

Análisis del Sistema Metro de Quito y su impacto en la Red de la Empresa Eléctrica Quito

M. F. Jurado

J. A. Marín

F. E. Pérez

H. N. Arcos

F. L. Quilumba

Escuela Politécnica Nacional, EPN

E-mail: mauro.jurado@epn.edu.ec; jose.marin@epn.edu.ec; fabian.perez@epn.edu.ec

hugo.arcos@epn.edu.ec; franklin.quilumba@epn.edu.ec

Resumen

El Distrito Metropolitano de Quito pensando en solucionar los problemas de movilidad existentes en la ciudad, definió la construcción de un Sistema de Transporte Masivo denominado Metro de Quito, convirtiéndose este en la columna vertebral que integrará todas las modalidades de transporte público existentes (Trole, Ecovía, Corredores Suroriental, Central Norte y Suroccidental). En el presente trabajo se ha realizado una modelación detallada del Sistema Eléctrico Metro de Quito (SEMQ) y se ha incorporado este modelo en la red de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) con el objetivo de realizar estudios de flujos de potencia, mediante la herramienta computacional DIgSILENT PowerFactory, para diferentes condiciones de operación. Los resultados obtenidos permiten determinar que el comportamiento eléctrico y cargabilidad de los sistemas EEQ y SEMQ se encuentran dentro de un rango de valores aceptables, lo que garantizará una operación estable de ambos sistemas.

Palabras clave— Empresa Eléctrica Quito, Metro de Santiago S.A., Sistema Eléctrico Metro de Quito, Subestaciones Eléctricas de Tracción, Impacto en la Red, Modelado de la Red, Intervalo de Explotación, Tren.

Abstract

The Metropolitan District of Quito is committed to solve its existing traffic problems in the city. One of the solutions is the construction of a Massive Transportation System called Metro de Quito, becoming the backbone that integrates all means of existing public transportation such as Trole, Ecovia, Corredores Suroriental, Central Norte y Suroccidental. In this work, a detailed model of Electrical System of Metro de Quito (SEMQ) is developed which has been incorporated into the Empresa Eléctrica Quito (EEQ) grid, the Electric Utility Company of Quito. This model is used to perform system studies as power flow, through the computation tool DIgSILENT PowerFactory, for different operationg conditions. The results show that the electrical behavior and loadability of the EEQ and the SEMQ systems are within an acceptable range, which will ensure a stable operation of both systems.

Index terms— Empresa Eléctrica Quito, Metro de Santiago S.A., Electrical System of Metro de Quito, Traction Electric Substations, Grid Impact, Grid Modeling, Exploitation Interval, Train.

Recibido: 29-08-2016, Aprobado tras revisión: 09-12-2016

Forma sugerida de citación: Jurado, M.; Marín, J.; Pérez, F.; Arcos, H.; Quilumba, F. (2017). “Análisis del Sistema Metro de Quito y su impacto en la Red de la Empresa Eléctrica Quito”. Revista Técnica “energía”. No. 13, Pp. 15-25

ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la población y el aumento del parque automotor han ocasionado que los sistemas y vías de transporte colapsen a nivel mundial, requiriéndose la implementación de nuevos sistemas de transporte masivo. El Distrito Metropolitano de Quito, (D.M.Q.) para enfrentar los problemas de movilidad de la ciudad ha iniciado la construcción de un sistema subterráneo de transporte masivo denominado Metro de Quito. Este sistema en su primera etapa cubre una distancia de aproximadamente 22 km, recorriendo desde Quitumbe en el sur hasta El Labrador en el norte de la ciudad y estará conformado por 15 estaciones con una capacidad de desplazamiento de 20 000 pasajeros por hora [1].

El Sistema Eléctrico Metro de Quito (SEMQ) dispondrá de 11 puntos de alimentación eléctrica, en los cuales se conectarán cargas de tipo AC correspondientes a servicios auxiliares tanto de las estaciones como del túnel y cargas de tipo DC principalmente trenes. El suministro de energía para el SEMQ, se realizará a nivel de 23 kV desde 3 subestaciones pertenecientes a la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), éstas son: Eugenio Espejo, Chilibulo y Vicentina.

En el presente trabajo se ha realizado una modelación detallada del SEMQ y se ha incorporado este modelo en la red de la EEQ con el objetivo de realizar estudios de flujos de potencia en diferentes condiciones de operación para conocer el impacto en perfiles de voltaje y cargabilidad de los sistemas EEQ y SEMQ en conjunto.

Los perfiles de voltaje se analizan con la finalidad de verificar que los resultados con el ingreso del SEMQ se encuentren dentro de los límites establecidos por la regulación vigente, mientras que los índices de cargabilidad se analizan para determinar posibles sobrecargas en los elementos de la red.

2. DEFINICIONES

2.1. Bogie

Estructura o bastidor donde se acoplan fundamentalmente los ejes con el rodado, la suspensión y los motores de tracción [2].

2.2. Fondo de saco

Tramo donde se realiza el cambio de sentido del material móvil (retorno de trenes) durante las operaciones de transporte de pasajeros. Además, es considerado como el inicio del recorrido de las unidades.

2.3. Catenaria

Elemento aéreo conformado por un perfil conductor de aluminio en el que se introduce el hilo de contacto que proporciona la energía eléctrica necesaria para la tracción del material móvil [3].

2.4. Depósito

Lugar donde se realiza el mantenimiento y estacionamiento del material móvil (trenes).

3. MODELACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO METRO DE QUITO (SEMQ) EN DIGSILENT POWER FACTORY

La metodología aplicada para la modelación del SEMQ, se basa en representar los trenes como cargas de potencia constante a partir de determinar la potencia promedio y la ubicación de cada unidad móvil en los diferentes tramos de catenaria que conforman la Línea 1 del Metro de Quito. Seguido se modela los elementos constitutivos que conforman el SEMQ y los puntos de alimentación, todo esto con la finalidad de realizar simulaciones en el programa computacional DIGSILENT Power Factory.

3.1. Características de los Trenes

Todas las unidades están compuestas por seis coches ordenados de la siguiente manera: MC-R-S-S-R-MC, con disposición de dos bogies (dos motores en cada uno), siendo:

- MC: coche motor con cabina en extremo libre
- R: coche remolque intermedio sin cabina
- S: coche motor intermedio sin cabina

A partir de la información compartida por Metro de Santiago S.A., (ver Tabla 1), se puede determinar la potencia promedio por coche de cada unidad de la línea 1 del Metro de Quito, cuyos trenes contarán con aire acondicionado, dando como resultado una potencia promedio por tren de 630 kW.

Tabla 1: Potencia promedio por Coche

Tipo de Coche	Potencia kW por Coche
Sin aire acondicionado	80
Con Aire Acondicionado	105

3.2. Número de trenes operando en la línea 1 del Metro de Quito

Con el fin de determinar la ubicación de las cargas móviles (trenes), se plantean los escenarios operativos del sistema de transporte que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Periodos de trabajo Metro de Quito

Periodo pico de la mañana	7:00 h a 8:30 h
Periodo valle	Resto de horas
Periodo pico de la noche	18:00 h a 20:00 h

De acuerdo a las experiencias compartidas por Metro de Santiago S.A., se ha proyectado el número de trenes que circularán por la línea 1 del Metro de Quito en los diferentes periodos de trabajo que se describieron con anterioridad. Esto se indica en la Tabla 3.

Tabla 3: Número de Trenes Línea 1 Metro de Quito

Horas	Trenes en Circulación	
	Metro de Santiago Línea 2	Metro de Quito Línea 1
7:00 h a 8:30 h	22	16
Resto de horas	18	13
18:00 h a 20:00 h	23	16

Una vez conocido el número de trenes que operarían en los diferentes periodos de trabajo, se determina el intervalo de explotación, es decir, el intervalo de tiempo entre la partida de cada tren desde el “fondo de saco” (inicio del recorrido) mediante la expresión (1). Con este valor es posible estimar las diferentes ubicaciones que tomarían las cargas en todo el trayecto.

$$T = \frac{T_V}{N_{TL}} \quad [4] \quad (1)$$

Donde:

T=intervalo de explotación [min]

T_v=tiempo de vuelta [min]

N_{TL}=número de trenes en línea

De acuerdo a (1), el parámetro restante por conocer es el tiempo de vuelta (T_v), tiempo que le toma a un tren dar una vuelta completa, es decir trasladarse desde Quitumbe hasta El Labrador y de vuelta a Quitumbe.

De la información proporcionada por Metro de Quito, se establecen los tiempos estimados del recorrido de un tren entre cada estación según se muestra en la Tabla 4. [5]

Tabla 4: Tiempo de recorrido Línea 1 Metro de Quito

N°	Estación	Tiempo [min]
1	Quitumbe	00:00
2	Morán Valverde	02:35
3	Solanda	05:46

4	El Calzado	07:39
5	El Recreo	10:11
6	La Magdalena	13:19
7	San Francisco	16:30
8	La Alameda	19:11
9	El Ejido	21:10
10	Universidad Central	23:27
11	La Pradera	25:26
12	La Carolina	27:37
13	Iñaquito	29:48
14	Jipijapa	32:05
15	El Labrador	33:58

Con base en esta información a continuación se determinan los intervalos de explotación para cada periodo de trabajo.

Caso: 16 trenes

T=?

$$T_V = 2 \times 33,58 = 67,16 \text{ min}$$

$$N_{TL} = 16$$

$$T = \frac{T_V}{N_{TL}} = \frac{67,16}{16} = 4,20 \text{ min}$$

Caso: 13 trenes

T=?

$$T_V = 2 \times 33,58 = 67,16 \text{ min}$$

$$N_{TL} = 13$$

$$T = \frac{T_V}{N_{TL}} = \frac{67,16}{13} = 5,17 \text{ min}$$

Una vez conocido el intervalo de explotación, se procede a realizar una simulación del movimiento de los trenes, para establecer diversos escenarios de ubicación de trenes a lo largo del trayecto de la línea 1 del Metro de Quito, esto con el objetivo de determinar en qué tramo de la catenaria estaría ubicado cada tren. (Ver Fig. 1 y 2)

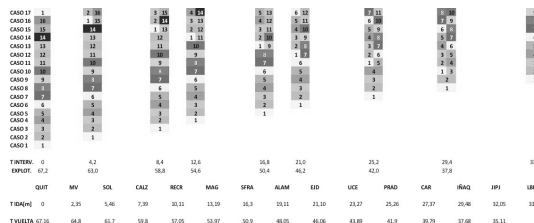


Figura 1: Ubicación de los Trenes – Caso 16 Trenes

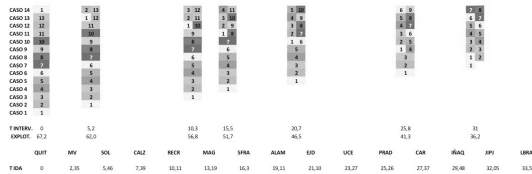


Figura 2: Ubicación de los Trenes - Caso 13 Trenes

3.3. Potencia de Tracción

Con la potencia promedio de cada tren y el número de trenes que funcionarán en cada periodo de trabajo, se determina la potencia total de tracción del sistema que se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5: Potencia de Tracción

