etapa de funcionamiento del metro planifica la incorporación de 18 trenes, de los cuales 16 estarán operativos en vía y los 2 restantes permanecerán en la zona de talleres y cocheras en Quitumbe. La configuración de los trenes consta de 6 vagones dispuestos de la siguiente manera:



Dónde: *RCP* es un vagón con cabina de conducción ubicado en los extremos, *M* representa a los coches remolque intermedios y *M'* a los vagones motor intermedios. De estos seis vagones solo cuatro son motorizados (*M* y *M'*).

En la Fig. 4 se muestra la modelación del

material rodante en PowerFactory que incluye un convertor tipo PWM (rectificador DC/AC), una carga de potencia constante que simula los consumos de servicios auxiliares dentro del tren (aprox. 106 kW) y los motores de tracción AC (tipo asíncrono, jaula de ardilla).

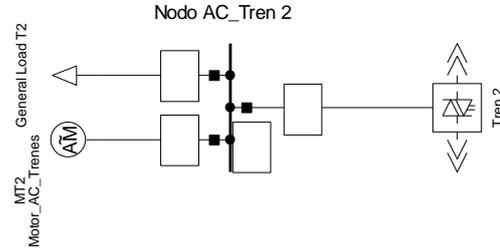


Figura 4: Modelación del material rodante en PowerFactory de DIgSILENT

## 4. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN PROPUESTA

En la Fig. 5 se presenta el esquema de la metodología propuesta para el análisis estacionario y/o dinámico de la penetración de cargas rodantes en las redes de distribución. Esta metodología se sustenta en la interacción de las siguientes tres etapas:

1. **Simulación de Montecarlo** consiste en un procedimiento repetitivo, en el cual, para cada repetición, se evalúa la respuesta de un sistema a través de una función de incertidumbre, utilizando un conjunto de variables de entrada que se generan al azar mediante sus funciones de distribución de probabilidad (PDF), con el fin de obtener valores numéricos aleatorios de salida [15]. En este caso, es utilizado para la generación de escenarios de operación, mediante la variación aleatoria de la demanda (ubicación, velocidad y consumo de energía de los trenes eléctricos).
2. **Simulación estacionaria y/o dinámica** de cada escenario operativo generado. La simulación estacionaria por medio de flujos de potencia y/o flujos de armónicos permite el análisis de la calidad de energía; mientras que, la simulación dinámica permite el análisis del sistema en el dominio del tiempo ante eventos de aceleración y frenado de los trenes eléctricos.
3. **Evaluación probabilística y gestión del riesgo** mediante resultados de PDFs y cálculo de índices de gestión de riesgo.

La interacción entre las etapas antes descritas se realiza mediante una herramienta computacional, especialmente diseñada, que combina programación en Python con la modelación de sistemas eléctricos en PowerFactory de DIgSILENT.



A continuación, se detallan las etapas de la metodología propuesta para el análisis estático del sistema eléctrico del Metro de Quito.

**Etapa 1: Simulación de Montecarlo**

En esta etapa, mediante simulación de Montecarlo, se generan múltiples escenarios de operación que simulan los cambios aleatorios de la carga (trenes eléctricos) del sistema Metro de Quito. Para ello, se utiliza una matriz de datos de entrada que contiene la información de distancia recorrida versus la potencia consumida por un tren eléctrico a lo largo del recorrido completo (Sur-Norte-Sur).

Esta matriz de datos es obtenida mediante un software de simulación ferroviaria, propiedad de Construcciones y Auxiliares de Ferrocarriles (CAF) [16], misma que considera diferentes prestaciones de servicio, tales como: velocidad, número de pasajeros, desniveles de la vía, entre otras características.

Adicionalmente, y también como datos de entrada, es necesario contar con los sistemas eléctricos del “Metro de Quito” y la EEQ modelados en PowerFactory con sus respectivos escenarios de expansión y demanda.

Los datos descritos anteriormente son importados al programa Python, donde, por medio de programación, se realizan aleatoriamente cambios topológicos y de operación para cada escenario operativo “i” construido a partir del Montecarlo.

Python es un lenguaje de programación basado en intérpretes que no necesita ningún compilador para utilizar la API de C++. Los scripts de Python pueden usarse directamente en PowerFactory o utilizarse para ejecutar la aplicación en modo “engine” y controlarla desde una aplicación externa.

