



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE EFECTOS DE VOLTAJES RIEL-TIERRA Y
CORRIENTES DE FUGA ELEVADAS EN EL METRO DE SANTIAGO**

DAVID NATANAEL YUPANQUI CONCHA

Profesor Guía:

Sr. Jorge Romo López

Profesores Comisión:

Sr. Oscar Moya Aravena

Sr. Augusto Lucero Alday.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

SANTIAGO – CHILE

MARZO, 2008.

ANÁLISIS DE EFECTOS DE VOLTAJES RIEL-TIERRA Y CORRIENTES DE FUGA ELEVADAS EN EL METRO DE SANTIAGO

El objetivo general del presente trabajo de título es realizar un análisis, apoyado en la elaboración de un programa de simulación de valores esperables de corrientes de fuga y voltajes riel-tierra en las líneas del Metro de Santiago. Y mediante estos valores, realizar una estimación de la cantidad de material perdido por corrosión galvánica durante los años de operación del Metro, realizar proyecciones a futuro y además, proponer algún método que permita controlar tanto valores de corrientes de fuga como voltajes riel-tierra elevados, considerando que lo primero afecta directamente la adecuada operación del sistema de tracción y lo segundo puede afectar directamente la seguridad de los operarios de este sistema de transporte.

Metro de Santiago tiene en este momento 5 líneas operativas, que transportan una gran cantidad de pasajeros a lo largo del día, los cuales se verían directamente afectados por una suspensión de servicio a causa de fallas estructurales originadas por corrosión o por ineficiencias en la operación del sistema.

En este contexto, se realizó una simulación aplicada en Matlab, basada en un conjunto de hipótesis debidamente fundamentadas, que permitió obtener valores cada 2 segundos de corrientes de fuga y voltajes riel-tierra a lo largo de los rieles, a medida que los trenes se desplazan entre estaciones consecutivas.

Como resultados relevantes, se obtuvo que la magnitud de los voltajes riel-tierra y de las corrientes de fuga son fuertemente sensibles a la resistencia de fuga riel-tierra. A la vez, la sensibilidad de estas variables tiene un valor relativamente más bajo con respecto a la resistencia longitudinal del terreno y a la resistencia de las barras guía.

Es relevante así orientar los esfuerzos, en cuanto a mantenimiento preventivo, en conseguir que las resistencias de fuga riel-tierra se mantengan en valores adecuados.

Como producto del estudio se entregan diversas recomendaciones para prevenir y reducir corrientes de fuga, tales como mantenimiento preventivo, uso de ánodos de sacrificio, medición regular de corrientes de fuga y voltajes riel-tierra a lo largo de las líneas, entre otras.

Se concluye que es posible mantener un control sobre los voltajes riel tierra y corrientes de fuga, sin embargo, se sugiere realizar estudios más acabados, que permitan realizar un adecuado programa de mantenimiento preventivo.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo he de agradecer a Dios por la oportunidad que me dió de poder estudiar en esta casa de estudios, así como también por todas las personas que ha puesto en mi camino, para poder llegar a puerto en esta travesía que ha durado más de 20 años.

Quisiera agradecer de forma especial a mi familia por todo el apoyo que me ha brindado a lo largo del tiempo, en especial a mis padres; estimo sobremanera la preocupación que han tenido de darme y exigirme el estudio, para poder llegar a ser un profesional. Quisiera agradecer también, a cada uno de mis amigos, que también han hecho posible el no desencantarme del camino elegido, tanto a aquellos que compartieron conmigo fuera del ámbito académico (a todos mis amigos parroquianos), que han permitido tener un espacio donde sentirse libre de las presiones académicas y me han ayudado en mi crecimiento espiritual y católico; así como también, a todos aquellos que compartieron esos largos días de estudio, donde parecía que esto no terminaría bien. Gracias a todos aquellos que compartieron conmigo un sillón donde dormitar luego de una noche en vela, y aquellos que ayudaron con sus conocimientos a complementar los míos. Amigos míos han sido un gran apoyo en mi vida, espero el camino nos lleve a compartir nuevamente celebraciones con y sin motivo.

Para todos los académicos que tuvieron el “agrado” de tenerme como estudiante, gracias por esta entrega desinteresada que realizan al formar a los futuros profesionales de nuestro país.

De forma especial a mi novia que ha compartido conmigo estos últimos años, no por eso los más fáciles, y ha sabido también, encausarme en la dedicación y devoción al estudio.

No quisiera olvidar a todos aquellos que alguna vez contribuyeron a mi crecimiento como persona, que me ha dejado ad portas de convertirme en ingeniero por la gracia de Dios.

Finalmente, gracias a la Virgen Santísima que me ha tomado en su seno y ha velado por mí y ha intercedido frente a su hijo, para permitirme llegar al fin de este camino y comenzar con nuevos proyectos la vida laboral.

INDICE DE CONTENIDOS

Índice de Contenidos	1
Índice de Figuras	5
Índice de Ecuaciones	8
Índice de Tablas	9
Introducción	12
Capítulo 1	13
Generalidades	13
1.1 Descripción General del Sistema Actual de Metro	13
1.2 Material Rodante	16
1.3 Puesta a Tierra del Sistema de Tracción.....	17
1.4 Normativa	17
Capítulo 2.....	18
Corrosión	18
2.1 Clasificación según el medio	19
2.1.1 Clasificación según el medio	19
a Corrosión Química	19
b Corrosión Electroquímica.....	19
2.1.2 Clasificación según forma.....	20
a Corrosión Uniforme.....	20
b Corrosión en Placas.....	20
c Corrosión por Picado	21
d Corrosión Intergranular	21
e Corrosión fisurante.....	21
2.2 Origen de Corrientes eléctricas durante la Corrosión	22
2.3 Algunos casos trágicos producidos por Corrosión.....	22
2.3.1 El accidente de Aloha	22

2.3.2 Mareas Negras	22
Capitulo 3.....	24
Generalidades de Corrientes de fuga.....	24
3.1 Como las Corrientes de fuga causan Corrosión	24
3.2 Detección.....	25
3.3 Registro de fugas.....	25
3.4 Mitigación.....	25
3.5 Sistemas de Protección	25
3.6 Control de Corrientes de fuga.....	26
3.6.1 RPCD.....	26
3.7 Modelación del Voltaje y Material Perdido.....	28
3.7.1 Ley de Faraday.....	30
Capitulo 4.....	31
Modelación de operación de un tren	31
4.1 Modelación de la Marcha del tren.....	31
4.2 Modelación de la resistencia equivalente de los motores	34
4.3 Modelación de la Ubicación de las S/E R.....	39
4.4 Modelo Circuital básico de Pérdidas de las línea de Metro	41
4.5 Metodología de Resolución	43
4.5.1 Evaluación de las resistencias del circuito.....	43
4.5.2 Evaluación de Potenciales y Corrientes de Fuga	44
4.6 Modelos Circuitales extendidos para Pérdidas.....	54
4.6.1 Modelo de los 15 Nodos	54
4.6.2 Modelo Extendido de n+2 Corrientes	55
4.7 Perdidas de Material.....	57
Capitulo 5.....	60
Efectos de las Pérdidas.....	60

5.1 Resultados del Modelo Extendido de n+2 Corrientes.....	60
5.2 Análisis de Resultados	75
5.3 Análisis de los efectos de la corrosión.....	73
5.4 Efectos sobre un contacto involuntario con los rieles	78
Capítulo 6.....	80
Conclusiones	80
Bibliografía	85
Anexo A.....	85
Modelación de la Marcha de un tren	85
A.1 Ecuación Dinámica.....	85
A.2 Sistema Discreto	85
A.3 Fuerza Motriz en función de la Corriente	86
A.4 Corriente de un Motor en función del tiempo	86
A.5 Fuerza motriz en función del tiempo	87
A.6 Fuerza de resistencia al rodado	87
Anexo B.....	89
Variaciones de la condición nominal	89
B.1 Variación en el voltaje de entrada	89
Anexo C.....	102
Variación de los Parámetros de Línea	102
C.1 Variación de la Resistencia de Fuga.....	102
C.2 Variación de la Resistencia Longitudinal del terreno	107
C.3 Variaciones de la resistencia equivalente de las barras guías	113
C.4 Variación de la Resistencia de Rieles	119
Anexo D.....	125
Efectos de la corriente por el cuerpo humano	125
Anexo E.....	127

Resultados de la simulación de Línea 5.....	127
E.1 Intervalo SE/R Santa Ana – Plaza de Armas	127
E.2 Intervalo SE/R Plaza de Armas - Baquedano	130
E.3 Intervalo SE/R Baquedano – Santa Isabel.....	134
E.4 Intervalo SE/R Santa Isabel – San Eugenio.....	137
E.5 Intervalo SE/R San Eugenio - Valdovinos.....	140
E.6 Intervalo SE/R Valdovinos - Pedreros	143
E.7 Intervalo SE/R Pedreros - Mirador	147

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1: Trazado de las líneas del Metro	13
Figura 2.1: Esquema de la corrosión de un metal, Zn, que se oxida a Zn ⁺² mientras que sus electrones reaccionan con el H ⁺ del medio produciendo H ₂	20
Figura 2.2: Algunos de los tipos de corrosión más comunes por influencia del medio, la estructura y composición del metal	21
Figura 3.1: Fuentes de Corrientes de fuga	24
Figura 3.2: Esquema del Diseño de Control de voltaje de rieles	27
Figura 3.3: Voltaje riel - tierra a lo largo de la línea desde V _{máx.}	28
Figura 3.4: Valor del Voltaje de riel entre S/E R	29
Figura 3.5: Densidad de Corriente a los largo de los rieles	29
Figura 4.1: Circuito equivalente de un motor serie	34
Figura 4.2: Conexión serie de motores para partida del tren	35
Figura 4.3: Conexión serie-paralelo de motores en etapa de tracción	35
Figura 4.4: Cambio de conexión serie a serie - paralelo de motores	36
Figura 4.5: Modelo básico para cálculo de corrientes de fuga.	42
Figura 4.6: Cajas inductivas	43
Figura 4.7: Corriente de fuga de riel a tierra I _{f1}	44
Figura 4.8: Método de Circuitos regionales	45
Figura 4.9: Voltajes de rieles para un voltaje de alimentación de 750 [V]	53
Figura 4.10: Corrientes de fuga para un voltaje de alimentación de 750 [V]	53
Figura 4.11: Modelo Circuitual de 15 nodos entre 2 S/E consecutivas	54
Figura 4.12: Resolución Método de los 15 nodos por superposición.	55

Figura 4.13: Segunda fuente del método de superposición.	55
Figura 4.14: Modelo para n intervalos	56
Figura 4.15: Corrientes para modelo de n intervalos.....	56
Figura 5.1: Circuito de simulación en $t = 6$ [s]	63
Figura 5.2: Corriente de fuga por cada segundo de operación.	66
Figura 5.3: Voltaje riel-tierra por cada segundo de operación.....	66
Figura 5.4: Distribución del Voltaje de riel entre S/E R.....	67
Figura 5.5: Distribución de voltaje a lo largo del riel para t operación 24 [s]	67
Figura 5.6: Voltaje del riel a 253 [m] de S/E R1, en función del tiempo.	68
Figura 5.7: Corriente de fuga a 750 [V] y un tren en el intervalo.	72
Figura 5.8: Voltaje riel-tierra a 750 [V] y un tren en el intervalo.....	72
Figura 5.9: Corriente de fuga a 750 [V] y dos trenes en el intervalo	73
Figura 5.10: Voltaje riel-tierra a 750 [V] y dos trenes en el intervalo	73
Figura 5.11: Corriente de fuga a 750 [V] y cuatro trenes en el intervalo	74
Figura 5.12: Voltaje riel-tierra a 750 [V] y cuatro trenes en el intervalo.....	74
Figura B.1: Corriente de fuga a 500 [V] y un tren en el intervalo.....	92
Figura B.2: Voltaje riel-tierra a 500 [V] y un tren en el intervalo	93
Figura B.3: Corriente de fuga a 500 [V] y dos trenes en el intervalo.	93
Figura B.4: Voltaje riel-tierra a 500 [V] y dos trenes en el intervalo.....	94
Figura B.5: Corriente de fuga a 500 [V] y cuatro trenes en el intervalo.....	94
Figura B.6: Voltaje riel-tierra a 500 [V] y cuatro trenes en el intervalo	95
Figura B.7: Corriente de fuga a 900 [V] y 1 tren en el intervalo.....	99

Figura B.8: Voltaje riel-tierra a 900 [V] y 1 tren en el intervalo	99
Figura B.9: Corriente de fuga a 900 [V] y dos trenes en el intervalo	100
Figura B.10: Voltaje riel-tierra a 900 [V] y dos trenes en el intervalo.....	100
Figura B.11: Corriente de fuga a 900 [V] y cuatro trenes en el intervalo.....	101
Figura B.12: Voltaje riel-tierra a 900 [V] y cuatro trenes en el intervalo	101
Figura C.1: Corriente de fuga cuando $R_f = 200$ [Ω].....	106
Figura C.2: Voltaje riel-tierra cuando $R_f = 200$ [Ω].....	106
Figura C.3: Corriente de fuga para $R_f = 400$ [Ω].....	107
Figura C.4: Voltaje riel-tierra para $R_f = 400$ [Ω]	107
Figura C.5: Corriente de fuga cuando $r_t = 30$ [Ω]	111
Figura C.6: Voltaje riel-tierra cuando $r_t = 30$ [Ω]	112
Figura C.7: Corriente de fuga cuando $r_t = 10$ [Ω]	112
Figura C.8: Voltaje riel-tierra cuando $r_t = 10$ [Ω]	113
Figura C.9: Corriente de fuga para resistencia de barras al doble de su valor estimado.....	117
Figura C.10: Voltaje riel-tierra para resistencia barras guías al doble de su valor estimado.....	117
Figura C.11: Corriente de fuga para resistencia de barras a la mitad de su valor estimado.....	118
Figura C.12: Voltaje riel-tierra para resistencia barras guías a la mitad de su valor estimado..	118
Figura C.13: Corriente de fuga para resistencia de rieles al doble de su valor estimado	122
Figura C.14: Voltaje riel-tierra para resistencia rieles al doble de su valor estimado.....	123
Figura C.15: Corriente de fuga para resistencia de rieles a la mitad de su valor estimado	123
Figura C.16: Voltaje riel-tierra para resistencia rieles guías a la mitad de su valor estimado ...	124
Figura F.1: Modelo Línea 5 aplicado en la simulación	151

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1: Ley de Faraday	30
Ecuación 3.2: Masa perdida de material, en función del tiempo.	30
Ecuación 4.1: Modelación de motor serie.....	36
Ecuación 4.2: Resistencia equivalente de 1 motor.....	37
Ecuación 4.3: Resistencia de un motor en función del tiempo	37
Ecuación 4.4: Resistencia equivalente del tren para motores en serie.	37
Ecuación 4.5: Resistencia equivalente del tren para motores en paralelo	37
Ecuación 4.6: Resistencia de barra guía para modelo básico de corrientes de fuga.....	43
Ecuación 4.7: Resistencia de rieles para modelo básico de corrientes de fuga.....	44
Ecuación 4.8: Resistencia riel - tierra para modelo básico de corrientes de fuga	44
Ecuación 4.9: Resistencia longitudinal del terreno para modelo básico de corrientes de fuga ...	44
Ecuación 4.10: Ecuaciones del método de circuitos regionales.....	45
Ecuación 4.11: Sistema de ecuaciones matriciales del modelo	45
Ecuación 4.12: Matrices del modelo básico de corrientes de fuga.....	45
Ecuación A.1: Ecuación dinámica de operación de un tren	85
Ecuación A.2: Ecuaciones de cinemática discretizada para análisis del movimiento	86
Ecuación A.3: Fuerza motriz en función de la corriente	86
Ecuación A.4: Corriente de un motor en función del tiempo	87
Ecuación A.5: Fuerza motriz en función del tiempo	87
Ecuación A.6: Fuerza de resistencia al rodado	88

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Características Generales de las Líneas de Metro [1].....	14
Tabla 1.2: Detalle de las instalaciones eléctricas de Metro de Santiago.....	15
Tabla 1.3: Detalle del sistema de distribución de Metro en 20 [kV].....	15
Tabla 4.1: Simulación Marcha de un tren	34
Tabla 4.2: Resistencia de equivalente de un motor y del tren.....	38
Tabla 4.3: Ubicación de estaciones de Línea 5 de Metro.....	39
Tabla 4.4: Ubicación de Subestaciones de Rectificación de Línea 5 de Metro.....	40
Tabla 4.5: Ubicación equidistante de estaciones de Línea 5 de Metro	41
Tabla 4.6: Ubicación equidistante de Subestaciones de Rectificación de Línea 5 de Metro	41
Tabla 4.7: Resistencias de barras guía en función del tiempo para modelo básico de corrientes de fuga.....	47
Tabla 4.8: Resistencias de rieles en función del tiempo para modelo básico de corrientes de fuga.....	48
Tabla 4.9: Resistencias riel - tierra en función del tiempo para modelo básico de corrientes de fuga.....	49
Tabla 4.10: Resistencias longitudinales del terreno en función del tiempo según modelo.	50
Tabla 4.11: Corrientes de fuga y Voltajes de riel en función del tiempo para modelo básico.	51
Tabla 4.12: Corrientes de fuga y Voltajes de riel en función del tiempo para modelo básico, considerando el peor de los casos.	52
Tabla 4.13: Gramos perdidos de material por corrientes parasitas.....	58
Tabla 5.1: Valores de parámetros de línea para simulación	63
Tabla 5.2: Corrientes de fuga y voltajes riel - tierra por cada segundo de simulación	65

Tabla 5.3: Valores de variables en función del tiempo de explotación del sistema.....	71
Tabla 5.4: Efectos producidos sobre el cuerpo humano, en función del voltaje.....	79
Tabla B.1: Valores de variables en función del tiempo de explotación del sistema a 500 [V].....	92
Tabla B.2: Valores de Corriente de fuga y Voltaje riel tierra para un voltaje de operación de 900 [V]	98
Tabla C.1: Valores obtenidos para las variables del sistema, cuando varía la resistencia de fuga.	105
Tabla C.2: Valores obtenidos para las variables del sistema, cuando varía la resistencia longitudinal del terreno	111
Tabla C.3: Valores obtenidos para las variables del sistema, cuando varía la resistencia de las barras guías.....	116
Tabla C.4: Valores de voltajes riel-tierra y Corrientes de fuga ante variaciones en la resistencia de los rieles.....	122
Tabla D.1: Efectos de la corriente de acuerdo a la corriente circulante.	125
Tabla E.1: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Santa Ana – Plaza de Armas	130
Tabla E.2: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Plaza de Armas - Baquedano	133
Tabla E.3: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Baquedano – Santa Isabel.....	137
Tabla E.4: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Santa Isabel – San Eugenio.....	140
Tabla E.5: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R San Eugenio - Valdovinos	143
Tabla E.6: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Valdovinos – Pedreros.	146

Tabla E.7: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Pedreros - Mirador 150

INTRODUCCION

Metro S.A. es una empresa del Estado dedicada al transporte masivo de pasajeros. Uno de sus principales objetivos es dotar a la ciudad de Santiago de un modo de desplazamiento público, moderno, rápido, eficiente y no contaminante, que permita a las personas disponer de más tiempo para ellas, sus familias y elevar así la calidad de vida de la capital.