Potencia promedio x tren [kW]	Número de trenes	Potencia de tracción [kW]
630	16	10 080
	13	8 190

3.4. Potencia de Servicios Auxiliares (SS.AA.)

Los servicios auxiliares están conformados por cargas tanto de la propia estación como del túnel, siendo atribuibles a los siguientes servicios: alumbrado y fuerza, control de accesos, escaleras mecánicas, ascensores, ventilación, salidas de emergencia, pozos de bombeo pluviales y UPS. En la Tabla 6 se muestra un resumen de potencias consumidas por servicios auxiliares para cada estación y tramo de túnel.

Tabla 6: Potencia de Servicios Auxiliares

Nº	Estación	[kW]	Túnel	[kW]
1	Quitumbe	485,0	CT0	232,0
2	Morán Valverde	307,6	CTV1	176,0
3	Solanda	355,5	CTV2	151,0
4	El Calzado	279,6	CTV3	233,0
5	EL Recreo	424,0	CTV4	128,0
6	La Magdalena	477,0	CTV5	128,0
7	San Francisco	932,0	CTV6	199,5
8	La Alameda	384,6	CTV7	147,0
9	El Ejido	372,6	CTV8	147,0
10	U. Central	347,0	CTV9	147,0
11	La Pradera	264,0	CTV10	126,0
12	La Carolina	334,0	CTV11	126,0
13	Iñaquito	279,0	CTV12	141,0
14	Jipijapa	279,6	CTV13	149,0
15	El Labrador	525,5	Total[kW]	2 230,5
Total [kW]		6 047		

En base a la información indicada en los numerales 2.3 y 2.4 se puede determinar la demanda total que tendrá el SEMQ, registrándose los valores que se señalan en la Tabla 7.

Tabla 7: Demanda Total del SEMQ

Número de trenes	Potencia de tracción [kW]	Potencia de SS. AA [kW]	Potencia total SEMQ [kW]
16	10 080,0	8 277,5	18 357,5
13	8 190,0	8 277,5	16 467,7

3.5. Subestaciones Eléctricas de Tracción S/ET

Las subestaciones eléctricas de tracción S/ET están conformadas por un grupo transformador – rectificador, y tienen como función, reducir el voltaje de 23 kV a 1225 V y convertirlo a un voltaje continuo. Para el efecto el transformador es trifásico tridevanado y la rectificación se la realiza a través de dos puentes no controlados de seis pulsos conectados a los devanados secundarios del transformador y acoplados en paralelo (ver Fig. 3), para así formar un conjunto rectificador dodecafásico. Las características más relevantes de los equipos, se muestran en las Tablas 8 y 9 a continuación:

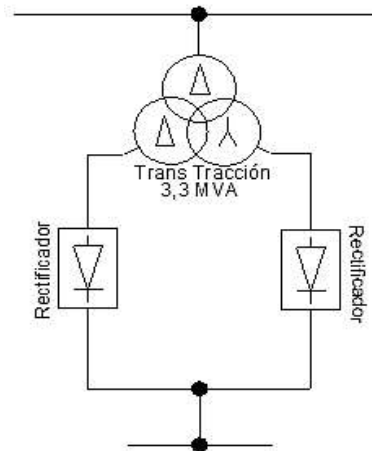


Figura 3: Grupo Transformador - Rectificador

Tabla 8: Características del Rectificador

Tipo	Puente de Graetz Trifásico
Potencia nominal [kW]	3 000
Voltaje nominal [V]	1 500
Corriente nominal [A]	2 000

Tabla 9: Características del Transformador Tridevanado

Aplicación	Rectificación / Tracción
Potencia nominal [kVA]	3 300 / 1 650 – 1 650
Voltaje nominal [V]	22 800 / 1 225 / 1 225
Tomas de ajuste de tensión [%]	± 2,5 +5 +7,5
Grupo de conexión	Dd0 – Dy11
Frecuencia [Hz]	60
Tensión cortocircuito máxima [%]	9

El SEMQ cuenta con 11 subestaciones de tracción interconectadas entre sí, las cuales se detallan en la Tabla 10. Cada S/ET tiene un grupo transformador-rectificador, que al conectarse con la S/ET adyacente, alimentará un tramo de catenaria diferente. La S/ET Depósito Quitumbe, cuenta con un doble grupo conectado en paralelo, ya que esta S/ET tiene como función adicional alimentar a los tramos conocidos como “fondo de saco” y “depósito”.

Tabla 10: Subestaciones Eléctricas de Tracción

Subestación de Tracción	Nº de Transformadores	Potencia [MVA]
Quitumbe	2	3,3 + 3,3
Morán Valverde	1	3,3
Solanda	1	3,3
Recreo	1	3,3
Magdalena	1	3,3
San Francisco	1	3,3
Alameda	1	3,3
U. Central	1	3,3
La Carolina	1	3,3
Jipijapa	1	3,3
El Labrador	1	3,3

3.6. Alimentación desde EEQ al SEMQ

Se dispondrá de tres alimentadores trifásicos doble circuito soterrados a 23kV (ver Tabla 11), desde las Subestaciones Eugenio Espejo, Chilibulo y Vicentina pertenecientes a la EEQ, hacia las subestaciones de tracción principales del SEMQ: Quitumbe, La Magdalena y Universidad Central respectivamente, como se observa en Fig. 4.