Luego, como se esquematiza en la Fig. 6, para cada escenario “i” se definen aleatoriamente los trenes en operación y sus posiciones a lo largo del recorrido. Con esta posición, dentro de la matriz *distancia recorrida versus potencia* se busca el consumo (MW) del tren eléctrico, cuyo valor es asignado a los motores de tracción.

En PowerFactory se ha modelado un tren eléctrico por cada tramo entre estaciones de pasajeros tanto en el sentido sur-norte como norte-sur; por lo tanto, el modelo cuenta con 28 trenes a fin de contemplar todas las posibles ubicaciones de los trenes a lo largo del recorrido.

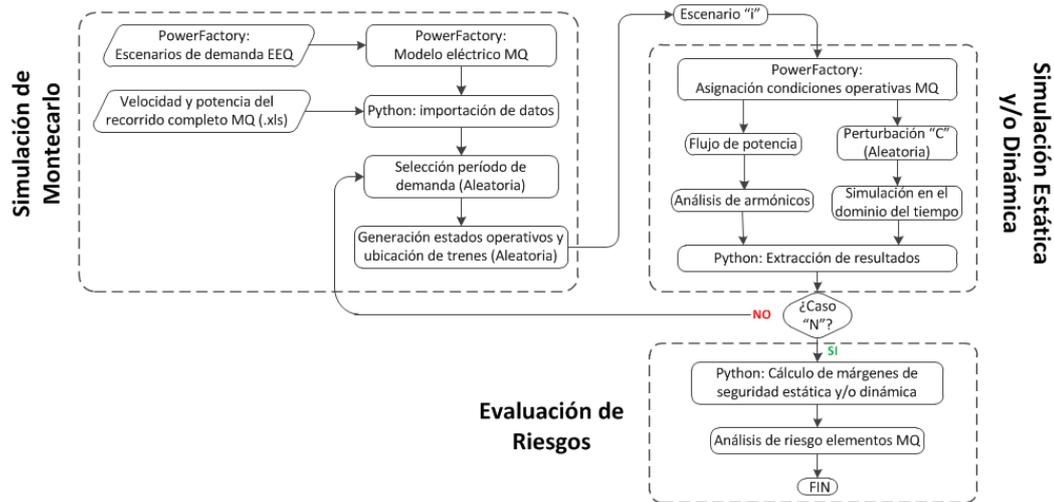


Figura 5: Esquema de la metodología propuesta

Por último, mediante código de programación en Python, de los 28 trenes modelados, se activan o se ponen en operación aleatoriamente solamente 16 trenes, cumpliendo con las condiciones de explotación previstas en esta etapa del Metro de Quito. Por ejemplo, en la Fig. 6 se observa que, de Sur (Est. Quitumbe) a Norte (Est. El Labrador), los trenes activos son T1, T3 y T14 en las posiciones 0,5447 km, 4,8283 km y 20,931 km, respectivamente; en cambio, el tren T2 se encuentra desactivado.

Es importante destacar que, la programación de la simulación de Montecarlo permite combinar la operación de hasta 10 trenes en una sola dirección (Norte-Sur o Sur-

Norte); es decir que en este caso en dirección opuesta se activarán únicamente 6 trenes con la finalidad de cumplir con las condiciones de operación actualmente previstas.

**Etapa 2: Simulación estacionaria y/o dinámica**

Una vez definidas las condiciones operativas tanto para la carga del sistema eléctrico “Metro de Quito” como para el sistema de la EEQ se realizan las simulaciones estacionarias y/o dinámicas del sistema mediante la ejecución de flujos de potencia, flujos de armónicos y/o simulaciones en el dominio del tiempo. En este trabajo se simulan y presentan solamente los resultados del comportamiento estacionario del sistema



eléctrico; por lo tanto, para cada escenario operativo “i” se almacenan los datos para el análisis probabilístico de flujos de potencia, como: voltajes, corrientes, nivel de carga, potencia activa, entre otros.

**Etapa 3: Evaluación probabilística y gestión del riesgo**

La aplicación de la simulación de Montecarlo permite el análisis probabilístico de posibles riesgos operativos. Para ello, una vez completadas las “N” simulaciones de Montecarlo, se utilizan criterios de riesgo que permiten evaluar límites de operación del equipo eléctrico y la calidad de energía en barras de conexión entre el Metro de Quito y EEQ. A continuación, se describen los criterios de riesgo más utilizados [17].