La autoridad de Gobierno asignó a Metro la misión de ser el Eje Estructurante del Nuevo Sistema de Transporte de Público¹, mejorando la calidad de vida de las personas con servicios de excelencia, manteniendo el equilibrio financiero en una perspectiva de largo plazo.

Así, una de las tareas importantes de Metro es posibilitar la integración con otros modos de transporte, participando en la racionalización del uso de recursos de transporte y contribuyendo a mejorar la calidad de vida al disminuir los tiempos de viaje y la descontaminación a través de descongestionar vías.

Por tanto, Metro a lo largo de su historia ha contribuido eficientemente en temas como la descontaminación. La continúa construcción de extensiones, nuevas líneas y la incorporación de tecnologías con estándares internacionales, han ayudado a disminuir el impacto ambiental del sistema público de transporte. En temas de seguridad, Metro ha desarrollado un eficiente sistema de vigilancia en estaciones con personal de seguridad, cámaras de vigilancia, sistemas de alarma con equipos de última generación e infraestructura técnica; de esta forma Metro de Santiago se ha convertido en uno de los Sistemas de trenes más seguros del mundo.

Por tanto, al hablar de Metro, podemos hablar de uno de las empresas más prestigiosas de nuestro país manteniendo altos estándares de calidad para sus clientes. Por ello, y considerando el carácter integrado del nuevo Sistema de Transporte Público de la ciudad de Santiago, así como el rol relevante de la red de Metro dentro de este sistema, el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones estimó que el correcto funcionamiento de Transantiago, requiere que la Empresa de Transporte de Pasajeros Metro S.A. preste sus servicios en coordinación con los demás servicios de transporte público de pasajeros que conforman Transantiago, siendo, como se menciona en el párrafo anterior, en el eje del sistema de transporte.

Producto de la implementación del nuevo sistema de transporte, Metro ha sufrido un aumento sustancial de la afluencia de público en sus instalaciones; por tanto, se ha visto comprometido su funcionamiento normal en pro de satisfacer la demanda actual.

En vista de las nuevas condiciones de operación del sistema, se hace aún más necesario, el estudio del estado de sus instalaciones. En este contexto, el presente trabajo cuantificará los efectos producidos por las corrientes de fuga y sobrevoltajes elevados en los rieles del sistema, de forma que Metro adopte las medidas que corresponda, para mantener los estándares de calidad acostumbrados para sus usuarios.

¹ www.transantiago.cl

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 Descripción General del Sistema Actual de Metro

La red del Metro de Santiago se extiende de oriente a poniente y de norte a sur a través de 5 líneas (1, 2, 4, 4A y 5) actualmente en operación.

En la Figura 1.1 se observa la disposición geográfica de las líneas.



Figura 1.1: Trazado de las líneas del Metro

Las características generales de las líneas del Metro, son las siguientes:

- La Línea 2 está operando con un intervalo de 140 [s] en promedio y la Línea 4 con 170 [s].
- Los datos relevantes de las vías de cada línea se resumen en la Tabla 1.1

	Línea 1	Línea 2	Línea 4	Línea 4A	Línea 5
Pendiente máxima %	4.80	4.30	3.50	3.50	3.50
Número de .estaciones	24	22	22	6	18
Longitud total de Línea [m]	15.866	20.453	24.357	8678	15.684
Distancia promedio interestación [m]	662,6	934	1.106,3	1.534,6	887,3
Mayor distancia interestación [m]	990	1.432	1704,5	1.988	1543
Menor distancia interestación [m]	458	683	715,2	856	502
Radio mínimo de curva [m]	280	205	150	450	100

Tabla 1.1: Características Generales de las Líneas de Metro [1].

- iii. Metro cuenta con una potencia instalada de 236 [MW] sólo para el sistema de tracción. Y en cuanto a energía consumida, cabe destacar que aproximadamente el 81% del consumo total de energía de la red corresponde a los requerimientos de tracción.

El detalle de las instalaciones de Metro para Marzo del 2008 se puede ver en la Tabla 1.2:

Línea 1		
Subestaciones de Rectificación para 750 Vcc	cantidad	5 Bigrupos de 2x4000 KW + 4 Monogrupos de 1x4000 KW
Subestaciones Alumbrado y Fuerza para 380/220 V	cantidad	44 de 250 KVA + 6 de 630 KVA

Línea 2		
Subestaciones de Rectificación para 750 Vcc	cantidad	3 Bigrupos de 2x4000 KW + 7 Monogrupos de 1x4000 KW
Subestaciones Alumbrado y Fuerza para 380/220 V	cantidad	44 de 250 KVA + 2 de 350 KVA

Línea 4		
Subestaciones de Rectificación para 750 Vcc	cantidad	9 Bigrupos de 2x4000 KW
Subestaciones Alumbrado y Fuerza para 380/220 V	cantidad	38 de 250 KVA + 4 de 150 KVA + 4 de 1000 KVA

Línea 5		
Subestaciones de Rectificación para 750 Vcc	cantidad	10 Monogrupos de 1x4000 KW
Subestaciones Alumbrado y Fuerza para 380/220 V	cantidad	34 de 250 KVA + 6 de 350 KVA

Línea 4 A		
Subestaciones de Rectificación para 750 Vcc	cantidad	2 Bigrupos de 2x4000 KW c/u
Subestaciones Alumbrado y Fuerza para 380/220 V	cantidad	12 de 250 KVA

Tabla 2.2: Detalle de las instalaciones eléctricas de Metro de Santiago.

Cabe mencionar que la red de funcionamiento de Metro considera una red de distribución en 20 [kV], cuyas características se pueden ver en la Tabla 1.3:

SISTEMA DE ALIMENTACION ELECTRICA		
Subestación propia de Alta Tensión 110 KV / 20 KV	Cantidad	3x40 MVA , sirve a Línea 1, Línea 2 y Línea 5; la demanda máxima alcanza a 65 MVA
Subestación del Suministrador de Alta Tensión 110KV / 20KV	Cantidad	2 de 1x50 MVA que alimentan un Centro de Distribución que sirve a la Línea 4 y a la Línea 4 A ; la demanda máxima alcanza a 25 MVA

Tabla 3.3: Detalle del Sistema de distribución de Metro en 20 [kV].

iv. Es necesario mencionar además, que existe una Línea en planificación cuyas características se detallan a continuación:

- La nueva Línea Maipú - Pudahuel - Lo Prado - Quinta Normal tendrá una longitud de 14,2 kilómetros y 11 estaciones.
- La puesta en operación de esta Línea está prevista en dos periodos. El primer tramo Quinta Normal - Teniente Cruz será inaugurado a fines de Diciembre del 2009, mientras que el segundo tramo Teniente Cruz - Plaza de Maipú para fines de Diciembre del año 2010. .
- La inversión de la nueva Línea es de US \$ 670 millones.

- La demanda estimada diaria será de 198 mil pasajeros y la anual de 53 millones de pasajeros.

v. Con estos nuevos proyectos asignados a Metro, la Red en el año 2010 tendrá 104,5 kilómetros; 105 estaciones, y servirá a 21 comunas: Maipú, Pudahuel, Lo Prado, Estación Central, Santiago, San Miguel, La Cisterna, San Ramón, La Granja, San Joaquín, Recoleta, Huechuraba, Providencia, Ñuñoa, Macul, La Florida, Puente Alto, Peñalolén, La Reina y Las Condes.

1.2 Material Rodante

Los tipos de trenes utilizados en el Metro de Santiago corresponden a los siguientes [2]:

- NS74: Son trenes con motores de corriente continua y regulación de velocidad reostática (corriente de campo).
- NS93 y NS 04: Trenes con motores de inducción con regulación de velocidad vectorial (su alimentación primaria sigue siendo de 750 [V] corriente continua). También se les conoce como trenes tipo MP o de rodado neumático, para diferenciarlos de los trenes tipo MF de rodado en acero (que circulan sólo en Línea 4).

La cantidad de trenes por Línea (formación) ha variado en el tiempo, adecuándose a las demandas; por ejemplo:

En Línea 1 actualmente (desde el 2007) circulan 8 trenes NS04 de 8 coches (lo que da una capacidad total aproximada de 1456 pasajeros por tren), 3 trenes NS04 de 7 coches (con una capacidad aproximada de 1.256 pasajeros por tren), 16 trenes NS93 de 7 coches (con una capacidad aproximada de 1.194 pasajeros por tren) y 8 trenes NS93 de 8 coches (con una capacidad aproximada de 1.369 pasajeros por tren).

En total son 35 trenes, lo que en teoría significa una oferta de 44.000 [pasajeros/hora], con un intervalos de 106 [s] y una velocidad comercial promedio de 28 [km/h] (que en la práctica es muy improbable debido a los atochamientos de pasajeros; lo que conlleva un tiempo de detención mayor en cada estación y ha provocado que no se cumpla dicho intervalo).

En vista del incremento de pasajeros y de la renovación del sistema de transporte en Santiago, Metro proyecta al 2009 una mejora en la oferta, regulando el flujo de pasajeros e incorporando más trenes, de modo de llegar a un intervalo de 90 [s] que corresponde al límite técnico de la operación.

Por otra parte, en la Línea 5 extendida a Maipú, en el escenario 2011, se contemplan 48 trenes en total: 25 trenes NS74 de 5 coches (964 pasajeros por tren), 10 trenes NS93 de 6 coches (1.019 pasajeros por tren) y 13 trenes NS04 de 6 coches (1.082 pasajeros por tren). Según lo cual la oferta sería del orden de 35.000 [pasajeros/hora], con un intervalo de 100 seg, y una velocidad comercial del orden de 33 km/h.

En L4 y L4A son trenes AS2002 (acero Santiago) y son 30 trenes de 6 coches que se pueden dividir en 60 unidades de 3 coches, en el 2005 circulaban menos pues la L4 y L4A no estaban completas, por eso aparecen 50 trenes. Son de tracción asíncrona, frenado con recuperación.

Los trenes NS93 (neumático Santiago) son de tracción asíncrona, frenado con recuperación.

Los trenes NS74 son con motores de corriente continua conexión serie y de control reostático. Los Santiago B son con frenado con recuperación

En general, sólo será relevante la información de la línea 5 (trenes NS74 con motor de corriente continua), ya que en ella sobre su operación se realizará la modelación genérica usada en este trabajo. Por tanto, se considerarán sólo trenes de corriente continua como los mencionados anteriormente.

1.3 Puesta a tierra del sistema de tracción.

Es necesario considerar el sistema de puesta a tierra usado por Metro, ya que esto determina en gran medida el modo de operación del sistema de tracción y permite identificar la forma en que corrientes de fuga elevadas puedan afectar las estructuras.

El sistema de tracción de Metro, (750 [Vcc] entre positivo y negativo) está levantado de tierra (lo que se conoce comúnmente como "tierra flotante"). El positivo (o las barras guías), está montado sobre aisladores, con aislación para 2 [kV]; el negativo (o los rieles), están montados sobre unas placas aislantes con aislación para no más de 200 [V]. El negativo tiene con respecto a tierra un potencial variable que depende de la corriente de consumo de tracción y de la separación entre Subestaciones de Rectificación (S/E R, son las que entregan la alimentación en CC necesaria para el funcionamiento de los trenes), normalmente entre 50 [V] y 100 [V]; está suficientemente aislado para evitar que se vayan a tierra determinadas corrientes del tipo señales, que se utilizan para individualizar circuitos de vías ocupados o no ocupados por trenes, y por otra parte, es una aislación suficientemente mala para el caso en que se produzca una falla de positivo a tierra, caso en el cual se eleva el potencial del negativo, se rompe el dieléctrico y se establece por tierra un cortocircuito entre positivo y negativo que es "visto" por las protecciones y permite entregar seguridad y confiabilidad.

1.5 Normativa.

Como en todo sistema, la operación de Metro está supeditada al cumplimiento de Normas, nacionales e internacionales, que aseguren el buen funcionamiento del servicio, y por sobre todo, un nivel de seguridad óptimo para equipos, instalaciones, operadores y clientes del mismo.

La más importante es la Norma **EN 50163 Aplicaciones Ferroviarias**, la cual regula entre otras cosas, la tensión de alimentación en corriente continua hacia las vías, la regulación (caída de tensión según longitud) y la tensión de seguridad riel/tierra.

Otra Norma importante es la **Norma CEI N° 146** que tiene relación con la capacidad de sobrecarga que deben tener todos los equipos eléctricos que participan en la alimentación tracción, en dos horas y en 1 minuto.

También existen otras Normas que tienen relación con el nivel de aislación de los equipos de alimentación tracción con respecto a bastidores puestos a tierra y de los circuitos de control y mando con respecto a tierra. Por ejemplo, el sistema de Metro, de 750 [Vcc] debe soportar una prueba de 6 [kV] aplicados por 60 [s] y sus componentes de control, 2.500 [V] respecto a tierra.

CAPITULO 2

CORROSION

La corrosión es un fenómeno espontáneo que se presenta prácticamente en todos los materiales procesados por el hombre. Comúnmente se puede describir como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora y que incluso puede afectar la integridad física de los objetos o estructuras. La industria de la corrosión, si por ello entendemos todos los recursos destinados a estudiarla y prevenirla, mueve anualmente miles de millones de dólares. Este fenómeno tiene implicaciones industriales muy importantes; la degradación de los materiales provoca interrupciones en actividades fabriles, pérdida de productos, contaminación ambiental, reducción en la eficiencia de los procesos, mantenimientos y sobrediseños costosos.