Tabla 11: Alimentadores Principales

Tramo del Alimentador	Long. [km]	Cable
S/E E. Espejo – S/ET Quitumbe	2.5	750 [MCM]
S/E Chilibulo – S/ET Magdalena	3.7	
S/E Vicentina – S/ET U. Central	4.1	AI

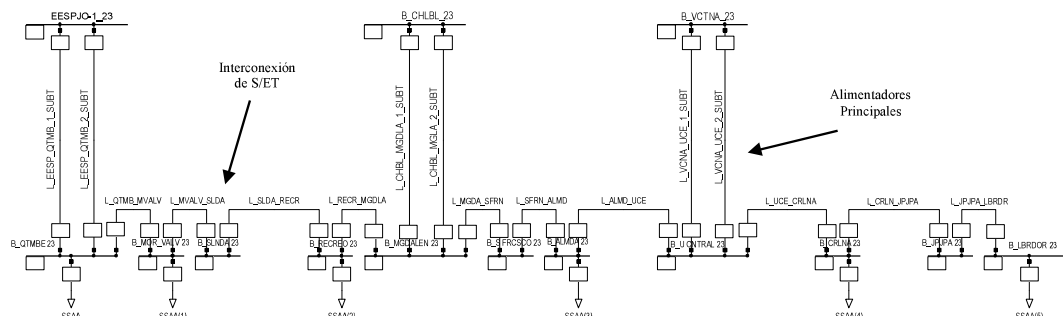


Figura 4: Alimentadores Principales e Interconexión de S/ET

3.7. Interconexión entre Subestaciones de Tracción

Con el fin de abastecer de energía a todas las S/ET, se realizan interconexiones a simple circuito, a través del túnel, desde las tres S/ET principales como se observa en (ver Fig. 4). En la Tabla 12 se indican las distancias y tipo de cable utilizados en las interconexiones entre S/ET [8].

Tabla 12: Interconexión Subestaciones de Tracción

Tramo de Interconexión	Long. [km]	Cable
S/ET Quitumbe - S/ET M. Valverde	2,00	500 MCM
S/ET M. Valverde - S/ET Solanda	2,20	
S/ET Solanda - S/ET El Recreo	2,75	
S/ET EL Recreo - S/ET Magdalena	1,80	
S/ET Magdalena - S/ET San Francisco	2,75	
S/ET San Francisco - S/ET Alameda	1,95	AI
S/ET Alameda - S/ET U. Central	2,20	
S/ET U. Central - S/ET Carolina	2,30	
S/ET Carolina - S/ET Jipijapa	2,90	
S/ET Jipijapa - S/ET El Labrador	1,10	

3.8. Subestaciones de la EEQ Planificadas para Alimentar al SEMQ

3.8.1 Subestación Eugenio Espejo

La subestación Eugenio Espejo cuenta con dos transformadores de 138/23 kV, de 33 MVA cada uno. Se planifica que en esta subestación el SEMQ se conecte a la barra de 23 kV del transformador T1 (ver Fig. 5).

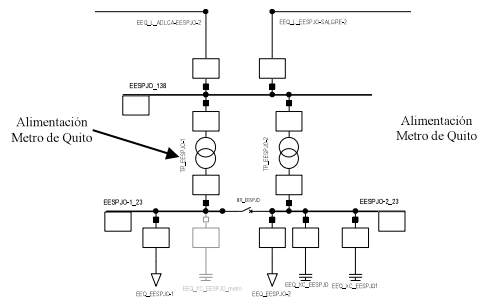


Figura 5: S/E Eugenio Espejo

3.8.2 Subestación Chilibulo

La subestación Chilibulo cuenta con un transformador 138/23 kV de 33 MVA de capacidad. Para la conexión del SEMQ se tiene planificada la incorporación de una nueva bahía de 138 kV a la cual se conectará un nuevo transformador (T2) de similares características al existente (T1), a cuyo secundario se conectará el SEMQ a nivel de 23 kV. Esto se observa en la Fig. 6.

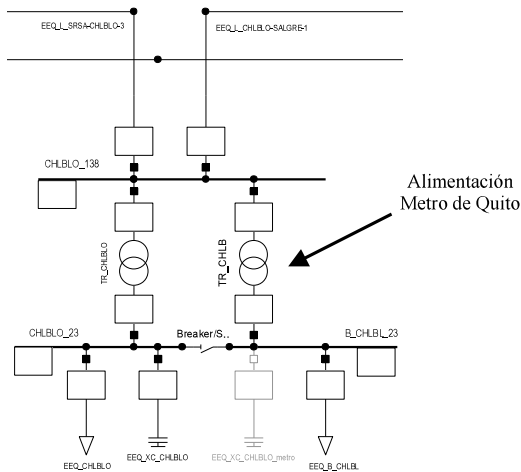


Figura 6: S/E Chilibulo

3.8.3 Subestación Vicentina

La subestación Vicentina actualmente cuenta con dos transformadores de 138/46/6.3 kV con capacidades de 100 y 48 MVA. Se tiene planificado construir una bahía en 138 kV, donde se conectará un tercer transformador (T3) de 138/23 kV y 33 MVA de capacidad para alimentar al SEMQ en 23 kV. Ver Fig. 7.