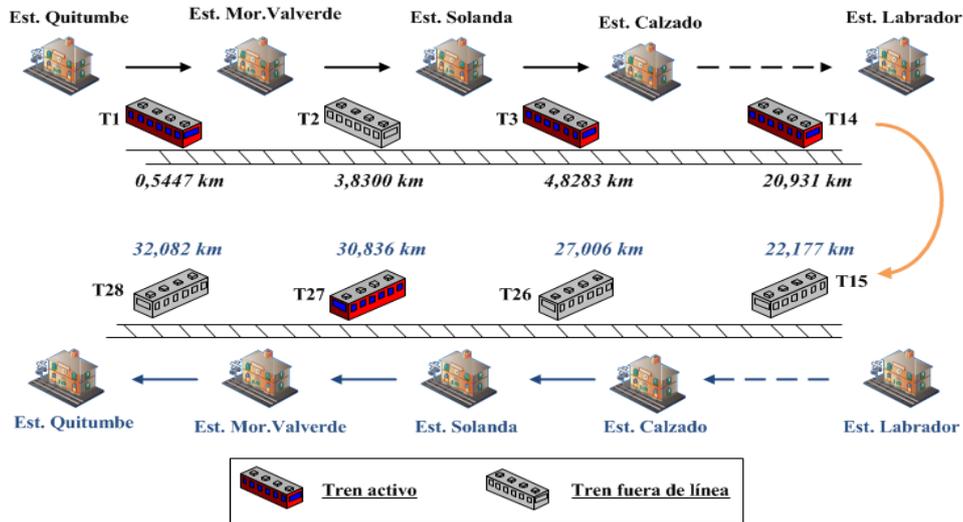


Figura 6: Simulación de Montecarlo

**Criterio 1:** Basado en el criterio de desigualdad de Chebyshev considerando la media y desviación estándar[17].

$$Cheby = \mu \pm 2 \cdot \sigma \tag{1}$$

Donde  $\mu$  corresponde a la media y  $\sigma$  representa la desviación estándar.

**Criterio 2:** Valor del riesgo (Value at Risk – VaR)

$$VaR = \mu \pm \phi^{-1}(1 - \alpha) \cdot \sigma \tag{2}$$

Siendo  $\phi^{-1}(1 - \alpha)$  el percentil  $(1 - \alpha)$  de la distribución normal estándar,  $(1 - \alpha)$  es el nivel de confianza y  $\alpha$  la pérdida esperada.

**Criterio 3:** Valor del riesgo condicional (Conditional Value at Risk – CVaR)

$$CVaR = \mu \pm \alpha^{-1} \cdot \varphi(\phi^{-1}(\alpha)) \cdot \sigma \tag{3}$$

Siendo  $\varphi(z)$  denota la función de densidad normal estándar.

La desigualdad de Chebyshev mide la probabilidad de la cola de la distribución y su valor esperado; mientras que, el VaR mide la máxima pérdida esperada (o peor pérdida) dentro de un intervalo de confianza dado. Por otro lado, el CVaR, a un nivel de confianza dado, es la pérdida esperada entre las pérdidas que son mayores que el VaR y la desigualdad de Chebyshev, es decir, es la pérdida esperada más grande que el VaR y desigualdad de Chebyshev [18].

El grado de confianza para estimar las medidas de riesgo es un rango que depende de la aplicación o de la aversión al riesgo que el planificador desea o el nivel de pérdidas que debe ser cubierta [18]. En este trabajo se utiliza como medida de riesgo el CVaR puesto que representa los mínimos valores esperados, dado un grado de confianza del 99%.

**5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA**

El sistema eléctrico del Metro de Quito desarrollado en PowerFactory es incluido dentro del sistema de la EEQ. El modelo en conjunto incluye los cambios topológicos de expansión y la proyección de la máxima demanda coincidente de la EEQ, desde el año 2018 hasta el año 2026. En este trabajo, se utiliza como período de simulación el año 2019, puesto que corresponde con la puesta en operación de la primera línea del Metro de Quito.

Para el año 2019, se simulan tres escenarios de demanda del Metro de Quito considerando diferentes perfiles de consumo de energía de cada tren eléctrico, cuyos valores máximos y medios se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Escenario de demanda de un tren eléctrico

Escenario de demanda	Potencia máxima [kW]	Potencia promedio [kW]
Mínima	958,56	692,43
Media	1597,61	1154,05
Máxima	2236,66	1615,68



En la Fig. 7 se muestra el perfil de demanda media simulado por CAF (para 5 estaciones de pasajeros, considerando los arranques y paradas), el cual corresponde a una carga de 294,3 Toneladas/Tren (Tara Alta AW4). A partir de este escenario, se construye la demanda mínima que corresponde al 60% de la demanda media; mientras que, el escenario de demanda máxima corresponde a un incremento del 40% de la demanda media. Estos escenarios de demanda son asumidos y aún no pueden ser considerados como consumos definitivos de los futuros trenes del Metro de Quito.