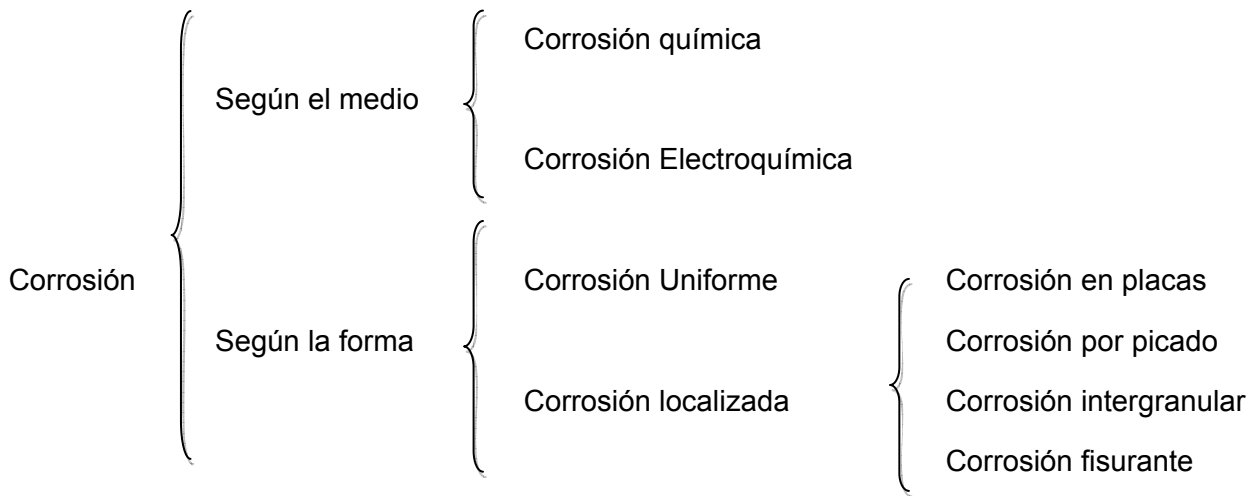
Su estudio consiste en la investigación del deterioro de los materiales por el medio ambiente local en el que son usados. Esto tiene gran interés práctico, ya que se ha comprobado en numerosos países que los prejuicios producidos por la corrosión representan del 1,5 al 3,5% del producto bruto nacional (solamente hablando del acero, de cada diez toneladas fabricadas por año se pierden dos y media por corrosión). Sin recurrir a medios agresivos, sino que tomando en cuenta sólo la atmosfera, se encuentra que la mayoría de los metales en contacto con el medio ambiente forman un sistema termodinámicamente inestable. Con la única excepción de unos pocos casos, los metales en contacto con el aire deberían reaccionar rápidamente y transformarse en óxidos. En algunos casos (aluminio, cromo, magnesio, etc.), tal pasaje a óxido iría acompañado por una disminución muy grande de energía libre. De tal modo, la termodinámica nos dice que *LOS METALES NO PUEDEN SER USADO EN UNA ATMOSFERA COMO LA TERRESTRE* [3].

Afortunadamente, del estudio de la Físico – Química, sabemos que la termodinámica sólo nos dice si una reacción puede o no ocurrir, pero no dice con qué velocidad lo hará. Es precisamente el hecho de que algunas velocidades de reacción sean lentas, lo que nos permite usar metales en la vida diaria. Desde el punto de vista termodinámico, en medio acuoso, el cobre sería más resistente que el aluminio y el cinc más resistente que el magnesio; sin embargo, los dos primeros en ácido nítrico, y los otros dos en soluciones alcalinas, muestran el comportamiento inverso. La termodinámica nos puede servir como orientación, pero el estudio cinético es el más significativo en corrosión. Desde el punto de vista cinético, se puede decir: *TODOS LOS METALES PUEDEN SER USADOS SIEMPRE QUE SU VELOCIDAD DE DETERIORACION SEA ACEPTABLEMENTE BAJA* [4]. De este modo en Corrosión se estudia la velocidad con que se deterioran los metales y las formas en que dicha velocidad de deterioración puede ser controlada.

Sin embargo, la corrosión es un proceso que no se puede estudiar bajo una mirada específica, se requiere colaboración de especialistas de diferentes disciplinas para su comprensión y posible solución. En resumen, para que los problemas de corrosión puedan ser estudiados con algún provecho, necesitamos actualmente una estrecha colaboración entre Químicos, Físicos del sólido, Ingenieros Electrónicos, Metalurgistas, Médicos, Electroquímicos, etc. Sin embargo, tal complementación no es fácil de conseguir, por tanto, no existen aún modelaciones de la corrosión que contemplen todos los efectos presentes en el proceso. Sin embargo, cada día se desarrollan nuevos recubrimientos, se mejoran los diseños de las estructuras, se crean nuevos materiales, se sintetizan mejores inhibidores, se optimizan los sistemas de monitoreo. Todo esto en un esfuerzo permanente por minimizar el impacto negativo de la corrosión.

2.1 Clasificación de los Procesos de Corrosión.

Los procesos de corrosión pueden ser clasificados, para su estudio, según el medio en el que se desarrollan o según su morfología. Una posible clasificación es la siguiente:



2.1.1 Clasificación según el medio.

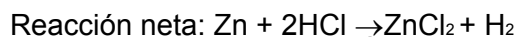
a. Corrosión Química

Corresponden a esta denominación todos aquellos casos en los que el metal reacciona con un medio no-iónico (por ejemplo, oxidación en aire a alta temperatura, reacción de una solución de yodo en tetra cloruro de carbono, etc.)

b. Corrosión Electroquímica

La corrosión es general es un fenómeno de naturaleza electroquímica que cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para que se forme una celda electroquímica, o celda de corrosión, se requiere la presencia de un material que cede electrones en contacto con otro que los acepta, y de un medio conductor de iones. El material que pierde electrones se conoce como ánodo y es el que experimenta la reacción de oxidación, mientras que el material que acepta los electrones se reduce y se le llama cátodo; el medio en el que se encuentran el ánodo y el cátodo y que permite el flujo de iones se conoce como electrolito. La oxidación, a pesar de la etimología de la palabra, no necesariamente involucra el oxígeno; la definición química es una pérdida de electrones.

El mecanismo de la corrosión puede ilustrarse a través de un material metálico inmerso en una solución de HCl –ácido clorhídrico–. En el caso del zinc, los átomos metálicos Zn ceden electrones convirtiéndose en cationes (Zn^{++}) mientras que los iones H^+ aceptan estos electrones formando moléculas de H_2 (Figura 2.1). Las reacciones involucradas son la disolución del zinc para formar $ZnCl_2$ y la producción de gas H_2 [2].



Todos los metales presentan una tendencia a perder electrones –oxidarse– cuantificada

a través de su potencial de oxidación. Entre más alto sea este potencial se dice que el metal es más noble –se oxida con mayor dificultad–. La tabulación de la resistencia de los materiales metálicos a la corrosión se conoce como serie galvánica. Las series galvánicas son particulares al medio corrosivo –por ejemplo, hay series galvánicas en solución salina, en solución ácida, etc. –, y son de gran utilidad a la hora de seleccionar un material para una aplicación específica.

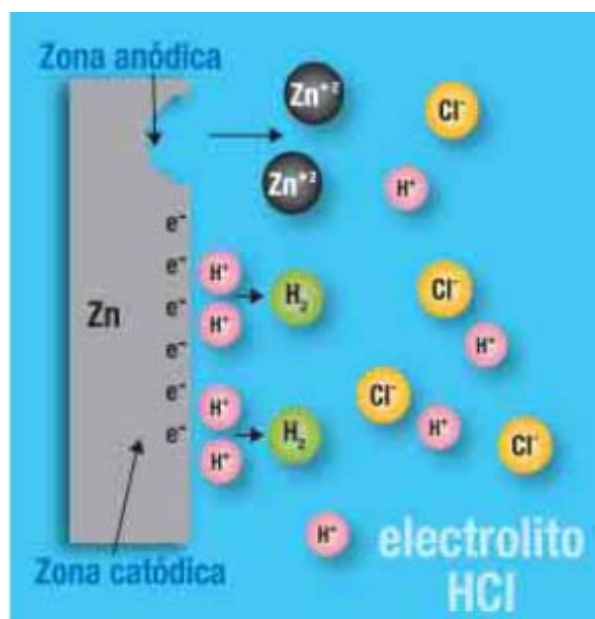


Figura 2.1: Esquema de la corrosión de un metal, Zn, que se oxida a Zn^{+2} mientras que sus electrones reaccionan con el H^+ del medio produciendo H_2

Se considera, desde el punto de vista de la participación de iones metálicos, que todos los procesos de corrosión serían electroquímicos. Sin embargo, es usual designar como corrosión electroquímica aquella que se produce con un transporte simultáneo de electricidad a través de un electrolito. A este importante grupo pertenecen: la corrosión en soluciones salinas y agua de mar, la corrosión atmosférica, la corrosión en suelos, etc.

2.1.2 Clasificación según forma

La clasificación según el medio es útil cuando se estudian mecanismos de ataque; sin embargo, cuando se quieren evaluar daños producidos por la corrosión, resulta muy conveniente la clasificación según la forma (ver Figura 2.2).

a. Corrosión uniforme:

Es la forma más benigna en la que se puede presentar la corrosión. El ataque se extiende en forma homogénea sobre toda la superficie metálica y la penetración media es igual en todos los puntos. Un ataque de este tipo permite calcular fácilmente la vida útil de los materiales corroídos.

b. Corrosión en Placas:

Incluye los casos intermedios entre corrosión uniforme y corrosión localizada. En este caso, el ataque se extiende más en algunas zonas, pero se presenta aún como un ataque general.

c. Corrosión por Picado:

Este tipo de ataque, así como el intergranular y el fisurante, son las formas más peligrosas bajo las cuales se puede presentar la corrosión. En estos casos de ataque localizado, la cantidad de material corroído no guarda relación con la magnitud de los inconvenientes que puede causar. Durante el picado, el ataque se localiza en puntos aislados de superficies metálicas pasivas, propagándose hacia el interior del metal en forma de canales cilíndricos. En la práctica, puede presentarse como perforación de cañerías o tanques.

d. Corrosión intergranular:

Se presenta como una franja estrecha de ataque que se propaga a lo largo de los límites de grano. Este ataque se extiende hasta inutilizar el material afectado.

e. Corrosión Fisurante:

Conocida más comúnmente como corrosión bajo tensiones. Puede presentarse cuando un metal es sometido simultáneamente a la acción de un medio corrosivo y de tensiones mecánicas de tracción. Se forman fisuras que pueden ser transgranulares o intergranulares y que se van propagando hacia el interior del metal, hasta que las tensiones se relajan o el metal se fractura. La velocidad de propagación oscila generalmente entre 1 y 10 mm/h.



Figura 2.2: Algunos de los tipos de corrosión más comunes por influencia del medio, la estructura y composición del metal

El desarrollo de un tipo de corrosión determinado tiene directa relación con la naturaleza del ambiente corrosivo y con las características composicionales y microestructurales del material. Todos estos factores, incluyendo la selección de los materiales, deberán tenerse en cuenta al diseñar el método de protección del sistema. Por ejemplo, la corrosión galvánica se presenta por el contacto entre dos metales con potenciales de oxidación diferentes. El material menos noble (con menor potencial de oxidación) tenderá a corroerse. Esto lo vemos muy a menudo en algunos tornillos que remachan estructuras bastante más nobles que ellos. Por otro lado, la corrosión intergranular está directamente relacionada con la microestructura del material. Los metales o aleaciones están formados por granos; en este tipo de corrosión se presenta un ataque localizado en las fronteras de grano y está generalmente asociado a impurezas que tienden a acumularse en dichas fronteras.

A temperatura ambiente, la forma de corrosión más frecuente y más seria es la electroquímica.

2.2 Origen de Corrientes eléctricas durante la Corrosión.

En los procesos de corrosión electroquímica, se tiene que, en general, circulan sobre el material que se corroe corrientes eléctricas que originan el ataque. Las causas más frecuentes son:

Dos o más metales distintos, en contacto (corrosión galvánica). Tal como ocurre en el aluminio en contacto con cobre o con grafito.

Presencia de fases diferentes en una misma aleación. Por ejemplo, aleaciones termotratables de aluminio, aceros inoxidable sensibilizados, etc.

Presencia de capas de óxidos conductores de electrones. Por ejemplo, óxido de laminación en chapas de hierro, o capas de aceite carbonizado en el interior de tubos de cobre.

Diferentes grados de aireación de una pieza metálica. Se observa que las zonas con escasez de oxígeno se comportan como ánodos cuando están unidas a otras con buena aireación.

Corrientes inducidas por circuitos eléctricos mal aislados. Tal es el caso de las corrientes de fuga en estructuras metálicas enterradas.

2.3 Algunos casos trágicos producidos por Corrosión

Es fundamental documentar todos aquellos casos de daños por corrosión no previstos que de algún modo se consideren especiales. Los científicos e ingenieros consultan frecuentemente estos archivos buscando aprender de las experiencias previas de forma tal que los costos de investigación y los riesgos en futuros proyectos puedan ser minimizados. A continuación se describirán algunos ejemplos, para tener en cuenta los resultados que se podrían obtener al hacer caso omiso de su presencia.

2.3.1 El accidente de Aloha

El 28 de abril de 1988 un boeing 737 de la aerolínea hawaiana Aloha con diecinueve años de uso, sufrió la ruptura de gran parte de su fuselaje a 24.000 pies de altura [1]. En un hecho sin precedentes, el piloto logró aterrizar en una isla evitando una catástrofe de proporciones mayúsculas. La investigación demostró que los productos de corrosión generados en los remaches que unen las láminas del fuselaje provocaron la ruptura de los mismos. El daño se genera en este caso por la filtración y estancamiento de agua entre las juntas – corrosión por hendiduras–. El accidente de Aloha y los resultados de la investigación marcaron un punto de inflexión en la historia de la industria aeronáutica, tanto desde el punto de vista del diseño como de los planes de mantenimiento de las aeronaves.

2.3.2 Mareas negras

Amoco Cádiz, Exxon Valdez, Braer, Erika, Prestige, son sólo una parte de una extensa y negra lista de petroleros hundidos. Los vertimientos de crudo de varios de ellos han tenido un impacto ambiental devastador, desestabilizando ecosistemas que han tardado decenas de años en recuperarse. Si bien algunas de estas catástrofes se deben a errores humanos, la mayoría están relacionadas con el ataque de la corrosión en los cascos y con programas de mantenimiento deficientes. En 1999 la tragedia del Erika ocasionó la contaminación de 400 kilómetros de playas en la costa Bretona. Tres años más tarde el Prestige vierte 15 mil toneladas de crudo en el mar Cantábrico y se hunde con otras 60 mil en sus depósitos.

Estos dos últimos accidentes han provocado cambios radicales en la legislación europea de transporte marítimo. Algunas de las medidas restringen directamente la circulación de los

viejos buques monocasco y establecen una normatividad conducente a reemplazar la totalidad de la flota por petroleros de doble casco. Se han exigido métodos de protección contra la corrosión más eficaces y, en el caso de los nuevos buques, materiales más resistentes. Vale la pena destacar el impulso importante que estos accidentes han dado al desarrollo de nuevas y más eficientes tecnologías de inspección.

CAPITULO 3

GENERALIDADES DE CORRIENTES DE FUGA

Las corrientes de fuga, para el propósito de la discusión de este trabajo, y su relación con la corrosión, se refieren a corrientes continuas que vienen de cualquier fuente extraña fluyendo a través de la tierra.

Corrientes alternas no son tomadas en cuenta debido a que ellas no contribuyen a los procesos de corrosión, excepto bajo desusuales y extremas densidades de corriente. Existen principalmente dos fuentes de corrientes de fugas: rectificadores de protección catódica conectados a equipos enterrados y corriente continua de los vehículos de tránsito en la ciudad que usan rieles para el retorno de corrientes. Con cualquier tipo de fuente de corriente, el efecto general es el mismo: algunas corrientes que vienen de estructuras extrañas entran a la tierra y fluyen a través de ella regresando a la fuente [4] (ver Figura 3.1).

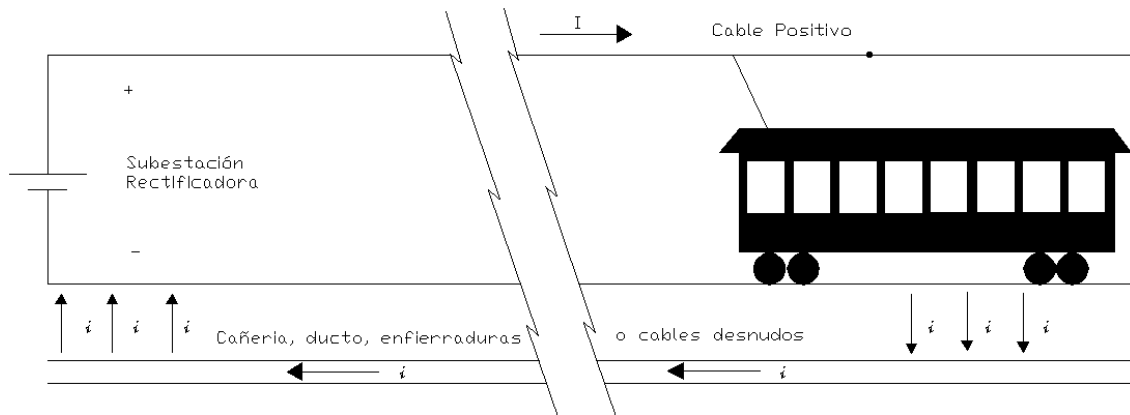


Figura 3.1: Fuentes de Corrientes de fuga

Las corrientes de fuga de sistemas de tracción impulsados por corriente continua son las más difíciles de controlar, ya que, las vías de la corriente están cambiando según la ubicación de los vehículos y también debido a que las corrientes que salen de las subestaciones de rectificación, están variando todo el día. Por estas razones trataremos en este capítulo corrientes de fuga originadas por sistemas de tránsito alimentado por corriente continua proveniente de las Subestaciones.

3.1 Cómo las corrientes de fuga causan corrosión

Las corrientes de fuga de los trenes que retornan a su fuente original no están limitadas enteramente a los caminos de menor resistencia. Algunas corrientes fluirán hacia todos los caminos posibles para retornar a su fuente de origen, en la Figura 3.1 por ejemplo, la mayor parte de la corriente del tren retornará a la subestación por los rieles, pero debido al contacto continuo del riel con el terreno, alguna corriente fluirá hacia la tierra, en la vecindad del tren, y luego regresará a los rieles en la vecindad de la subestación.