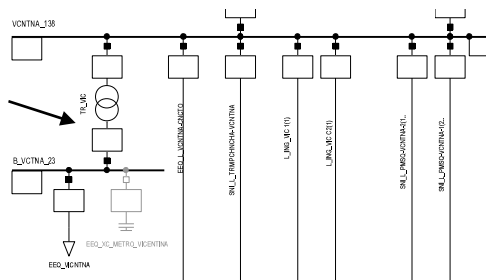


Figura 7: S/E Vicentina

3.9. Sistema de 138 kV de la EEQ

El sistema de 138 kV de la EEQ, tiene una configuración de barras en anillo lo que permite tener una mayor confiabilidad y robustez ante diferentes condiciones en operación normal y contingencia.

Las tres subestaciones desde las que se alimentará el SEMQ forman parte de este anillo lo que plantea un alto nivel de confiabilidad del sistema de subtransmisión y distribución al servicio del sistema de transporte masivo de la ciudad. El anillo mencionado se ilustra en la Fig. 8.

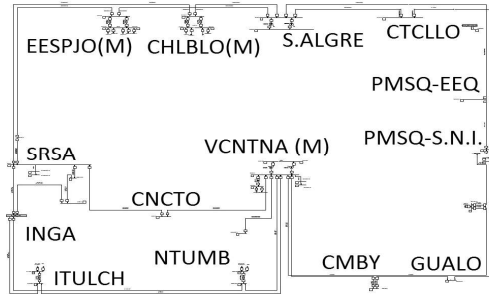


Figura 8: Sistema 138 kV - EEQ

4. RESULTADOS

Los flujos de carga se realizaron para los periodos de trabajo de valle (13 trenes) y pico de la noche (16 trenes), los que se estima coincidirán con los escenarios de demanda media y demanda máxima del SNI. A continuación se reseñan y analizan los resultados obtenidos para condiciones de demanda máxima.

4.1. Flujo de Carga en Demanda Máxima

Con la finalidad de realizar un análisis comparativo se consideran los siguientes dos escenarios:

Sin SEMQ.- en el sistema de la EEQ se consideran únicamente sus cargas proyectadas al año 2018 para una potencia total de 1 112,667 MW

Con SEMQ.- al sistema de la EEQ proyectado al año 2018 se incorpora el modelo del SEMQ. De los diversos escenarios de ubicación de los trenes obtenidos en el numeral 2.2, se selecciona el de mayor exigencia para el sistema eléctrico para la realización de los flujos de potencia.

En las Tablas 13 y 14 y Fig. 9 y 10 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en los dos escenarios en relación a perfiles de voltaje para barras de 138 kV y 23 kV respectivamente. De las figuras se desprende que la incorporación del SEMQ no representa afectación en los perfiles de voltaje del anillo de 138 kV y de las subestaciones de 23 kV, determinándose adicionalmente que los voltajes se encuentran dentro de los límites establecidos por la Regulación No. CONELEC 004/001.

Tabla 13: Perfiles de Voltaje – Barras 138 kV

BARRAS	Nivel de Voltaje [kV]	
	SIN SEMQ	CON SEMQ
CMBY	141,11	140,66
GUALO	141,47	141,05
INGA	141,69	141,32
ITULCH	141,63	141,24
NTUMB	141,36	140,92
CHLBLO (M)	140,49	139,99
CNCTO	141,29	140,83
CTCLLO	139,83	139,38
EESPIO (M)	140,98	140,55
PMSQ-EEQ	141,63	141,22
PMSQ-S.N.I.	142,07	141,69
S.ALGRE	140,21	139,75
SRSA	141,98	141,60
VCNTNA (M)	141,00	140,49

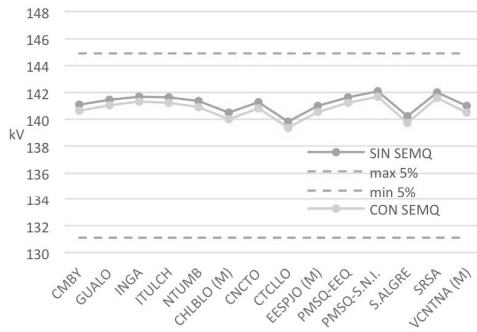


Figura 9: Perfiles de Voltaje - Barras 138 kV

Tabla 14: Perfiles de Voltaje – Barras 23 kV

BARRAS	Nivel de Voltaje [kV]	
	SIN SEMQ	CON SEMQ
EESPJO-1 (M)	22,82	22,73
EESPJO-2	23,46	23,38
CHLBLO	23,66	23,57
B_CHLBL (M)	23,31	22,99
B_VCTNA (M)	23,80	23,28

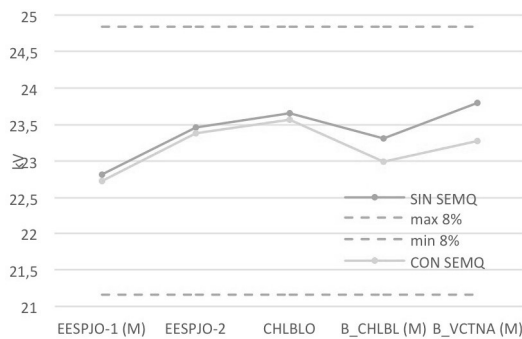


Figura 10: Perfiles de Voltaje - Barras 23 kV – EEQ

En relación con la cargabilidad de los elementos del sistema eléctrico, a continuación se detallan los resultados obtenidos discriminándolos por subestación. En las Fig. 11, 12 y 13 se muestran los niveles de cargabilidad de los elementos de las subestaciones para los dos escenarios que se están comparando, destacándose que solo los transformadores que alimentarán al SEMQ son los que presentan un mayor aumento en sus niveles de cargabilidad.