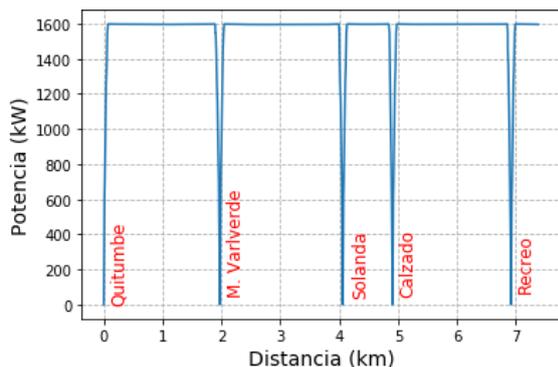


Figura 7: Perfil de demanda (Potencia consumida vs. Distancia) para un tren del Metro de Quito

Para cada escenario de demanda del Metro de Quito (mínima, media y máxima) se simulan 1 800 iteraciones (simulación de Montecarlo), donde cada una de ellas activa 16 diferentes trenes eléctricos y cambia su desplazamiento físico a lo largo del trayecto.

A continuación, se realiza un análisis probabilístico enfocado al nivel de carga del equipamiento eléctrico y variaciones de voltaje en las barras del sistema eléctrico Metro de Quito y de la EEQ.

### 5.1. Análisis probabilístico del nivel de carga

En la Tabla 8 se muestran los valores del CVaR del nivel de carga de los transformadores de potencia de la EEQ, donde se observa que, en los tres escenarios de demanda, el transformador 1 de la subestación Eugenio Espejo (con los valores asumidos de carga de la Tabla 7) superaría el 100% de nivel de carga.

Tabla 8: CVaR del nivel de carga de transformadores de potencia - EEQ

CVaR TRANSFORMADOR	Esc. mínimo	Esc. Medio	Esc. máximo
Eu. Espejo_1	103,788	119,218	137,808
Eu. Espejo_2	48,835	48,930	49,069
Nueva Vicentina	48,923	70,308	92,691
Chilibulo_2	29,402	43,936	62,431
Bicentenario_1	26,130	34,508	44,041

En la Fig. 8 se muestra el histograma del transformador 1 Eugenio Espejo (Eu. Espejo\_1) para el escenario de demanda máxima. En esta figura, la línea de color rojo muestra la probabilidad acumulada de ocurrencia donde se observa que existe una alta probabilidad de superar el nivel de carga máximo.

Aproximadamente el 16% de los casos simulados no superan el nivel de carga del 100%; en otras palabras, el 84% de los casos simulados presentan sobrecarga en el transformador 1 de Eugenio Espejo.

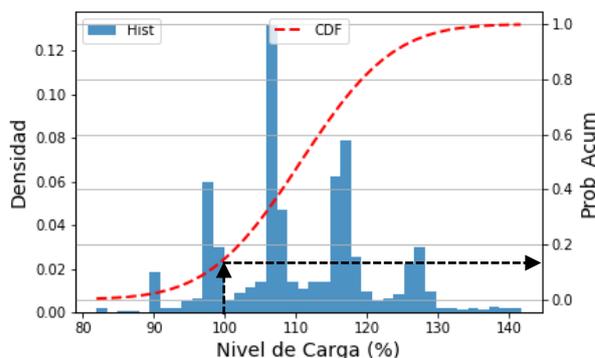


Figura 8: Histograma transformador 1 de Eugenio Espejo (Eu. Espejo\_1)

Por otro lado, en la Tabla 9 se muestran los valores de CVaR del nivel de carga de los transformadores de tracción del Metro de Quito, donde se observan niveles de carga por encima de 100% en todos los escenarios de demanda. Sin embargo, es importante considerar que estos niveles de carga son temporales, puesto que el suministro de energía, al tren en movimiento, cambia durante el trayecto.