Si los rieles están tendidos sobre durmientes de madera y balastro, la cantidad de corriente que fluye a tierra será reducida apreciablemente. Por otra parte, si los rieles están en la calle y los tramos de rieles no están adecuadamente en contacto para mantener buena conductividad, la cantidad de corriente que fluye a tierra aumentará notablemente.

Ductos metálicos enterrados en cualquier parte a lo largo de estos senderos de corriente por cierto llegarán a formar parte del circuito mismo. Generalmente, ellos tomarán la corriente en algún punto remoto (quizás muchos kilómetros) de la subestación y perderán esta corriente cerca de la subestación. En el punto donde la corriente pasa de la estructura a la tierra, la corrosión ocurrirá. En el punto de descarga, la estructura que se corroe actúa como el electrodo positivo de una celda de corrosión convencional, y en algunas otras estructuras, tales como los rieles, actúan como electrodos negativos.

El metal será removido de la estructura en proporción directa a la corriente que se está descargando. Por ejemplo, el cobre será removido a la velocidad de disolución de otros metales. Actualmente daños muy serios pueden ocurrir con corrientes del orden de los miliamperes debido a que esta corriente se concentra en pequeños puntos tales como un defecto de recubrimiento.

3.2 Detección

Dónde se sospechan corrientes de fuga:

- 1.- En la vecindad de las subestaciones de corriente continua
- 2.- En el cruce con otras estructuras.
- 3.- Cruces de rieles

Todos los cruces de rieles deberían ser puntos de problemas con el potencial, aún a mucha distancia de la S/E; esto es debido a que roturas de las juntas o uniones de rieles y/o soldaduras quebradas, pueden ocasionar puntos de circuito abierto.

En estos puntos la corriente se descargará de los rieles a tierra a un lado de la rotura y fluirá a través de la tierra y estructura enterrada, regresando a los rieles en el otro lado de la rotura. Donde los cables o cañerías son positivos con respecto de los rieles, la corrosión puede ocurrir.

3.3 Registro de fugas.

Guardando registros de fallas por corrosión y colocándolos en un mapa, ayudará a mostrar dónde existen áreas con problemas. Tomando nota de las fallas por corrosión en otros ductos o equipos de servicio público, también indicará zonas de problemas.

3.4 Mitigación

Recubrimiento: Uno de los métodos más utilizados que facilita la protección contra las corrientes de fuga o algún tipo de corrosión en esta materia, es aislarlos completamente del ambiente por recubrimientos de alta resistencia. Esto ciertamente debería considerarse en instalaciones nuevas. Sin embargo, muchos de los sistemas existentes consisten en cables de nudos o cañerías y estos deberían ser protegidos de la corrosión por otros métodos.

Además, algunos cables aún son instalados con camisas metálicas desnudas y neutras por razones de puesta a tierra. Aún cuando una cañería está recubierta no se puede asumir que ésta posee un recubrimiento perfecto libre de poros. De aquí que otros sistemas de mitigación deben ser empleados para aliviar las condiciones de exposición.

3.5 Sistemas de protección.

Uniones de mitigación: La primera elección para mitigar los efectos de corrientes de fuga en cables (o cañerías) es conectar un alambre entre ellos y la estructura ajena o el polo

negativo que ocasiona la exposición.

Para planificar un alambre como puente eléctrico es deseable determinar su resistencia de manera que sea capaz de reducir toda la corriente de interferencia.

Switches de corriente reversa: Son sistemas que actualmente son formados por diodos de silicio y que previene que la corriente se reverse. Los diodos deben ser dimensionados para soportar cualquier peak de corriente esperada.

Ánodos: En una estructura ajena interferida, es impracticable instalar una unión de mitigación, sin embargo, es posible proteger contra la exposición con un sistema de ánodos. Este método es más efectivo cuando las corrientes de interferencia son pequeñas. El metal a ser protegido es conectado a un metal menos noble. Ambos metales deben ser ubicados en el mismo electrolito; su principal ventaja es la imposibilidad de reversar la polaridad en un sistema de protección catódica, así como también la independencia de la alimentación eléctrica y de fallas en los equipos eléctricos. Es especialmente útil para cañerías en ciudades.

Su desventaja es la incontrolable corriente de descarga de los ánodos. La regulación del potencial de protección o de la corriente de Protección sólo puede ser efectuada instalando un mayor número de ánodos.

Revisión de los rieles: Otra manera de aliviar alguno de los efectos de corrientes de fuga es mantener un programa de revisión y reparación de uniones rotas y aislaciones rieles-tierra. Esto reducirá significativamente las corrientes de fuga. El programa no las eliminará, sin embargo las reducirá.

3.6 Control de Corrientes de fuga.

En temas de implementación de sistemas para controlar las corrientes de fuga y voltajes riel-tierra elevados, es posible considerar los siguientes grupos:

- Sistemas Aterrados
- Sistemas No Aterrados.

En los sistemas aterrados la corriente retorna a la subestación por medio de los rieles, al igual que en los sistemas no aterrados. La diferencia está en que la corriente de fuga esperada retorna antes que se aleje de los rieles e ingrese a las estructuras circundantes; en estos casos se utiliza sistemas de acero para generar un sistema similar a las mallas de tierra, donde se tratará de cerrar el circuito. En general, este sistema considera el uso de diodos para conectar los rieles con el retorno a la Subestación; se pueden ver casos con diodos simples, casos en los que se consideran 3 tierras o como el que explicará a continuación, casos donde se utiliza tiristores.

Estos tipos se han empezado a utilizar durante los últimos 10 años, especialmente en Inglaterra (Manchester Metrolink, Sheffield Supertram y Docklands Light Railway) y algunos otros casos relevantes alrededor del mundo (MRT de Singapur, y MRTA de Bangkok). Sin embargo, estos sistemas han encontrado menor éxito que el esperado en el control de las corrientes de fuga.

Los sistemas no aterrados o “flotantes”, se llaman así, porque no tienen una referencia específica a tierra. El positivo y el negativo de la Subestación están flotantes, con respecto a tierra. Tales sistemas han estado en operación por largo tiempo.

3.6.1 RPCD

El RPCD o Tierra flotante con dispositivo de control de voltaje de rieles (Rail Potential Control Devices) puede ser en muchas formas, el sistema más moderno de uso del tiristor.

El sistema considera el uso de tiristores bidireccionales controlados; en la Figura 3.2 se puede ver un diagrama esquemático.

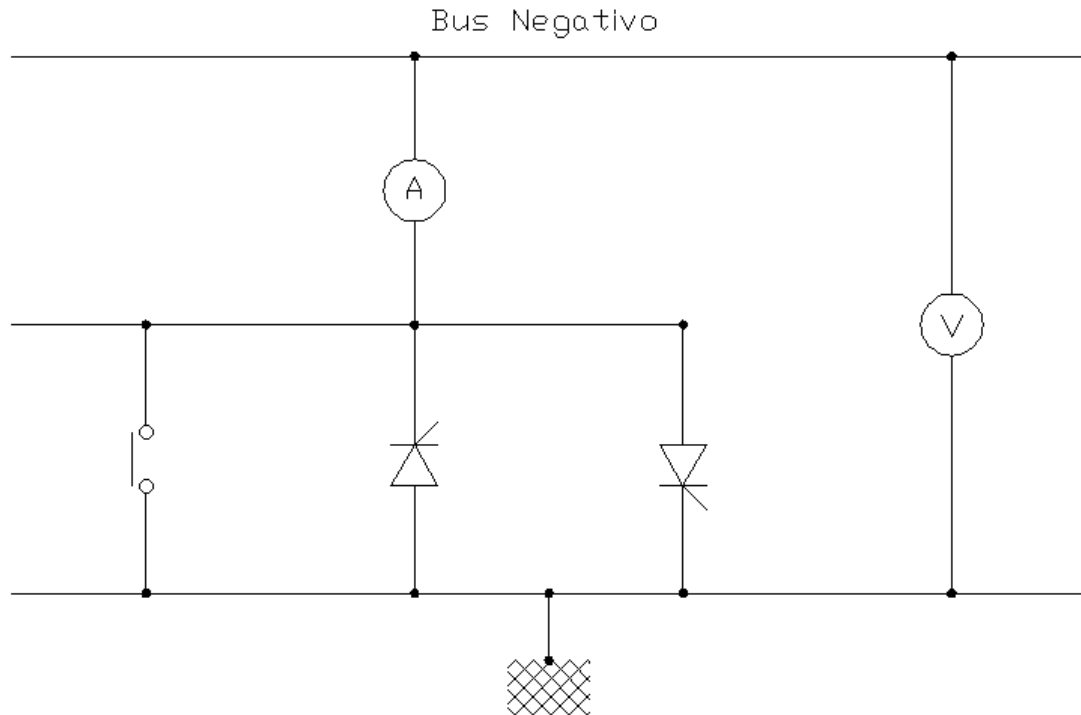


Figura 3.2: Esquema del Diseño de Control de voltaje de rieles

Este sistema ha sido utilizado con éxito en Turquía y en Hong Kong (el tren Ankara y el tren Lantau & Airport respectivamente). En este tipo de sistema, el voltaje riel-tierra es continuamente monitoreado. El sistema es activado si el voltaje medido es mayor que un voltaje de referencia. La puerta del tiristor será pulsada y el contactor recibirá la instrucción de cerrar; el tiristor apropiado conducirá dependiendo de la polaridad del voltaje en sus extremos. Esto será seguido por la acción del contactor, que tiene un retardo intrínseco en tomar la condición de encendido. Esto es deseable, ya que genera que la tasa de cambio del contactor sea menor que la del tiristor.

Si el contactor se prende, el voltaje en el tiristor cae y la conducción por el tiristor se apagará y la corriente conducida circulará a través del contactor. El contactor permanecerá en encendido mientras la corriente del RPCD caiga bajo el valor threshold de referencia, y su tiempo de encendido es más largo que el tiempo mínimo de encendido programado. El tiristor no será cambiado para el próximo ciclo de encendido en el que el contactor se encuentre abierto.

Este sistema, depende de tres parámetros principales que son definidos para generar el funcionamiento deseado del sistema. Estos son:

Voltaje de referencia: Corresponde al voltaje de threshold, que cambia el RPCD a encendido. Si el voltaje e medido es mayor que el voltaje de referencia, el dispositivo será encendido. Un valor alto de voltaje de referencia reduce las veces en que el dispositivo cambia

a encendido y reduce los valores de la corriente de fuga.

Corriente de referencia: Es la corriente de threshold, con la cual se alterna el sistema al estado apagado. Si la corriente medida a través del RPCD cae bajo la corriente de referencia, el dispositivo se apagará. Un valor mayor de corriente, significa que el dispositivo puede pasar de encendido a apagado muy pronto, por tanto reduce la corriente de fuga. El problema de tener un valor de corriente de referencia muy elevado, es la importancia que adquiere el contactor.

Tiempo de referencia: Corresponde al tiempo mínimo requerido para que el dispositivo se encienda inmediatamente después de que ha sido apagado. Si el dispositivo ha conducido por un tiempo superior al tiempo de referencia, el dispositivo se apagará, en algunos casos el tiempo definido puede llegar a ser 0. Este tiempo define la capacidad de poder cambiar rápidamente de encendido a apagado, la desventaja es que mantener un bajo valor de corriente de fuga, provoca que el cambio de posición es mucha frecuente, por tanto es dispositivo tiende a operar en demasía y gastarse.

Un sistema de tierra flotante con sistema de control de voltaje, es efectivo. RPCD tiene flexibilidad de hacer el sistema totalmente flotante definiendo el voltaje threshold bastante alto. Las corrientes de fugas dependen de las variables configuradas [5] [6].

3.7 Modelación del voltaje y material perdido.

Las redes de voltaje continuo son ampliamente usadas para alimentar los trenes en transporte urbano, usualmente en voltajes entre 600 y 1500 V. Muy a menudo, los rieles son usados como conductor de retorno para la corriente de tracción, además de su principal función, que es el soporte de trenes. Debido a esta configuración, es posible ver dos problemas principales: altos voltajes de riel y problemas de corrosión. Los dos problemas están interrelacionados.

Normalmente, todos los rieles son usados como retorno. Estos rieles tienen el mismo potencial en la misma sección; luego, pueden ser tratados como un único conductor para el estudio del problema de las corrientes de fuga.

Como es sabido, debido a las imperfecciones de aislación entre el riel y la tierra que lo rodea, existe un intercambio de corrientes entre ellos. Por ende, los rieles pueden adquirir voltajes elevados con respecto a tierra. Asumiendo que la conductancia es uniforme en la sección, el voltaje riel-tierra se puede apreciar en la Figura 3.3, para el caso en que un tren se encuentre a una distancia l de la Subestación de Rectificación:

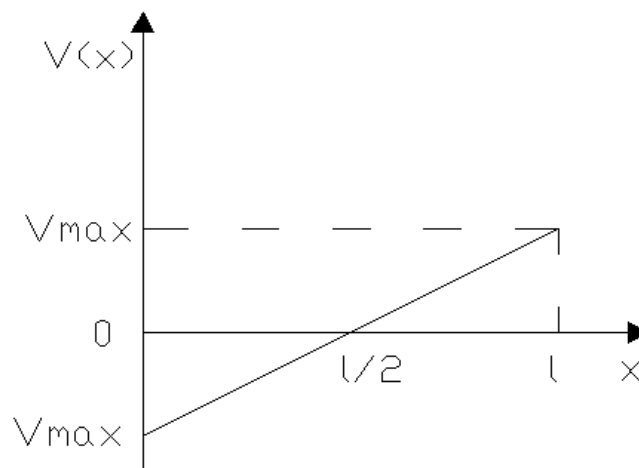


Figura 3.3: Voltaje riel - tierra a lo largo de la línea desde V_{max} .

En la Figura 3.3 el valor $V_{\text{máx}}$ corresponde valor voltaje más alto que se puede registrar en algún punto del riel. El cual, efectivamente se puede encontrar en el punto donde se ubica el tren en ese instante de tiempo.

Por lo tanto, si se considera el caso de un tren ubicado entre dos S/E Rectificadoras, a distancia x^* de la primera S/E, y que l es la distancia entre las SS/EE, la variación del voltaje riel-tierra a lo largo de la línea se puede ver en la Figura 3.4:

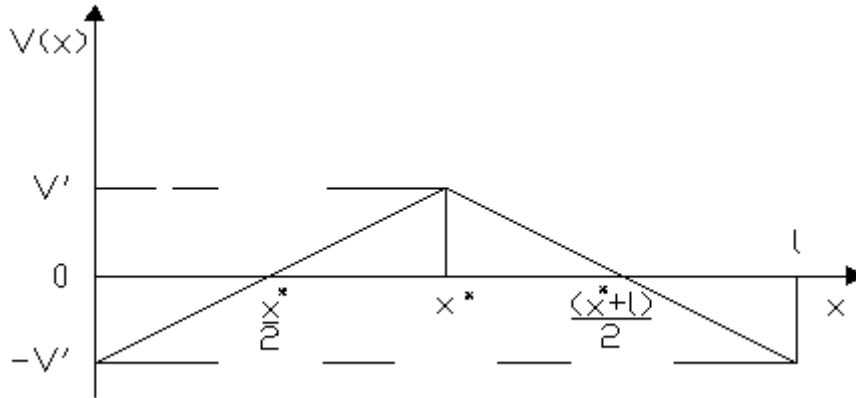


Figura 3.4: Valor del Voltaje de riel entre S/E R

De acuerdo a lo mostrado en las figuras anteriores, en una primera aproximación, es posible determinar el voltaje de los rieles en cualquier punto y en cualquier instante de tiempo, si se conoce durante el segundo de operación t^* , el valor del voltaje máximo V' y en que punto x^* de los rieles se produce.

El intercambio de corriente entre los rieles y tierra puede ser descrita como la densidad de corriente en función del tiempo $\delta(x)$, la que, en una primera aproximación, sigue la misma distribución que la mostrada por el voltaje (por ejemplo, para el caso de una S/E, ver Figura 3.5).

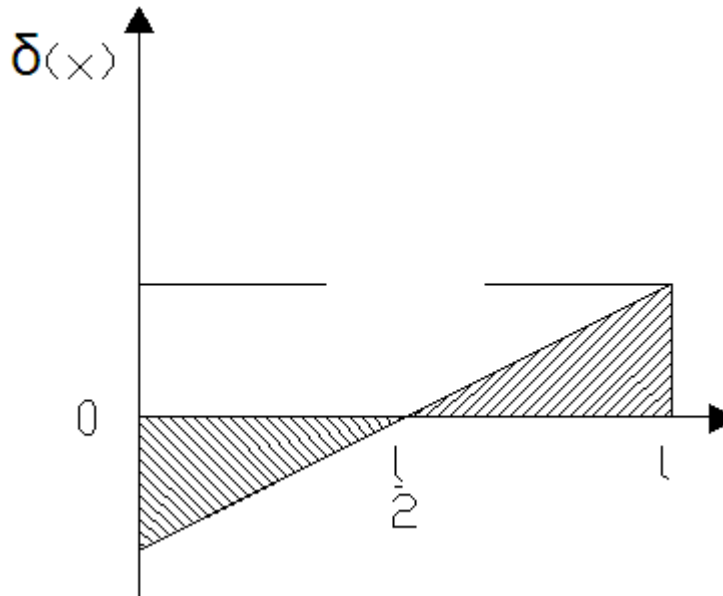


Figura 3.5: Densidad de Corriente a los largo de los rieles.