Tabla 15: Cargabilidad Subestación E. Espejo

Elementos	Cargabilidad [%]	
	SIN SEMQ	CON SEMQ
Transformador 1 (M)	67,27	74,01
Transformador 2	73,54	73,78
L/T Santa Rosa - Eugenio Espejo	52,44	53,91
L/T Eugenio Espejo - Selva Alegre	28,00	28,22

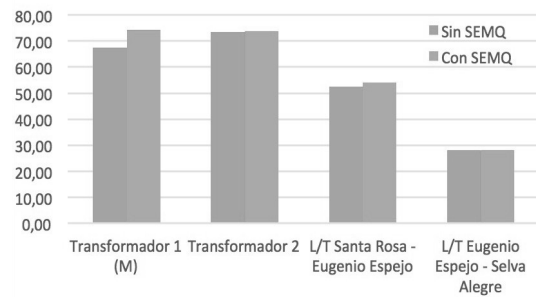


Figura 11: Cargabilidad Subestación E. Espejo

Tabla 16: Cargabilidad Subestación Chilibulo

Elementos	Cargabilidad [%]	
	SIN SEMQ	CON SEMQ
Transformador 1	60,75	60,99
Transformador 2 (M)	51,28	67,15
L/T Santa Rosa - Chilibulo	43,37	44,87
L/T Chilibulo - Selva Alegre	23,97	22,84

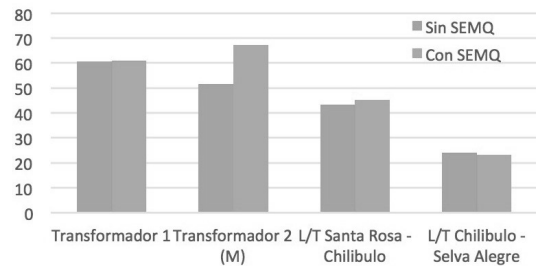


Figura 12: Cargabilidad Subestación Chilibulo

Tabla 17: Cargabilidad Subestación Vicentina

Elementos	Cargabilidad [%]	
	SIN SEMQ	CON SEMQ
Transformador 1	52,63	52,66
Transformador 2	78,08	78,10
Transformador 3 (M)	27,52	65,73
L/T Vicentina - Conocoto	7,49	8,94
L/T Termopichincha - Vicentina	13,45	13,50
L/T 1 - Inga - Vicentina	28,68	29,96
L/T 2 - Inga - Vicentina	32,00	33,32
L/T 1 - Pomasqui - Vicentina	12,90	12,37
L/T 2 - Pomasqui - Vicentina	12,68	11,84

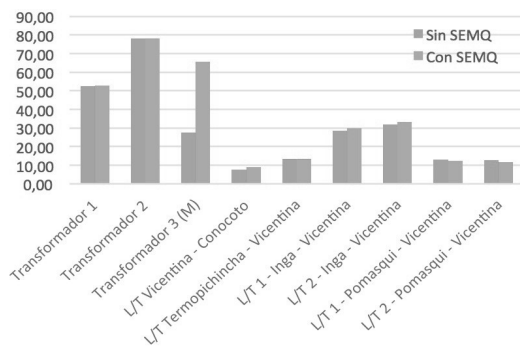


Figura 13: Cargabilidad Subestación Vicentina

4.2. ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS

Los eventos a ser simulados en el presente trabajo para su análisis son:

CN: Operación normal de la EEQ con la inclusión del Sistema Eléctrico Metro de Quito SEMQ.

C1: Salida del Transformador de la S/E Eugenio Espejo (T1) que alimenta al SEMQ.

C2: Salida del Transformador de la S/E Chilibulo (T2) que alimenta al SEMQ.

C3: Salida del Transformador de la S/E Vicentina (T3) que alimenta al SEMQ.

C4: Salida de un circuito del alimentador en 23 kV que conecta la S/E Eugenio Espejo con la S/ET Quitumbe.

C5: Salida de un circuito del alimentador en 23 kV que conecta la S/E Chilibulo con la S/ET La Magdalena.

C6: Salida de un circuito del alimentador en 23 kV que conecta la S/E Vicentina con la S/ET Universidad Central.

En las Fig. 14, 15 y 16 se muestran los perfiles de voltaje para cada uno de los casos de contingencias propuestos. Como se puede observar, los niveles de voltaje en las subestaciones Eugenio Espejo, Chilibulo y Vicentina (puntos de alimentación del SEMQ) y en

las 11 subestaciones del SEMQ, permanece dentro de los límites establecidos, cabe recalcar que para el evento C3 - Salida del Transformador T3 de la S/E Vicentina – en las S/ET Jipijapa y El Labrador se registran valores muy cercanos al límite establecido (21,84 kV y 21,82 kV respectivamente), como se observa en la Fig. 16.

En cuanto al nivel de cargabilidad de los transformadores, según se desprende de la Fig. 17, para todos los casos se registran nivel adecuados, inclusive en el evento C3 (Salida del Transformador T3 e la S/E Vicentina) para el cual el valor máximo registrado es 92,4% correspondiente al transformador TR_EESPJO-1 (M).

En lo que respecta a alimentadores e interconexiones a nivel de 23 kV se aprecian en las Fig. 18 y 19 que los niveles de cargabilidad no exceden el 80% en ninguno de los casos analizados.