Es importante destacar que los transformadores de tracción están diseñados para soportar altas sobrecargas temporales en relación con su capacidad nominal. Por lo general, los clientes ordenan transformadores que pueden sobrecargarse 50% de su valor nominal por una duración de 15 minutos cada hora o transformadores con sobrecargas del 100% por períodos de 5 minutos cada hora [19] [20].

Los transformadores de tracción de Universidad Central y Carolina son los que presentan mayor nivel de carga. En la Fig. 9 se muestra el histograma del transformador Universidad Central denominado “SET\_UCentral”, donde se observa que el 60% de los escenarios analizados presentan un nivel de carga menor al 200%. En este caso, el 40% de los escenarios excede el valor de 200%, cuyo valor de sobrecarga deberá ser verificado con los fabricantes.

Tabla 9: CVaR del nivel de Carga transformadores de tracción - Metro de Quito

CVaR TRANSFORMADOR	Esc. mínimo	Esc. Medio	Esc. máximo
SET_Qtumbe_1	29,674	48,182	69,921
SET_Qtumbe_2	29,674	48,182	69,921
SET_Mor_Valverde	83,319	137,458	196,641
SET_Solanda	113,836	187,304	274,771
SET_Magda	80,899	133,645	197,637
SET_Recreo	110,058	184,069	267,131
SET_Ala	106,286	179,831	261,218
SET_Sn_Fran	83,986	134,790	201,348
SET_Carolina	148,922	268,013	373,297
SET_UCentral	158,038	270,522	381,845
SET_Jipijapa	102,799	167,214	241,369
SET_Labrador	58,821	99,870	145,038

### 5.2. Análisis probabilístico del nivel de voltaje

La Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) en la regulación No. CONELEC-004/01 “Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución” establece los niveles de calidad de la prestación del servicio eléctrico de distribución. En esta regulación se establece que la variación admisible para sistemas de medio voltaje es de  $\pm 8\%$ , el cual es considerado para el análisis probabilístico de los niveles de voltaje [21].

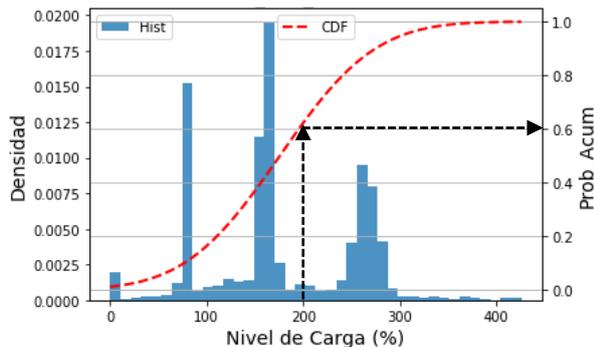


Figura 9: Histograma transformador SET Universidad Central (SET UCentral)

En la Tabla 10 se muestran los índices de riesgo CVaR de los voltajes en las barras del sistema eléctrico de la EEQ. Se observa que, las barras Vicentina (Vicentna\_23) y Eugenio Espejo 1 (Eu. Espejo\_1\_23) de 22,8 kV, presentan los niveles más bajos de voltaje, pero aún por encima de los límites exigidos en la regulación. Es importante resaltar que los valores de voltaje en barras de la EEQ (barras de alimentación aguas arriba), si consideran las cargas del Metro, se encuentran alrededor de 1,022 p.u.

Tabla 10: CVaR de voltajes en barras - EEQ

CVaR BARRAS	Esc. mínimo	Esc. medio	Esc. máximo
Chilibulo_138	1,019	1,017	1,014
Eu.Espejo_138	1,022	1,020	1,018
Bicentenario_138	1,021	1,019	1,016
Vicentina_138	1,016	1,014	1,011
Chilibulo_1_23	1,000	0,998	0,995
Chilibulo_2_23	1,019	1,010	0,996
Eu.Espejo_1_23	0,987	0,975	<u>0,958</u>
Eu.Espejo_2_23	1,002	1,000	0,998
Bicentenario_23	1,018	1,012	1,005
Vicentna_23	1,009	0,989	<u>0,965</u>

Las Fig. 10 y 11 muestran los histogramas de voltajes en las barras Vicentina y Eugenio Espejo de 22,8 kV, donde se observa que existe baja probabilidad de ocurrencia de alcanzar voltajes menores al valor admisible de operación de 0,92 p.u. Sin embargo, como se menciona anteriormente, la variación de los voltajes en las barras depende de la matriz de consumo de energía de los trenes eléctricos, la cual es ingresada como dato de entrada en la simulación de Montecarlo.