En el sector (L/2, L), la corriente circula desde los rieles a tierra, esta es corriente de fuga; En el sector (0,L/2), la corriente retorna de la tierra a los rieles.

$\delta(x)$ es llamada densidad de corrientes de fuga, de la cual el sistema de tracción y otros posibles sistemas cercanos son fuente.

Como se ha explicado antes, la corriente de fuga causa corrosión. En el caso de Metro, fácilmente puede causar corrosión en las estructuras metálicas enterradas, particularmente en las que están cerca de su rango de influencia, así como también, a los propios rieles.

Con el desarrollo de los sistemas de tránsito rápido, últimamente este problema ha sido más estudiado que el pasado. No obstante, debido a la ausencia de información, es muy difícil comparar las distintas aproximaciones, que han sido diseñadas con la experiencia acumulada de los años [7].

3.7.1 Ley de Faraday

En una "batería" corrosiva, la relación entre la cantidad del metal que reacciona y la carga eléctrica que se produce en la reacción, se puede cuantificar por la Ley de Faraday (Ecuación 3.1):

$$m = k \cdot Q \quad (3.1)$$

Donde:

m = Peso del metal perdido [gr].

k = Es el equivalente electroquímico del metal [gr/Coulombs]

Q = Carga eléctrica producida durante la reacción.

Supongamos que el efecto produce una magnitud de corriente constante I, durante un intervalo de tiempo t, luego nos queda:

$$m = k \cdot I \cdot t \quad (3.2)$$

En este caso, la constante k puede ser expresada en las unidades prácticas [kg/A/año], y corresponden a la tasa de corrosión que se produce en el material producto de la circulación de un Amper de corriente durante un año [8].

Si se considera el acero como hierro sin aleaciones (lo cual es una buena aproximación, ya que en general el porcentaje de otros elementos que posee el hierro no supera el 2%, como por ejemplo los aceros carbonatados), se puede obtener k a partir de su peso atómico y su valencia. Así se encuentra que el equivalente electroquímico del hierro es 6,055 [Kg/A/año]²

² 0,000192 [gr/A/s]

CAPITULO 4

MODELACIÓN DE OPERACIÓN DE UN TREN

Desde el punto de vista de tracción eléctrica es conveniente conocer las capacidades de transporte y la forma de calcularla, pues en el caso de modos eléctricos, de las variables de operación dependerá la potencia eléctrica que se debe prever y la energía que se debe suministrar para la alimentación del sistema.

Para el caso de la operación de Metro, se han realizado estudios previos donde se ha determinado de forma bastante exacta los valores de operación del sistema. Para el presente trabajo, se han tomado estos trabajos como base, bajo las siguientes consideraciones iniciales:

- La distancia recorrida por el tren se modelará a partir de la distancia promedio de las estaciones de la Línea 5.
- El tiempo de operación que el tren demora en llegar a la estación siguiente se ha determinado como el promedio de operación considerado para la Línea 5, a partir de la información obtenida de la Memoria del año 2005 de Metro de Santiago.

4.1 Modelación de la Marcha del tren.

Para la modelación del funcionamiento del sistema de Metro, primeramente se ha considerado la modelación de la marcha de un tren [9]. Como información general, se considera que los trenes consumen energía durante la etapa de tracción; en las etapas de Marcha Inercial y Frenado, no existe consumo de la red.

Para permitir un cálculo operacional más rápido de esta modelación estándar (a la hora de considerar variaciones a la simulación básica), se ha generado una aplicación en Matlab que permite simular y obtener los parámetros generales (tiempo, energía consumida por motor, esfuerzo de tracción, velocidad, consumo de energía, Fuerza Motriz y distancia recorrida), a partir de la distancia y el tiempo total del recorrido del tren, o en su efecto, de los tiempos de tracción y marcha inercial [10].

Los resultados de dicha modelación se pueden ver en la Tabla 4.1, para el caso de una distancia total de 879,2 [m] y un tiempo de 71 [s].

T	I	Fm total t	Fr	Acel. total	Veloc.	Distancia	Energía
[s]	[A]	[N]	[N]	[m/s ²]	[m/s]	[m]	[Wh]
0	180	43.656	-	-	-	-	-
1	313	128.244	29.624,00	0,48	0,48	0,24	17,10
2	446	212.832	29.636,44	0,89	1,37	1,16	80,99
3	580	298.056	29.659,51	1,30	2,67	3,18	221,06
4	580	298.056	29.693,21	1,30	3,97	6,50	328,69

T	I	Fm total t	Fr	Acel. total	Veloc.	Distancia	Energía
[s]	[A]	[N]	[N]	[m/s²]	[m/s]	[m]	[Wh]
5	510	253.536	29.726,90	1,08	5,05	11,01	355,65
6	510	253.536	29.754,90	1,08	6,13	16,60	431,72
7	510	253.536	29.782,89	1,08	7,21	23,27	507,78
8	510	253.536	29.810,88	1,08	8,29	31,02	583,84
9	530	228.840	29.838,88	0,96	9,25	39,79	587,99
10	490	203.880	29.863,76	0,84	10,09	49,46	571,43
11	570	199.716	29.885,53	0,82	10,91	59,96	605,25
12	525	176.496	29.906,79	0,71	11,62	71,23	569,69
13	598	174.168	29.925,19	0,70	12,32	83,20	596,04
14	585	168.396	29.943,33	0,67	12,99	95,86	607,63
15	572	162.624	29.960,70	0,64	13,63	109,17	615,71
16	559	156.852	29.977,29	0,61	14,24	123,10	620,44
17	546	151.080	29.993,10	0,59	14,83	137,64	622,37
18	533	145.308	30.008,39	0,56	15,39	152,75	621,19
19	520	139.536	30.022,91	0,53	15,92	168,40	617,06
20	507	133.764	30.036,65	0,50	16,42	184,57	610,11
21	494	127.992	30.049,61	0,47	16,89	201,23	600,50
22	481	122.220	30.061,79	0,45	17,34	218,34	588,69
23	468	116.448	30.073,45	0,42	17,76	235,89	574,48
24	455	110.676	30.084,34	0,39	18,15	253,84	557,99
25	-	-	30.094,45	- 0,15	18,00	271,92	-
26	-	-	30.090,56	- 0,15	17,85	289,85	-
27	-	-	30.086,67	- 0,15	17,70	307,63	-
28	-	-	30.082,78	- 0,15	17,55	325,26	-
29	-	-	30.078,90	- 0,15	17,40	342,74	-
30	-	-	30.075,01	- 0,15	17,25	360,06	-
31	-	-	30.071,12	- 0,15	17,10	377,24	-

T	I	Fm total t	Fr	Acel. total	Veloc.	Distancia	Energía
[s]	[A]	[N]	[N]	[m/s²]	[m/s]	[m]	[Wh]
32	-	-	30.067,23	- 0,15	16,95	394,27	-
33	-	-	30.063,34	- 0,15	16,80	411,14	-
34	-	-	30.059,46	- 0,15	16,65	427,86	-
35	-	-	30.055,57	- 0,15	16,50	444,44	-
36	-	-	30.051,68	- 0,15	16,35	460,86	-
37	-	-	30.047,79	- 0,15	16,20	477,14	-
38	-	-	30.043,90	- 0,15	16,05	493,26	-
39	-	-	30.040,02	- 0,15	15,90	509,24	-
40	-	-	30.036,13	- 0,15	15,75	525,06	-
41	-	-	30.032,24	- 0,15	15,60	540,73	-
42	-	-	30.028,35	- 0,15	15,45	556,26	-
43	-	-	30.024,46	- 0,15	15,30	571,64	-
44	-	-	30.020,58	- 0,15	15,15	586,86	-
45	-	-	30.016,69	- 0,15	15,00	601,93	-
46	-	-	30.012,80	- 0,15	14,85	616,85	-
47	-	-	30.008,91	- 0,15	14,70	631,62	-
48	-	-	30.005,02	- 0,15	14,55	646,24	-
49	-	-	30.001,14	- 0,15	14,40	660,71	-
50	-	-	29.997,25	- 0,15	14,25	675,04	-
51	-	-	29.993,36	- 0,15	14,10	689,21	-
52	-	-	29.989,47	- 0,15	13,95	703,24	-
53	-	-	29.985,58	- 0,14	13,81	717,12	-
54	-	-	29.981,96	- 0,14	13,67	730,86	-
55	-	-	29.978,33	- 0,14	13,53	744,46	-
56	-	-	29.974,70	- 0,14	13,39	757,92	-
57	-	-	29.971,07	- 0,14	13,25	771,24	-
58	-	-	29.967,44	- 0,14	13,11	784,42	-
59	-	-	29.963,81	- 0,14	12,97	797,46	-

T	I	Fm total t	Fr	Acel. total	Veloc.	Distancia	Energía	
[s]	[A]	[N]	[N]	[m/s ²]	[m/s]	[m]	[Wh]	
60	-	-	29.960,18	-	0,14	12,83	810,36	-
61	-	-	21.676,55	-	1,20	11,63	822,59	-
62	-	-	21.645,45	-	1,20	10,43	833,62	-
63	-	-	21.614,35	-	1,20	9,23	843,45	-
64	-	-	21.583,24	-	1,20	8,03	852,08	-
65	-	-	21.552,14	-	1,20	6,83	859,51	-
66	-	-	21.521,03	-	1,20	5,63	865,74	-
67	-	-	21.489,93	-	1,20	4,43	870,77	-
68	-	-	21.458,83	-	1,20	3,23	874,60	-
69	-	-	21.427,72	-	1,20	2,03	877,23	-
70	-	-	21.396,62	-	1,20	0,83	878,66	-
71	-	-	21.365,51	-	1,20	-	879,20	-

Tabla 4.1: Simulación Marcha de un tren

Es posible ver que para este recorrido se tienen 24 [s] de tracción, 36 [s] de Marcha Inercial y 11[s] de Frenado, considerando en la etapa de Frenado una desaceleración de 1,2 [m/s]

4.2 Modelación de la Resistencia equivalente de los motores.

Los trenes a considerar en este trabajo, como muchos de los vehículos de tracción eléctricos, operan con motores de corriente continua debido a los requerimientos de elevado torque motriz en el arranque, fácil regulación de velocidad, paso automático del funcionamiento como motor a funcionamiento como generador para permitir regeneración de energía (frenado regenerativo), solidez, robustez, buen rendimiento en todas las condiciones de funcionamiento, etc. [11].

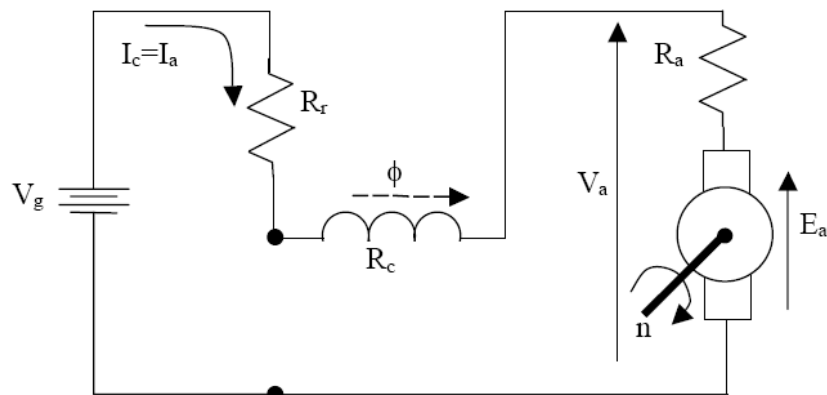


Figura 4.1: Circuito equivalente de un motor serie.

Los trenes NS74 del sistema de Metro, tienen 4 motores serie de corriente continua por cada coche motriz que exista en la configuración; sin embargo, la configuración de conexión de estos motores depende de la operación, en efecto, se conectan en serie (ver Figura 4.2) para la partida, cambiando a conexión serie-paralelo (Ver Figura 4.3) después de aproximadamente 5 segundos de tracción (esto es para obtener un alto torque de partida).

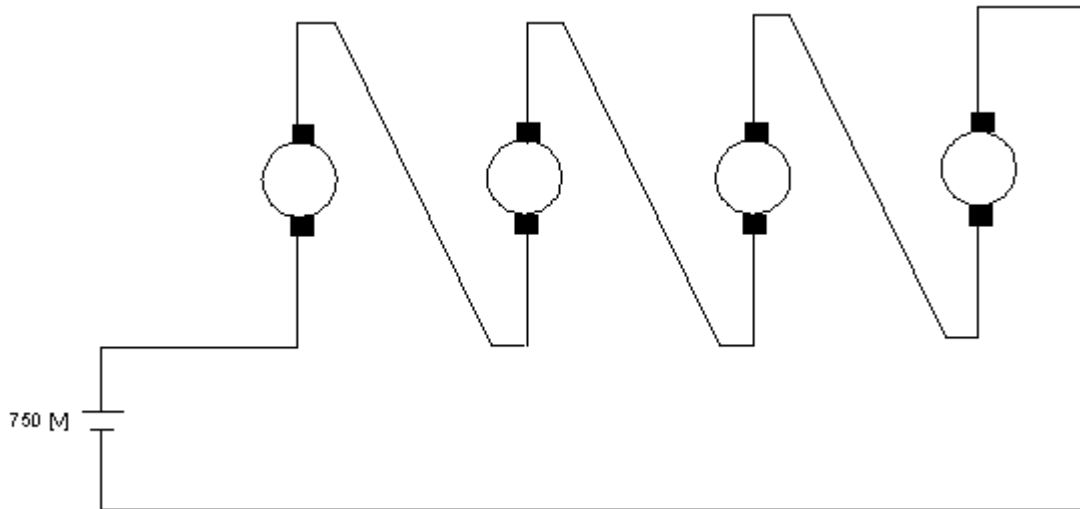


Figura 4.2: Conexión serie de motores para partida de tren.

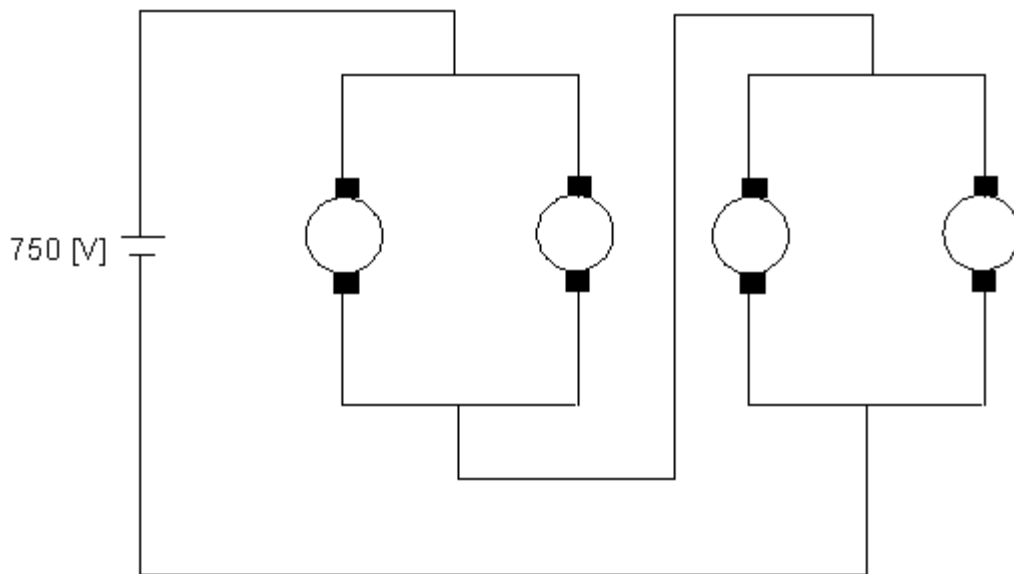


Figura 4.3: Conexión serie - paralelo de motores en etapa de tracción.