Para el evento C6 (Salida de un circuito del alimentador en 23 kV que conecta la S/E Vicentina con la S/ET Universidad Central), se registra el máximo valor de cargabilidad en 75,41% para la línea L_VCNA_UCE_2.

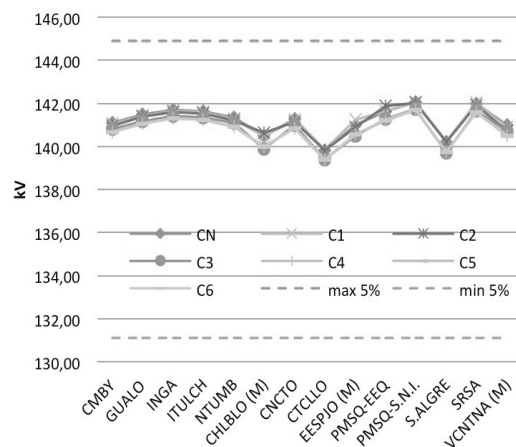


Figura 14: Perfiles de Voltaje – Barras 138 kV

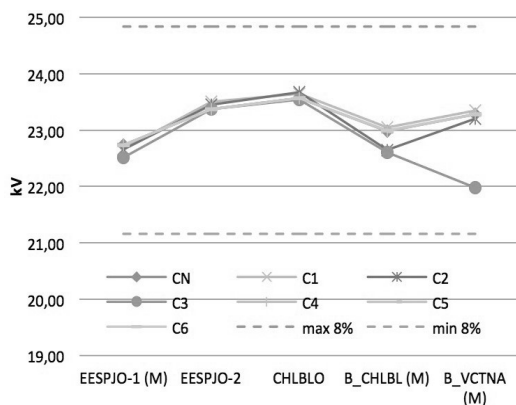


Figura 15: Perfiles de Voltaje - Barras 23 kV – EEQ

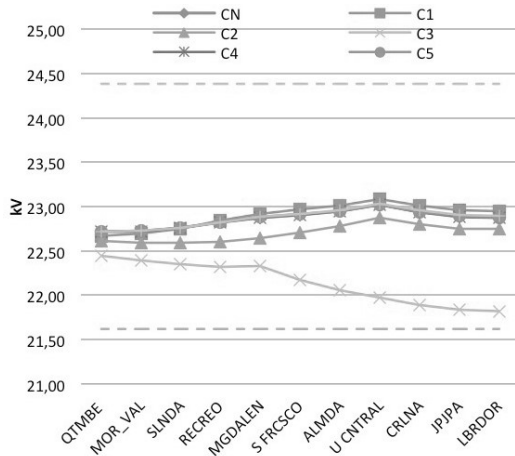


Figura 16: Perfiles de Voltaje – Barras 23 kV - SEMQ

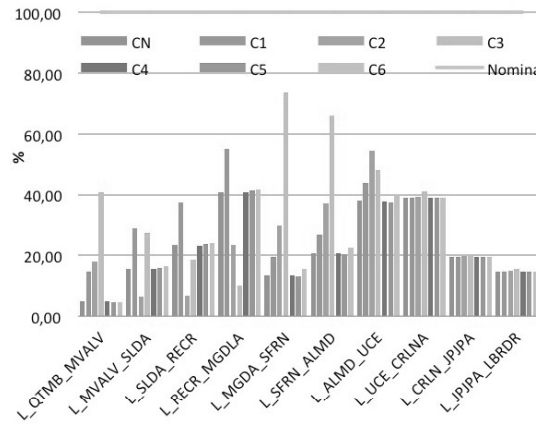


Figura 19: Cargabilidad – Alimentadores 23 kV – Sistema SEMQ

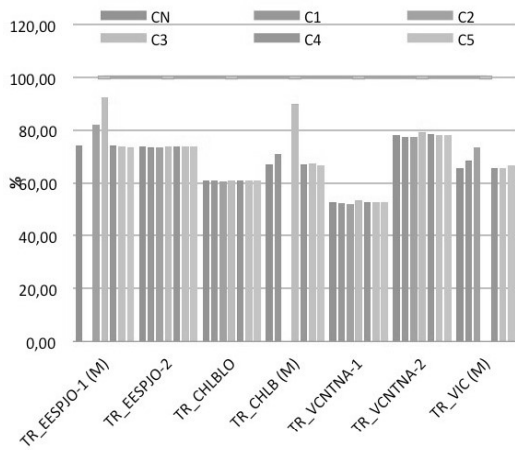


Figura 17: Cargabilidad – Transformadores 138/23 kV – EEQ

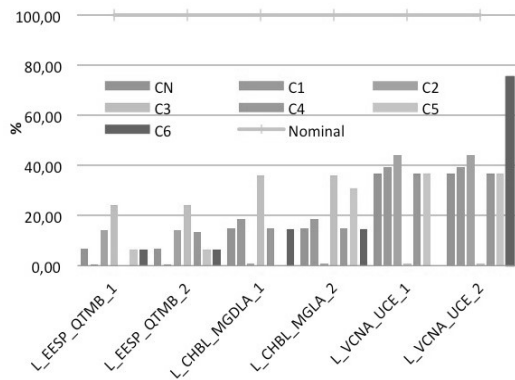


Figura 18: Cargabilidad – Alimentadores 23 kV al SEMQ

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un tren tiene tres etapas de funcionamiento: arranque, inercia y frenado, por lo tanto, los motores no funcionan a su potencia nominal en todo el recorrido y por ello se determinó una potencia promedio de tracción para cada tren de 630 kW, misma que es utilizada en análisis de estado estacionario realizado en el presente estudio.