En la Tabla 11 se muestran los valores de CVaR de los voltajes de las barras de las subestaciones de tracción. Se observa que, para el escenario de demanda máxima, las barras de Morán Valverde (Mor\_Valverde\_23\_MQ),

Solanda (Solan\_23\_MQ) y La Carolina (Caro\_23\_MQ) presentan los niveles de voltaje más bajos, los cuales se encuentran dentro del rango admisible establecido en la regulación. Sin embargo, si el consumo de energía de los trenes eléctricos es mayor, el voltaje puede disminuir a valores fuera del rango permitido.

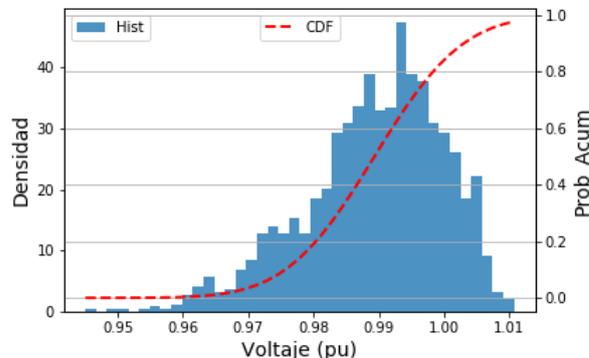


Figura 10: Histograma barra Vicentina a 23 kV (Vicentina\_23)

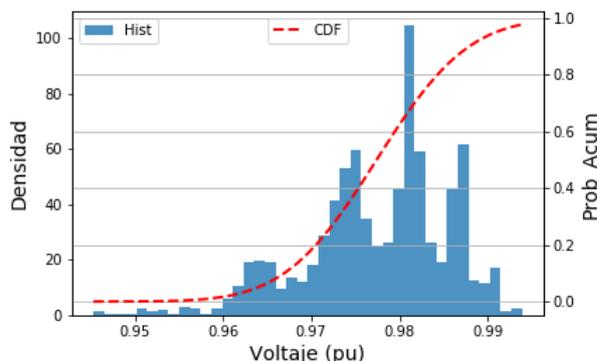


Figura 11: Histograma barra 1 Eugenio Espejo a 23 kV (Eu. Espejo\_1\_23)

En la Fig. 12 se muestra el histograma de voltajes de la barra Solanda (Solan\_23\_MQ), donde se observa que existe una probabilidad muy baja de casos operativos con valores de voltaje menores al rango admisible de operación de 0,92 p.u.

Tabla 11. CVaR de voltajes en barras de subestaciones de tracción - Metro de Quito

CVaR BARRAS	Esc. mínimo	Esc. medio	Esc. máximo
Magda_23_MQ	1,018	1,008	0,991
Qtumbe_23_MQ	0,986	0,973	0,953
Un_Central_23_MQ	1,007	0,986	0,956
Mor_Valverde_23_MQ	0,982	0,967	<u>0,944</u>
Rec_23_MQ	1,016	1,005	0,986
Solan_23_MQ	0,980	0,963	<u>0,938</u>
Sn_Fran_23_MQ	1,016	1,006	0,988
Ala_23_MQ	1,005	0,984	0,953
Caro_23_MQ	1,004	0,982	<u>0,949</u>
Jipi_23_MQ	1,016	1,009	0,998
Labra_23_MQ	1,018	1,012	1,003

## 6. CONCLUSIONES

Se propone una metodología basada en simulación de Montecarlo, para la generación aleatoria de escenarios de operación de sistemas eléctricos de transporte masivo considerando las características propias de desplazamiento de la carga (trenes eléctricos) y sus



condiciones de operación. La aplicación de la metodología propuesta se realiza mediante una herramienta computacional que combina programación en Python con la modelación de sistemas eléctricos en PowerFactory de DlgSILENT.

Como resultados se obtienen funciones de densidad de probabilidad (PDF) del comportamiento de los voltajes, nivel de carga, potencia activa, entre otros, los cuales permiten:

- Evaluar el riesgo de superar los límites de operación (cargabilidad) de equipo eléctrico y calidad de energía en barras de conexión entre el Metro de Quito y EEQ.
- Tomar acciones de control y operación de la red para disminuir los riesgos asociados a la cargabilidad.
- Planificar nuevas estrategias de operación del Metro de Quito.