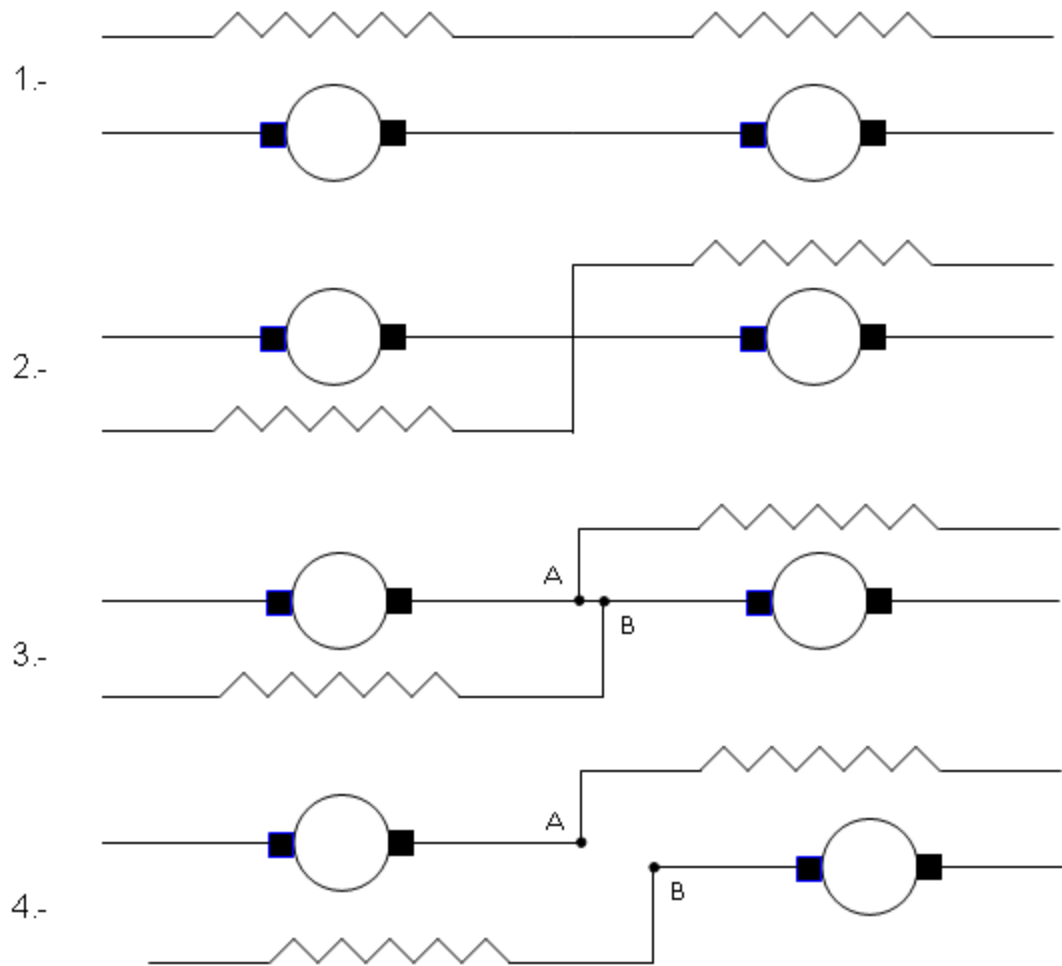


Figura 4.4: Cambio de conexión serie a serie-paralelo de motores.

La Figura 4.4 muestra el paso de conexión serie a serie-paralelo de un par de motores; en el punto 1 vemos en estado inicial de los motores (conexión serie), en el punto 2, se conectan 2 reóstatos de valor variable, de forma de poder controlar la corriente que circula por el campo de los motores. Estas resistencias se conectan a cada uno de los motores, punto 3, de forma que en el punto 4, permitan cambiar la conexión de los motores a paralelo, pero sin la variar bruscamente la operación de ellos.

Si se consideran las ecuaciones que determinan la operación de un motor serie, se tiene que (ver Figura 4.1):

$$V_g = I_a \cdot (R_c + R_a + R_r + G \cdot \omega_r) \quad (4.1)$$

Donde:

- V_g = Voltaje de alimentación
- I_a = Corriente de armadura
- R_c = Resistencia de Campo
- R_a = Resistencia de armadura

R_r	=	Resistencia variable que se conecta para controlar I_c
G	=	Inductancia rotacional de la máquina
ω_r	=	Velocidad angular mecánica

Por tanto, para determinar el valor de la resistencia equivalente del motor, debemos tomar en cuenta el término $R_r + R_c + R_a + G \cdot \omega_r$. Luego, para estimar la resistencia equivalente del motor, se puede escoger alguna de las siguientes opciones:

1. En base a los datos y/o pruebas en la máquina.
2. En función de la velocidad angular, obtenida de la simulación de la marcha del tren.
3. En función de la corriente de armadura que circula por la máquina, determinada de la misma forma que la opción anterior.

De las opciones anteriores, se ha escogido la tercera. Así, considerando que la alimentación de cada motor es aproximadamente 750 [Vcc], además de las configuraciones de conexión de los motores, se tiene que los valores se obtienen de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. La resistencia de la configuración es:

$$R_{eq} = \frac{750}{I_a} \quad (4.2)$$

Por tanto, la resistencia de un motor en función del tiempo queda definida por:

$$R_{eq} = \begin{array}{ll} -0,96 \cdot t + 4,17 & 0 \leq t < 3 \\ 1,3 & 3 \leq t < 5 \\ 1,47 & 5 \leq t < 9 \\ 0,125 \cdot t + 0,295 & 9 \leq t < 11 \\ 0,121 \cdot t - 0,014 & 11 \leq t < 13 \\ 1,227 \cdot t - 14,7 & 13 \leq t < 59 \\ \infty & 59 \leq t \end{array} \quad (4.3)$$

2. Como la corriente de la simulación de la marcha de un tren corresponde a la corriente que circula por motor, se tiene que para configuración serie, el valor de la corriente, es el mismo para los 4 motores de un coche motriz (ver Figura 4.2); por tanto, la resistencia equivalente de éstos corresponde al valor de la ecuación 4.2. Para la resistencia equivalente del tren, dependerá entonces, de la cantidad de coches motrices que se encuentran en paralelo; por tanto se tiene que:

$$R_{tren} = \frac{R_{eq}}{\text{cantidad coches motrices}} \quad (4.4)$$

3. Cuando la configuración de los motores cambia de serie a serie-paralelo, se tienen 2 pares de motores en paralelo (ver Figura 4.3), por tanto la resistencia equivalente del tren será:

$$R_{tren} = \frac{R_{eq}}{2 \cdot \text{cantidad coches motrices}} \quad (4.5)$$

En la siguiente tabla se pueden ver los valores evaluados de la resistencia equivalente

del tren para la etapa de tracción del caso presentado en la tabla 3, considerando 3 coches motrices.

T	I	R_{eq}	R_{tren}
[s]	[A]	[Ω]	[Ω]
0	180	4,17	1,39
1	313	2,4	0,8
2	446	1,68	0,56
3	580	1,29	0,43
4	580	1,29	0,43
5	510	1,47	0,24
6	510	1,47	0,24
7	510	1,47	0,24
8	510	1,47	0,24
9	530	1,42	0,24
10	490	1,53	0,26
11	570	1,32	0,22
12	525	1,43	0,24
13	598	1,25	0,21
14	585	1,28	0,21
15	572	1,31	0,22
16	559	1,34	0,22
17	546	1,37	0,23
18	533	1,41	0,24
19	520	1,44	0,24
20	507	1,48	0,25
21	494	1,52	0,25
22	481	1,56	0,26
23	468	1,6	0,27
24	455	1,65	0,27

Tabla 4.2: Resistencia de equivalente de un motor y del tren

4.3 Modelación de la Ubicación de S/E R.

En las tablas 4.3 y 4.4 se muestran los datos obtenidos de la Línea 5 de Metro de Santiago, las que posteriormente serán usadas para determinar el modelo de la línea a aplicar en las simulaciones [1].

Estación	PK³	Δ Estaciones [m]
Anden Maniobras 1	1.198	
Santa Ana	1.401	203
Plaza de Armas	2.175	774
Bellas Artes	2.755	580
Baquedano	3.905	1.150
Parque Bustamante	4.407	502
Santa Isabel	5.000	593
Irarrázaval	5.739	739
Ñuble	7.282	1.543
Rodrigo de Araya	8.438	1.156
Carlos Valdovinos	9.476	1.038
Camino Agrícola	10.097	621
San Joaquín	10.916	819
Pedrero	11.976	1.060
Mirador	12.821	845
Bellavista de La Florida	13.725	904
Cola de Maniobras	14.030	305

Tabla 4.3: Ubicación de estaciones de Línea 5 de Metro

³ PK: "Punto Kilometro", las distancias en las líneas hacen referencia al Andén de Maniobras 1 (ubicado en uno de los extremos de las vías), luego la distancia se referencia en kilómetros con respecto a este Andén.

S/E R	PK	Δ S/E R [m]	Δ Alimentada ⁴ [m]
Santa Ana	1.530		689
Plaza de Armas	2.244	714	1.250
Baquedano	4.030	1.786	1.419
Santa Isabel	5.082	1.052	1.468
San Eugenio	6.965	1.883	2.115
Valdovinos	9.311	2.346	2.451
Pedrero	11.866	2.555	1.854
Mirador Azul	13.019	1.153	1.588

Tabla 4.4: Ubicación de Subestaciones de Rectificación de Línea 5 de Metro

Estaciones	PK
Anden Maniobras 1	1.198
Santa Ana	1.401
Plaza de Armas	2.281
Bellas Artes	3.161
Baquedano	4.041
Parque Bustamante	4.921
Santa Isabel	5.801
Irarrázaval	6.681
Ñuble	7.561
Rodrigo de Araya	8.441
Carlos Valdovinos	9.321
Camino Agrícola	10.201
San Joaquín	11.081
Pedrero	11.961

⁴ La distancia alimentada (Δ Alimentada) corresponde a la distancia medida entre los puntos intermedios que unen la S/E R precedente y consecuente con la S/E R considerada.

Estaciones	PK
Mirador	12.841
Bellavista de La Florida	13.721
Cola de Maniobras	14.030

Tabla 4.5: Ubicación equidistante de estaciones de Línea 5 de Metro

Subestaciones de Rectificación	PK
Santa Ana	2.000
Plaza de Armas	3.604
Baquedano	5.208
Santa Isabel	6.812
San Eugenio	8.416
Valdovinos	10.020
Pedrero	11.624
Mirador Azul	13.228

Tabla 4.6: Ubicación equidistante de Subestaciones de Rectificación de Línea 5 de Metro

En las tablas 4.5 y 4.6 es posible ver la ubicación de las Estaciones y de las Subestaciones para la simulación, siendo equidistante la separación entre cualquier Estación (o Subestación) y la siguiente, de forma de simplificar el problema.

La distancia para el modelo se obtuvo dividiendo la distancia total de la línea por la cantidad de estaciones o subestaciones consideradas, según corresponda. Se obtuvo entonces, una distancia de 880 [m] para las estaciones, y de 1.604 [m] para las subestaciones⁵.

4.4 Modelo Circuital básico de Pérdidas de las líneas de Metro.

Como se mencionó anteriormente, en Metro se entrega energía mediante voltajes continuos de 750 [V] nominales, aplicados entre las barras guías y los rieles. Ésta energía es aplicada por los puestos rectificadores distribuidos a lo largo de las líneas, de forma que puedan alimentar un sector determinado, considerando en su diseño y ubicación, la alimentación de la mitad del tramo correspondiente a la subestación rectificadora adyacente.

Los elementos conectados al circuito de alimentación de los trenes poseen un valor de resistividad estimado por el fabricante, el cual, para el circuito a evaluar, determinará la resistencia de dicho elemento, dependiendo además del largo considerado para un intervalo específico. Simplificando aún más el modelo mostrado en el punto anterior, se analizará en

⁵ En anexos se puede ver un diagrama del modelo de la línea.

principio un tramo de línea ubicado entre dos subestaciones adyacentes, donde las estaciones coinciden en ubicación con dichas subestaciones.

En este escenario, se define el circuito presentado en la Figura 4.5, como modelo básico para evaluar corrientes de fuga y voltajes riel tierra de Metro.

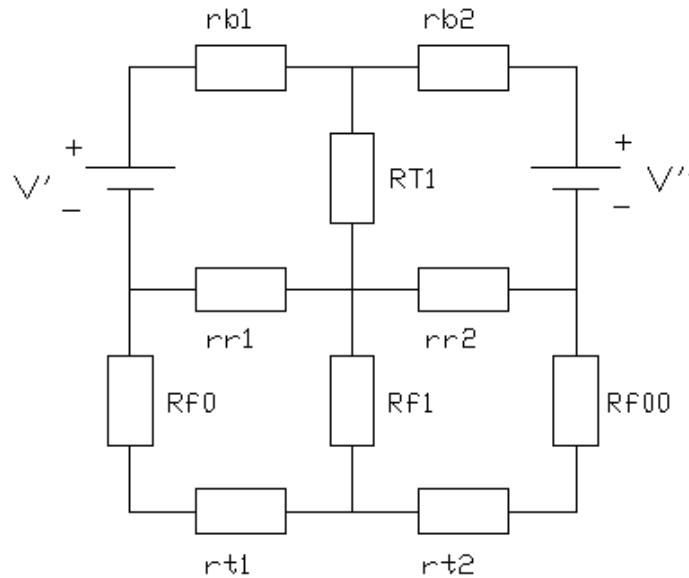


Figura 4.5: Modelo básico para cálculo de corrientes de fuga.

En este circuito se distinguen los siguientes parámetros:

- V' y V'' = Voltajes continuos que proporcionan las subestaciones de rectificación.
- rb = Resistencias longitudinales de barras guías, se evalúan considerando la distancia entre el tren y la subestación correspondiente, y un valor de 0,0278 [Ω /km/barra].
- rr = Resistencias longitudinales de los rieles, se evalúan considerando la distancia entre el tren y la subestación correspondiente, y un valor de 0,0474 [Ω /km/riel].
- $Rf0$, $Rf1$ y $Rf00$ = Resistencia entre riel y tierra para cada tramo, se evalúan considerando la distancia entre el tren y la subestación correspondiente y un valor de 400 [Ω /km].
- rt = Resistencias longitudinales del terreno, se evalúan considerando la distancia entre el tren y la subestación correspondiente y un valor de 20 [Ω /km].
- R_{tren} = Representa la resistencia de un tren a diferentes distancias de las S/E, dichos valores son los obtenidos a partir de la simulación de la marcha del tren, de la forma explicada en el apartado 3.2

La resolución de este circuito permitirá obtener corrientes de fuga y voltajes riel-tierra segundo a segundo [12].

4.5 Metodología de resolución

Datos:

- Voltajes de SS/EE Rectificadoras, 750 [Vcc], para condiciones normales.
- Distancia entre el tren y las subestaciones, determinada por la simulación de la marcha del tren.
- Resistencia equivalente de los trenes (apartado 4.2), trenes ubicados en las distancias correspondientes a alguna de las Subestaciones (inicio o fin del tramo), no afectan los potenciales ni las corrientes de fuga. Si el tren se encuentra en marcha inercial o frenado, se considerara como circuito abierto ($R_{\text{tren}} = \infty$).
- Resistencia específicas de barras guías: rb1 y rb2, según valores de apartado 4.4.
- Resistencia específicas de rieles: rr1 y rr2, según valores de apartado 4.4.
- Se desprecia valor de resistencia de contacto rieles-cajas inductivas⁶, sin embargo, se debe agregar al valor de la resistencia de rieles 0,004 [Ω/km], producto de la resistencia equivalente de las cajas inductivas (se consideran 4 cajas inductivas/km).
- Resistencia específicas de aislación riel-tierra: Rf0, Rf1, Rf00; según valores de apartado 4.4.

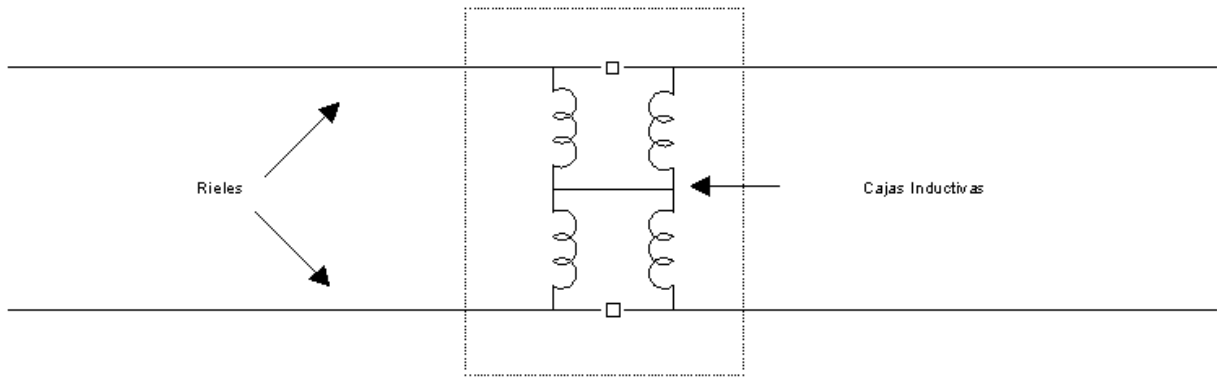


Figura 4.6: Cajas Inductivas

4.5.1 Evaluación de las resistencias del circuito.

1. Resistencias de barras: Considerando que hay 4 barras en paralelo, se tiene.

$$r_{bi} = \frac{0,0278}{4} \cdot L_i \quad (4.6)$$

Donde el índice i indica el número del tramo ($i = 1,2$) y L_i es la longitud de cada tramo en [km], que se determina de acuerdo a la simulación de marcha del tren (apartado 4.1).