La información proporcionada por Metro de Santiago S.A. fue de gran utilidad en el presente trabajo debido a la similitud, entre la Línea 2 y la Línea 1 del Metro de Quito, en número de trenes en circulación y longitud del recorrido.

Para la determinación de escenarios de flujos de potencia, en el presente trabajo se ha modelado la carga, considerando simulaciones de ubicación de los trenes a lo largo del recorrido de la Línea 1 del Metro de Quito.

Se determinó que la demanda promedio total de la Línea 1 del Metro de Quito se encuentra alrededor de 18,5 MW como resultado de la estimación de la carga de servicios auxiliares y potencia de tracción.

La incorporación del SEMQ al sistema de la Empresa Eléctrica Quito, no provocará cambios sustanciales desde el punto de vista de cargabilidad de elementos y perfiles de voltaje. Esto se debe a que la demanda requerida por el SEMQ es aproximadamente el 2,5% de la demanda total del sistema de la EEQ.

De todos los eventos de contingencias analizados, el evento C3 (Salida del Transformador de la S/E Vicentina (T3) que alimenta al SEMQ), es el de mayor afectación en cuanto a perfiles de voltaje y cargabilidad en el SEMQ.

Se recomienda que para el análisis de perfiles de voltaje a nivel de 23 kV del SEMQ, se use los límites de $\pm 6\%$ para garantizar un nivel de voltaje adecuado de alimentación hacia los equipos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado con el apoyo de la Unidad de Cargas Especiales de la EEQ, Metro de Santiago S.A. y Área de Equipos e Instalaciones del Metro de Quito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] De Quitumbe al Labrador en menos de 34 minutos. E P Metropolitana Metro de Quito [ONLINE]. Disponible:http://prensa.quito.gob.ec/Noticias/news_user_view/de_quitumbe_al_labrador_en_menos_de_34_minutos—17789
- [2] J. P. Martí, “1 edición del curso de especialización en Ingeniería Ferroviaria”, Cataluña, Mayo 2013, pp. 17.
- [3] Empresa Pública Metropolitana Metro de Quito, “Sistema Eléctrico Metro de Quito”, Quito, Ecuador, Enero 2016.
- [4] G. Soublette, “Sistemas de Recuperación de Energía para la Línea 1 del Metro de Santiago”, Santiago de Chile, Marzo 2011.
- [5] Equipo Consultor Metro de Madrid. (2012, Abril). La Línea 1 de Metro de Quito. [ONLINE]. Disponible: http://www.metrodequito.gob.ec/web/pdfs/1-Characterizacion_Geometrica_Trazado_e_Implantacion_1ra_Linea.pdf.
- [6] Metro de Santiago S.A., “Energía Mensual ION 2016”, Mayo 2016.
- [7] Metro de Santiago S.A., “Parque de Trenes AM 2013”, Mayo 2016.
- [8] “Ejecución de la Primera Línea del Metro de Quito, Fase 2: Construcción de las Obras Civiles y Provisión y Montaje del Sistema de Equipamiento e Instalaciones”, 01-2013.
- [9] Bases de Digsilent Power Factory del sistema eléctrico de la EEQ, Unidad de Cargas Especiales.

- [10] CONELEC Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución, Regulación No. CONELEC 004/01.



Mauro Jurado Egas.-

Nació en Quito, Ecuador en 1992. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Militar “Eloy Alfaro” y sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente es egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica realizando su proyecto de titulación en la Unidad de Cargas Especiales de la Empresa Eléctrica Quito. Sus áreas de interés están relacionadas con la Operación de Sistemas de Transmisión y Distribución, Protecciones Eléctricas y Calidad del Servicio.



José Marín Gaviño.-

Nació en Quito, Ecuador. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico, donde obtuvo el título de bachiller Técnico Industrial Especialización Electrónica en 2007. Actualmente es egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional y está realizando pasantías en la Unidad de Cargas Especiales de la Empresa Eléctrica Quito. Sus áreas de interés son: Planificación de Sistemas de Distribución e Instalaciones Eléctricas.



Fabián Pérez Yauli.-

Nació en Ambato, Ecuador. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2004, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan Argentina en 2013. Trabajo en la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP – Unidad de Negocio TRANSELECTRIC. Actualmente se desempeña como docente titular a tiempo completo en la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son: Protecciones Eléctricas y Procesamiento de señales.



Hugo Arcos Martínez.- Nació en Quito, Ecuador, en 1972. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 1998, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan Argentina en 2003.

Ha desarrollado su carrera profesional en diversas instituciones del Sector Eléctrico Ecuatoriano y actualmente se desempeña como Coordinador de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son: Modelación en Sistemas Eléctricos de Potencia, Estudios en Estado Estacionario y Transitorio y Confiabilidad de SEP.



Franklin L. Quilumba.- obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, Ecuador, en el 2008. Realizó sus estudios de posgrado en la Universidad de Texas Arlington, en Arlington, Estados Unidos de

América, donde obtuvo el grado de Master of Science in Electrical Engineering y el título de Doctor of Philosophy Ph.D. en el 2014.

Desde el 2014, el Dr. Quilumba es parte del cuerpo docente de la Escuela Politécnica Nacional, donde es Profesor Agregado. Sus áreas de interés son análisis, operación, estabilidad y control de sistemas eléctricos de potencia, modelación de carga, y planeación de generación y transmisión.