Es importante destacar que los resultados obtenidos dependen de los datos de entrada ingresados al modelo; por ejemplo, en el análisis de flujos de potencia los resultados dependen del número de trenes eléctricos habilitados y de su matriz de consumo de energía. De esta manera, los resultados mostrados aún no pueden ser tomados como definitivos sino como ejemplos del comportamiento estocástico del sistema, debido a que la matriz de datos de consumo debe ser verificada.

Por otro lado, las variaciones de voltaje en las barras de alimentación del Metro de Quito dependen directamente de los valores de voltaje fijados en los puntos de interconexión con la EEQ. Es decir, si los voltajes en las barras de la EEQ son modelados en PowerFactory con valores mayores a 1 p.u., las variaciones en las barras de las SET del Metro de Quito no caen por debajo de los rangos admisibles.

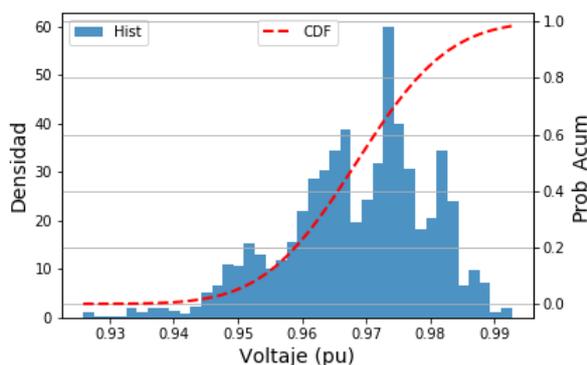


Figura 12: Histograma barra de SET Solanda a 23 kV (Solan\_23\_MQ)

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Hidalgo and C. Huizenga, “Implementation of sustainable urban transport in Latin America,” *Res. Transp. Econ.*, vol. 40, no. 1, pp. 66–77, 2013.
- [2] Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Plan Maestro de Movilidad para el Distrito Metropolitano de Quito: 2009-2025. 2009.
- [3] Equipo Consultor Metro de Madrid, “La Línea 1 de Metro de Quito,” 2012.
- [4] Metro de Santiago Consultorías, “Análisis comparativo de demanda proyectada de consumos de energía y potencia eléctrica para la primera línea del metro de quito 1,” 2016.
- [5] B. Barnard, “Railway System Modelling - Not Just for Fun Keynote Address,” *IEE Semin. Railw. Syst. Model. Just Fun*, pp. 2–6, 2004.
- [6] M. Jurado, J. A. Marín, F. E. Pérez, H. N. Arcos, and F. L. Quilumba, “Análisis del Sistema Metro de Quito y su impacto en la Red de la Empresa Eléctrica Quito,” *Rev. Técnica “energía,”* vol. I, no. 13, pp. 15–25, 2017.
- [7] L. Sige, Z. Xiaoxin, F. Mingtian, and Z. Zhuping, “Probabilistic Power Flow Calculation Using Sigma-Point Transform Algorithm,” *Int. Conf. Power Syst. Technol.*, pp. 1–5, 2006.
- [8] Y. Li, Y. Sun, C. Lu, and Q. Liang, “Probabilistic power flow considering variable bandwidth kernel density estimation for traction substation loads of high-speed railways,” in *2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Beijing, 2016, pp. 1–5.
- [9] T. K. Ho, Y. L. Chi, J. Wang, and K. K. Leung, “Load flow in electrified railway,” *Second Int. Conf. Power Electron. Mach. Drives (PEMD 2004)*, vol. 2, p. 498–503 Vol.2, 2004.
- [10] M. S. Committee, E. Engineers, T. P. Avenue, and S. Licensing, “Draft Recommended Practice for Conducting Load-Flow Studies of Industrial and Commercial Power Systems,” Group, no. September, 2015.
- [11] L. Flow, M. For, D. Network, D. By, and C. Loads, “Load Flow Method for Distribution Network Design by Considering Committed Loads,” *Appeec*, no. 2, p. 5, 2012.
- [12] M. E. Nassar and M. M. Salama, “Probabilistic power flow using novel wind and solar probabilistic models,” *2016 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–5, 2016.
- [13] Y. Yu, W. Gu, Y. Wang, W. Sun, and F. Chen, “The Probabilistic Load Flow Analysis of Power System Considering the Fluctuation of Smelting Load,” *2017 IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr.*, pp. 1–5, 2017.
- [14] S. V. Raygani, A. Tahavorgar, S. S. Fazel, and B. Moaveni, “Load flow analysis and future development study for an AC electric railway,” *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 2, no. 3, p. 139, 2012.
- [15] J. Cepeda, “Real Time Vulnerability Assessment of Electric Power Systems Using Synchronized Phasor Measurement Technology,” *Universidad Nacional de San Juan*, 2013.
- [16] Construcciones y Auxiliares de Ferrocarriles,