2. Resistencia de rieles: Considerando que hay 4 rieles en paralelo y que las resistencias de enrollados de las inductancias de cada caja inductiva suman 0,001 [$\Omega/\text{km} \cdot \text{riel}$]

⁶ Las cajas inductivas están constituidas por diversos enrollados, algunos de alambre delgado y otros formados por barras de sección rectangular; estos últimos son los que permiten continuidad eléctrica de los rieles y permite la transmisión de señales, particularmente las que indican la ubicación de los trenes. Ver Figura 4.6

$$rri = \frac{0,0474 + 0,004}{4} \cdot Li \quad (4.7)$$

3. Resistencia riel-tierra: considerando que hay 4 rieles en paralelo y que la circulación de corrientes de fuga se evaluará por sectores de acuerdo a la siguiente Figura.

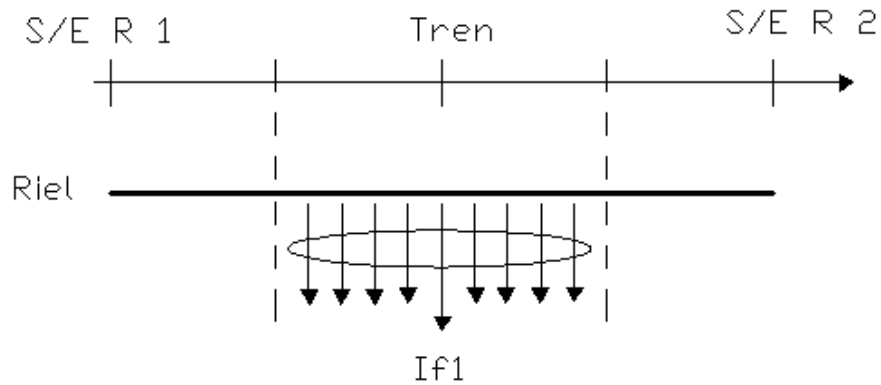


Figura 4.7: Corriente de fuga de riel a tierra I_{f1}

Se tiene entonces que:

$$R_{fi} = \frac{400}{4} \cdot \frac{[L_a]}{2} \quad (4.8)$$

Donde "La" corresponde a la distancia alimentada por la S/E R "i".

4. Resistencias longitudinales del terreno:

$$rti = 20 \cdot Li \quad (4.9)$$

5. Resistencia de trenes: Ver apartado 4.2

4.5.2 Evaluación de potenciales y corrientes de fuga.

El circuito anterior se puede resolver con el método matricial de las "mallas" o "Circuitos regionales", unido con el método de superposición, debido a que se tienen dos fuentes de voltaje en él [13].

Por tanto se suponen las "corrientes de malla" de acuerdo a lo que se presenta en la siguiente Figura:

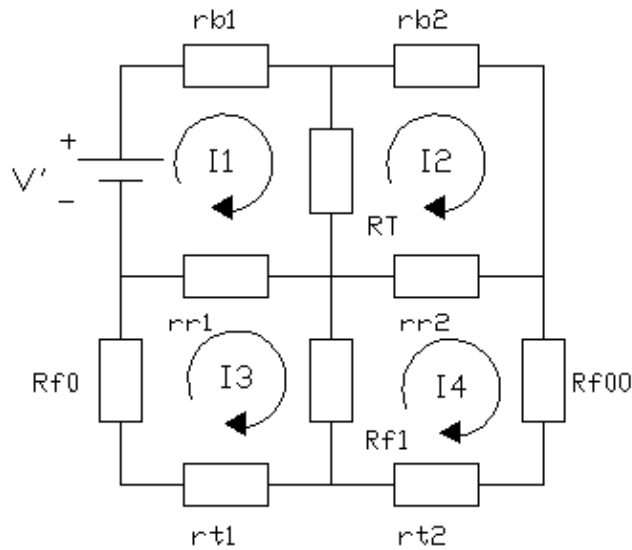


Figura 4.8: Método de Circuitos regionales

Las ecuaciones por tanto quedan expresadas de la forma expuesta en las ecuaciones 4.10 y 4.11, donde la primera considera la fuente V' operando y la fuente V'' cortocircuitada:

$$\begin{aligned}
 750 &= rb1 \cdot I1 + RT \cdot (I1 - I2) + rr1 \cdot (I1 - I3) & (4.10) \\
 0 &= rb2 \cdot I2 + rr2 \cdot (I2 - I4) - RT \cdot (I1 - I2) \\
 0 &= Rf1 \cdot (I3 - I4) + (rt1 + Rf0) \cdot I3 - rr1 \cdot (I1 - I3) \\
 0 &= rr2 \cdot (I2 - I4) + Rf1 \cdot (I3 - I4) - (Rf00 + rt2) \cdot I4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 750 &= (rb1 + RT + rr1) \cdot I1 - RT \cdot I2 - I3 \cdot rr1 & (4.11) \\
 0 &= -RT \cdot I1 + (rb2 + RT + rr2) \cdot I2 - rr2 \cdot I4 \\
 0 &= -rr1 \cdot I1 + (rr1 + Rf1 + rt1 + Rf0) \cdot I3 - Rf1 \cdot I4 \\
 0 &= -rr2 \cdot I2 - Rf1 \cdot I3 + (rr2 + Rf1 + Rf00 + rt2) \cdot I4
 \end{aligned}$$

Matricialmente el sistema se expresa por:

$$[R] \cdot [I] = [V]$$

Donde las matrices respectivas se muestran a continuación:

$$[R] = \begin{bmatrix} rb1 + RT + rr1 & -RT & -rr1 & 0 \\ -RT & rb2 + RT + rr2 & 0 & -rr2 \\ -rr1 & 0 & rr1 + Rf1 + Rf0 + rt1 & -Rf1 \\ 0 & -rr2 & -Rf1 & rr2 + Rf1 + Rf00 + rt2 \end{bmatrix}$$

$$[I] = \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I4 \end{bmatrix} \quad [V] = \begin{bmatrix} 750 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

De forma analoga se obtienen las ecuaciones al considerar operando la fuente V'' y cortocircuitando la fuente V'. En ambos casos el sistema se resuelve usando el método de Cramer y la solución del sistema completo se obtiene superponiendo las soluciones de ambas fuentes. Considerando que el tren viaja partiendo del reposo desde la Subestación V' hasta V''. Se obtienen los siguientes resultados para cada parámetro⁷:

1. Resistencia de barras guía en función del tiempo:

T	Distancia	rb1	rb2
[s]	[m]	[Ω]	[Ω]
0	0	0	0,00611
1	0,24	0	0,00611
2	1,16	0,00001	0,00610
3	3,18	0,00002	0,00609
4	6,5	0,00005	0,00607
5	11,01	0,00008	0,00603
6	16,6	0,00012	0,00600
7	23,27	0,00016	0,00595
8	31,02	0,00022	0,00589
9	39,79	0,00028	0,00583
10	49,46	0,00034	0,00577
11	59,96	0,00042	0,00569
12	71,23	0,00050	0,00562
13	83,2	0,00058	0,00553
14	95,86	0,00067	0,00544
15	109,17	0,00076	0,00535
16	123,1	0,00086	0,00525
17	137,64	0,00096	0,00515
18	152,75	0,00106	0,00505
19	168,4	0,00117	0,00494
20	184,57	0,00128	0,00483

⁷ Se considera sólo la etapa de tracción, ya que es la única etapa donde el sistema consume energía de las fuentes. La distancia considerada en la simulación corresponde a 0,88 [km], que fue la obtenida como distancia promedio para la L5 de Metro.

T [s]	Distancia [m]	rb1 [Ω]	rb2 [Ω]
21	201,23	0,00140	0,00471
22	218,34	0,00152	0,00459
23	235,89	0,00164	0,00447
24	253,84	0,00176	0,00435

Tabla 4.7: Resistencias de barras guía en función del tiempo para modelo básico de corrientes de fuga.

2. Las resistencia de los rieles en función del tiempo:

T [s]	Distancia [m]	rr1 [Ω]	rr2 [Ω]
0	0	0	0,01130
1	0,24	0	0,01129
2	1,16	0,00001	0,01128
3	3,18	0,00004	0,01126
4	6,5	0,00008	0,01121
5	11,01	0,00014	0,01116
6	16,6	0,00021	0,01108
7	23,27	0,00030	0,01100
8	31,02	0,00040	0,01090
9	39,79	0,00051	0,01079
10	49,46	0,00064	0,01066
11	59,96	0,00077	0,01053
12	71,23	0,00092	0,01038
13	83,2	0,00107	0,01023
14	95,86	0,00123	0,01007
15	109,17	0,00140	0,00989
16	123,1	0,00158	0,00972
17	137,64	0,00177	0,00953

T	Distancia	rr1	rr2
[s]	[m]	[Ω]	[Ω]
18	152,75	0,00196	0,00933
19	168,4	0,00216	0,00913
20	184,57	0,00237	0,00893
21	201,23	0,00259	0,00871
22	218,34	0,00281	0,00849
23	235,89	0,00303	0,00827
24	253,84	0,00326	0,00804

Tabla 4.8: Resistencias de rieles en función del tiempo para modelo básico de corrientes de fuga.

3. La resistencia equivalente del tren en función del tiempo se muestra en el apartado 4.2
4. Las resistencias riel - tierra en función del tiempo:

T	Distancia	Rf1	Rfo	Rfoo
[s]	[m]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
0	0	43.960,15	-	43.960,15
1	0,24	43.972,15	12,00	43.948,15
2	1,16	44.018,15	58,00	43.902,15
3	3,18	44.119,15	159,00	43.801,15
4	6,5	44.285,15	325,00	43.635,15
5	11,01	44.510,65	550,50	43.409,65
6	16,6	44.790,15	830,00	43.130,15
7	23,27	45.123,65	1.163,50	42.796,65
8	31,02	45.511,15	1.551,00	42.409,15
9	39,79	45.949,65	1.989,50	41.970,65
10	49,46	46.433,15	2.473,00	41.487,15
11	59,96	46.958,15	2.998,00	40.962,15
12	71,23	47.521,65	3.561,50	40.398,65
13	83,2	48.120,15	4.160,00	39.800,15

T [s]	Distancia [m]	Rf1 [Ω]	Rfo [Ω]	Rfoo [Ω]
14	95,86	48.753,15	4.793,00	39.167,15
15	109,17	49.418,65	5.458,50	38.501,65
16	123,1	50.115,15	6.155,00	37.805,15
17	137,64	50.842,15	6.882,00	37.078,15
18	152,75	51.597,65	7.637,50	36.322,65
19	168,4	52.380,15	8.420,00	35.540,15
20	184,57	53.188,65	9.228,50	34.731,65
21	201,23	54.021,65	10.061,50	33.898,65
22	218,34	54.877,15	10.917,00	33.043,15
23	235,89	55.754,65	11.794,50	32.165,65
24	253,84	56.652,15	12.692,00	31.268,15

Tabla 4.9: Resistencias riel - tierra en función del tiempo para modelo básico de corrientes de fuga.

5. Las resistencias longitudinales del terreno en función del tiempo:

T [s]	Distancia [m]	Rt1 [Ω]	Rt2 [Ω]
0	0	-	17.584,06
1	0,24	4,80	17.579,26
2	1,16	23,20	17.560,86
3	3,18	63,60	17.520,46
4	6,5	130,00	17.454,06
5	11,01	220,20	17.363,86
6	16,6	332,00	17.252,06
7	23,27	465,40	17.118,66
8	31,02	620,40	16.963,66
9	39,79	795,80	16.788,26
10	49,46	989,20	16.594,86

T [s]	Distancia [m]	Rt1 [Ω]	Rt2 [Ω]
11	59,96	1.199,20	16.384,86
12	71,23	1.424,60	16.159,46
13	83,2	1.664,00	15.920,06
14	95,86	1.917,20	15.666,86
15	109,17	2.183,40	15.400,66
16	123,1	2.462,00	15.122,06
17	137,64	2.752,80	14.831,26
18	152,75	3.055,00	14.529,06
19	168,4	3.368,00	14.216,06
20	184,57	3.691,40	13.892,66
21	201,23	4.024,60	13.559,46
22	218,34	4.366,80	13.217,26
23	235,89	4.717,80	12.866,26
24	253,84	5.076,80	12.507,26

Tabla 4.10: Resistencias longitudinales del terreno en función del tiempo según modelo.

6. Finalmente, del modelo descrito, la corriente de fuga (I_f) se obtiene como $I_2 - I_1$, y el voltaje riel-tierra se obtiene como el producto entre I_f y R_{f1} (Ley de Ohm). Los valores obtenidos de la simulación para la corriente de fuga y el voltaje de los rieles en función del tiempo se puede apreciar en la Tabla 4.11:

T [s]	Distancia [m]	I fuga [mA]	ΔV riel [V]
0	0	0,04922	2,16356
1	0,24	0,08519	3,74595
2	1,16	0,12150	5,34833
3	3,18	0,15854	6,99460
4	6,5	0,16019	7,09415
5	11,01	0,28667	12,75989
6	16,6	0,29138	13,05095

T [s]	Distancia [m]	I fuga [mA]	ΔV riel [V]
7	23,27	0,29675	13,39034
8	31,02	0,30266	13,77446
9	39,79	0,30896	14,19664
10	49,46	0,29182	13,55009
11	59,96	0,35044	16,45605
12	71,23	0,32854	15,61284
13	83,2	0,38141	18,35357
14	95,86	0,38851	18,94096
15	109,17	0,37780	18,67038
16	123,1	0,38397	19,24284
17	137,64	0,37323	18,97574
18	152,75	0,36298	18,72913
19	168,4	0,36758	19,25403
20	184,57	0,35720	18,99913
21	201,23	0,36086	19,49418
22	218,34	0,35036	19,22670
23	235,89	0,34025	18,97052
24	253,84	0,34254	19,40548

Tabla 4.11: Corrientes de fuga y Voltajes de riel en función del tiempo para modelo básico.

A continuación se considera uno de los casos límites en la operación del sistema, cuando el voltaje de las Subestaciones esta en el limite inferior permisible por los motores de los trenes, 500 [Vcc], (por diseño, los motores usados pueden operar con valores de voltaje de entrada entre 500 y 900 [V])

Los valores de la corriente de fuga y el voltaje del riel se puede apreciar en la Tabla 4.12:

T [s]	Distancia [m]	I fuga [mA]	ΔV riel [V]
0	0	0,07333	3,22379
1	0,24	0,12789	5,62347

T [s]	Distancia [m]	I fuga [mA]	ΔV riel [V]
2	1,16	0,18247	8,03204
3	3,18	0,23288	10,27458
4	6,5	0,23535	10,42251
5	11,01	0,42302	18,82903
6	16,6	0,43016	19,26707
7	23,27	0,43830	19,77781
8	31,02	0,44727	20,35577
9	39,79	0,45682	20,99091
10	49,46	0,44030	20,44433
11	59,96	0,50707	23,81121
12	71,23	0,48653	23,12078
13	83,2	0,56414	27,14639
14	95,86	0,57492	28,02935
15	109,17	0,58528	28,92367
16	123,1	0,55685	27,90661
17	137,64	0,56550	28,75134
18	152,75	0,53885	27,80342
19	168,4	0,54585	28,59153
20	184,57	0,55226	29,37390
21	201,23	0,52612	28,42210
22	218,34	0,53100	29,13971
23	235,89	0,50628	28,22720
24	253,84	0,50977	28,87945

Tabla 4.12: Corrientes de fuga y Voltajes de riel en función del tiempo para modelo básico, considerando $V=500$ [V].

Los gráficos presentados a continuación, muestran las variables eléctricas del sistema en el transcurso del tiempo, a medida que el tren se dirige de la estación inicial a la final.