- [17] “Descripción Técnica Equipo de Tracción - Metro de Quito,” Madrid, 2017.
- [17] M. Chamba, W. Vargas, and J. Cepeda, “Probabilistic assessment of transient stability considering the uncertainty of the demand and risk management Evaluación probabilística de la estabilidad transitoria considerando la incertidumbre de la demanda y gestión del riesgo,” *Rev. Técnica “energía,”* vol. 15, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [18] T. Fischer, “Risk capital allocation by coherent risk measures based on one-sided moments,” in *Insurance: Mathematics and Economics*, vol. 32, 2003, pp. 135–146.
- [19] F. Ciccarelli, M. Fantauzzi, D. Lauria, and R. Rizzo, “Special transformers arrangement for AC railway systems,” *Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propulsion, ESARS*, pp. 0–5, 2012.
- [20] I. Colloquium, A. Management, and I. Sitar, “New design of traction transformers for fixed installations,” pp. 1–10, 2009.
- [21] ARCONEL, “Regulación No. CONELEC-004/01- Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución,” Quito, 2001.



**Augusto Jonathan Riofrío Trujillo.** - Nació en Quito D.M en 1990. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana-UPS en 2015. Se ha desempeñado como Analista Técnico en el antiguo INER e Ingeniero de

CENACE. Actualmente, trabaja en la Subgerencia Nacional de Investigación y Desarrollo en convenio entre CELEC EP- Coca Codo Sinclair y CENACE. Sus áreas de investigación son: desarrollo de herramientas para la seguridad de sistemas eléctricos de potencia y micro redes de generación de electricidad.



**Marlon Santiago Chamba.** - Nació en Loja, Ecuador en 1982. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador en el 2007. En el año 2016, obtuvo el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan,

Argentina. Actualmente trabaja en la Subgerencia Nacional de Investigación y Desarrollo en convenio entre CELEC EP- Coca Codo Sinclair y CENACE. Sus áreas de investigación son: Mercados de Energía, Confiabilidad, Análisis de la seguridad de sistemas eléctricos de potencia.



**Jaime Cristóbal Cepeda.** - Nació en Latacunga, Ecuador en 1981. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2005, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan en 2013. Colaboró como investigador en el Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina y en el Instituto de Sistemas Eléctricos de Potencia, Universidad Duisburg-Essen, Alemania entre 2009 y 2013. Actualmente se desempeña como Gerente Nacional de Desarrollo Técnico del CENACE y como Profesor a Tiempo Parcial en la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés incluyen la evaluación de vulnerabilidad en tiempo real y el desarrollo de Smart Grids.



**Yirabel Lecaro Robles.** - Nació en Esmeraldas en 1983. Recibió su título de Ingeniera Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional en 2008; y, de Master en Administración Estratégica de Negocios de la Universidad Católica de Cuyo de San Juan,

Argentina en 2013. Actualmente, se encuentra laborando en la Empresa Pública Metropolitana Metro de Quito, como especialista eléctrica de potencia



**Franklin Chimarro Alomoto.** - Nació en Quito, Ecuador en 1982. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2007. Actual Gerente de Equipos e Instalaciones de la Empresa Pública Metropolitana Metro de Quito, desempeñado por

varios años la supervisión, revisión, control y coordinación de todos los subsistemas de: energía, telecomunicaciones y Material Rodante de la Primera Línea del Metro de Quito. Es especialista en operación de Centros de Control, fiscalización de proyectos eléctricos y sistemas de distribución de energía con una amplia trayectoria y experiencia adquirida en importantes proyectos nacionales tales como: proyectos hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, Manduriacu y Chespi, además del proyecto SCADA, Distrito Amazónico.



**Miguel Andrés Mora.** - Nació en Imbabura en 1990. Recibió su título de Ingeniero Mecatrónico de la Escuela Politécnica del Ejército - ESPE en 2013; y su título de Master en Sistemas de Calidad y Productividad de la Universidad Tecnológico de Monterrey México

en 2018. Actualmente labora en la Empresa Pública Metropolitana Metro de Quito, como Especialista de Material Rodante.