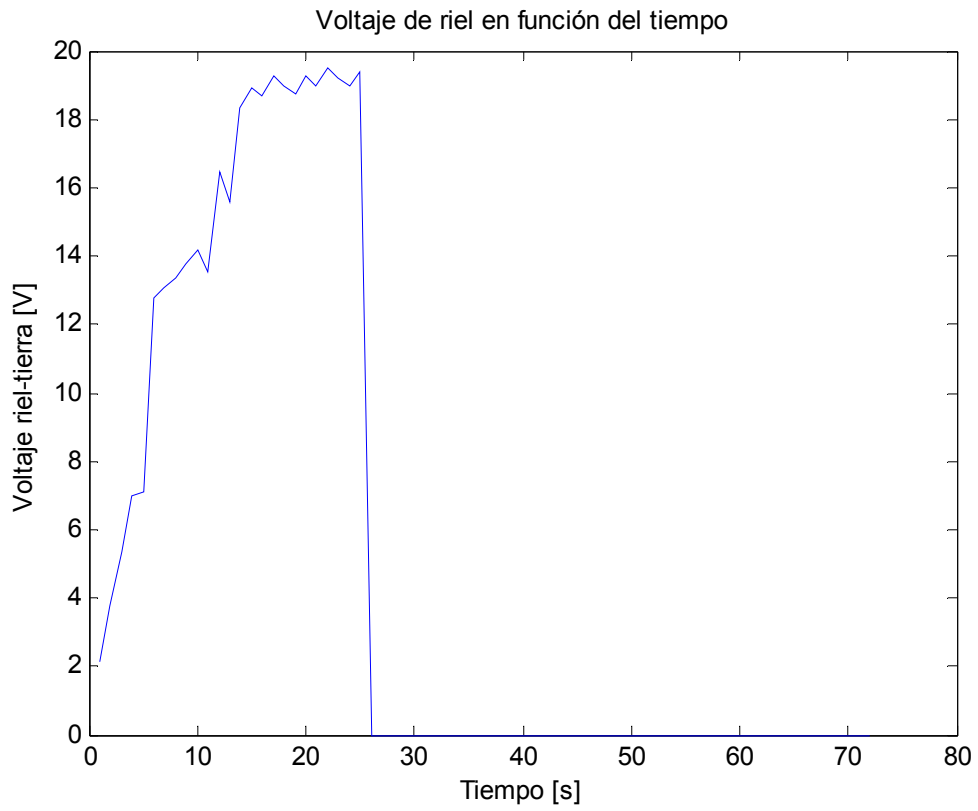


Figura 4.9: Voltajes de rieles para un voltaje de alimentación de 750 [V]

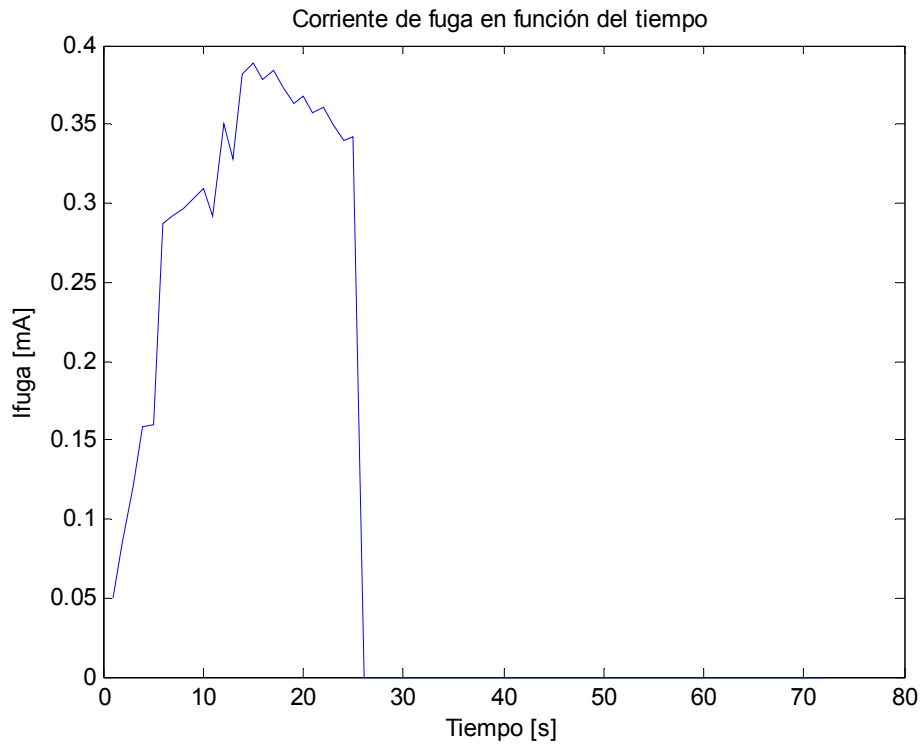


Figura 4.10: Corrientes de fuga para un voltaje de alimentación de 750 [V]

4.6 Modelos Circuitales extendidos para Pérdidas.

A pesar de que el modelo anterior es una gran aproximación en la determinación de corrientes de fuga y voltajes de riel, se continuó perfeccionando el modelo para poder obtener resultados más específicos y cercanos a la operación normal de las instalaciones del Metro.

A continuación se presentan 2 modelos basados en el desarrollado en el punto anterior, el primero de los cuales corresponde al modelo trabajado por IDIEM en su "Estudio de Diagnostico estructural de tuneles en Línea 1 y 2 del Metro de Santiago", de Enero del 2003 y el segundo modelo corresponde a la situación más cercana a la realidad, que considera una determinación cada dos segundos de la variación de las variables y parámetros de interés.

Cabe mencionar que no se presentarán resultados de ambos modelos por ser innecesario. Sin embargo, pueden obtenerse a partir del material complementario de este trabajo.

4.6.1 Modelo de los 15 Nodos.

Este modelo consiste básicamente en dividir el tramo de línea entre dos Subestaciones adyacentes, en 4 intervalos semejantes.

Los valores de los parámetros del modelo quedan determinados por las ecuaciones mostradas anteriormente (ecuaciones 6, 7, 8 y 9).

La siguiente Figura muestra gráficamente el modelo.

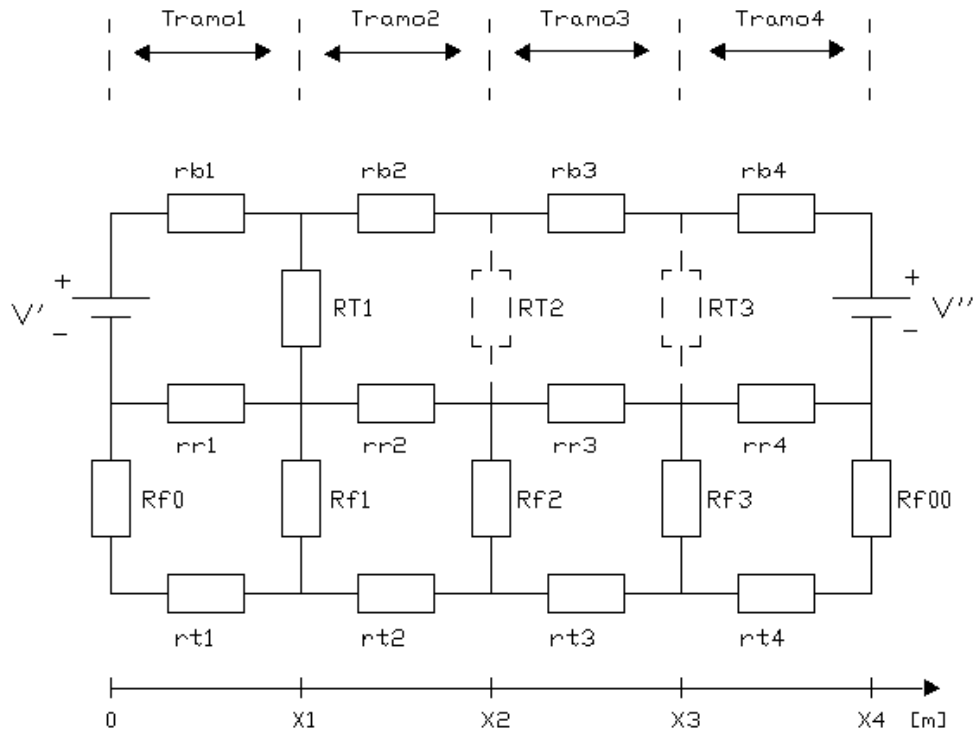


Figura 4.11: Modelo Circuital de 15 nodos entre 2 S/E consecutivas

De la misma forma, el circuito se resuelve usando el método de circuitos regionales y método de superposición, de acuerdo a los que se aprecia en las siguientes figuras:

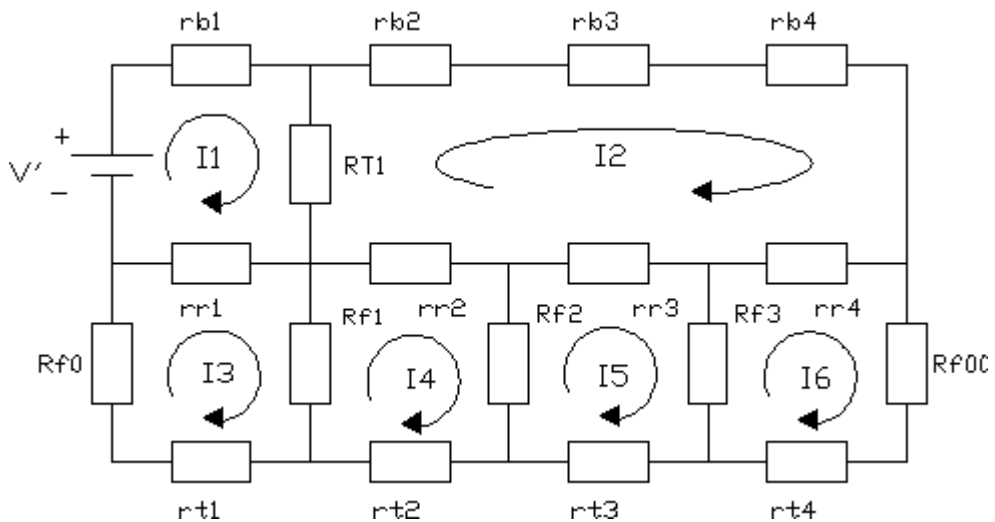


Figura 4.12: Resolución Método de los 15 nodos por superposición para la primera fuente.

Considerando ahora la segunda fuentes se tiene:

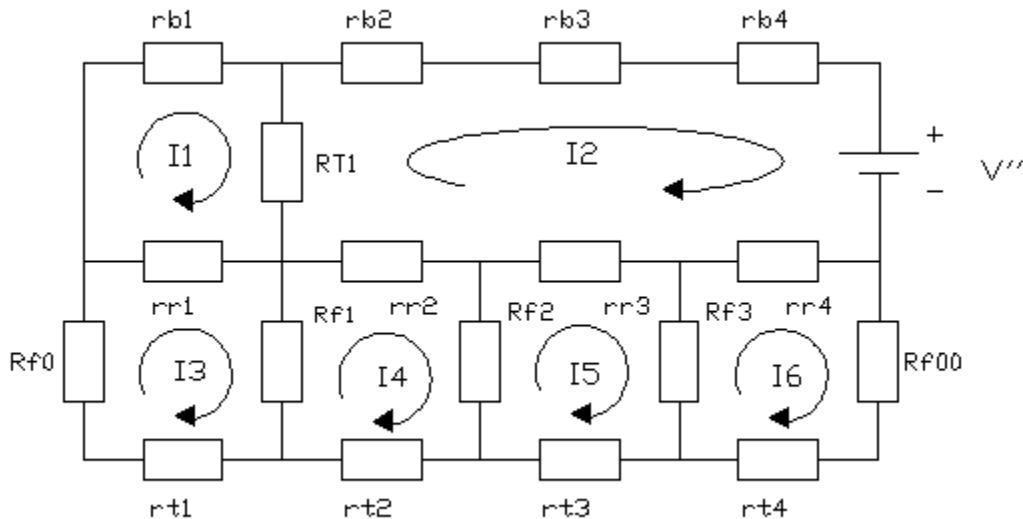


Figura 4.13: Segunda fuente del método de superposición.

Para la resolución de este sistema se ha programado una función que permita obtener el determinante de una matriz cuadrada de dimensión n , sin embargo, por el tiempo de ejecución, no es aplicable para modelos más detallados como el que se presenta a continuación.

4.6.2 Modelo Extendido de $n+2$ corrientes.⁸

Este modelo tiene la finalidad de obtener como sistema discreto, los valores de la corriente de fuga y de los voltajes del riel.

Como hemos visto en los modelos anteriores, la determinación de los parámetros

⁸ A partir de esta simulación, se utilizó el Software matemático Matlab, ya que minimizaba enormemente los tiempos de ejecución.

depende directamente del valor asignado a la distancia, por tanto, como a partir de la simulación de marcha del tren se conoce su posición en todos los segundos de operación, es posible definir los intervalos de distancia, como la distancia recorrida por el tren durante dos segundos consecutivos.

Luego, el cálculo de los parámetros se realiza de la misma forma que en el modelo básico, la diferencia ahora, es que obtendremos aproximadamente n valores para cada parámetro, por cada segundo de operación. La diferencia final, se refleja en que se podrá determinar la corriente de fuga y el voltaje del riel cada dos segundos de operación.⁹

El modelo se muestra gráficamente en la siguiente Figura:

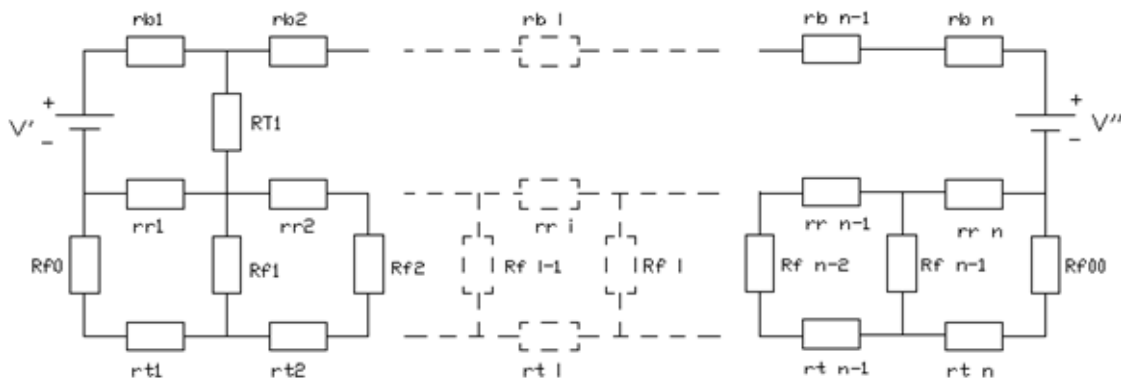


Figura 4.14: Modelo para n intervalos

Como se puede apreciar, si se tiene “ n ” segundos de operación de un tren entre 2 subestaciones, el segundo 0 corresponde al instante en el que la máquina se encuentra en V' , y el segundo n corresponde al instante en el tren se encuentra en V'' .

Por tanto, en este modelo se tiene:

1. Las corrientes ficticias son $n+2$, por tanto se debe analizar una matriz cuadrada de dimensión $n+2$.
2. Se deben determinar $n-1$ segundos de operación, ya que en el segundo 0 y en el n se considera que la corriente de fuga es nula, ya que se conecta “directamente” el polo positivo con el negativo de las subestaciones.
3. Para cada tipo de parámetro se tienen a lo menos n valores, por segundo de análisis.

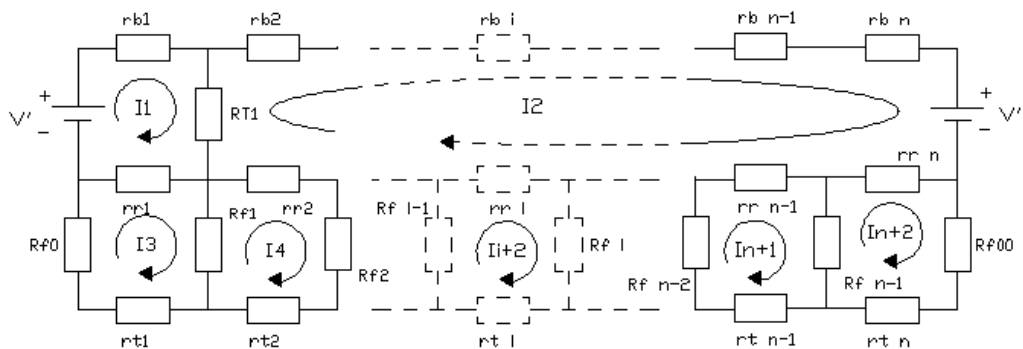


Figura 4.15: Corrientes para modelo de n intervalos

⁹ Se realizó la simulación cada dos segundos, debido a que una simulación segundo a segundo provocaba “overflow” en las variables del programa.

La resolución del sistema se realiza de la misma forma que los modelos anteriores, al realizar LVK en cada bucle del circuito, las ecuaciones se expresan en forma matricial y se obtiene para cada elemento de la matriz:

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= rb1 + RT + rr1 \\
 r_{22} &= \sum_{i=k}^n (rbi + rri) + RT \\
 r_{ii} &= rr_{i-2} + Rf_{i-2} + rt_{i-2} + Rf_{i-3} & i \in [3, n] \\
 r_{12} &= -RT \\
 r_{21} &= -RT \\
 r_{1i} &= -rr_{i-2} & i \in [3, k] \\
 r_{i1} &= -rr_{i-2} & i \in [3, k] \\
 r_{2i} &= -rr_i & i \in [k+1, n] \\
 r_{i2} &= -rr_i & i \in [k+1, n] \\
 r_{i(i+1)} &= -Rf_{i-2} & i \in [3, n-1] \\
 r_{(i+1)i} &= -Rf_{i-2} & i \in [3, n-1]
 \end{aligned}$$

Donde la matriz que resuelve el sistema mediante el método de las corrientes de malla se muestra a continuación:

$$\begin{pmatrix}
 rb1 + RT + rr1 & -RT & -rr_1 & 0 & \dots & 0 \\
 -RT & \sum_{i=2}^n (rbi + rri) + RT & 0 & - & \dots & -rr_n \\
 -rr_1 & 0 & rr1 + Rf1 + Rt1 + Rf0 & Rf1 & \dots & 0 \\
 0 & -rr_2 & -Rf1 & \dots & \dots & \\
 \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & -Rf_{n-1}
 \end{pmatrix}$$

Finalmente, a partir de este modelo, unido al modelo de la línea, es posible obtener los valores de la corriente de fuga, voltaje riel y material perdido, producto de la corrosión galvánica.

4.7 Pérdidas de Material

Por tanto, si se consideran ahora las pérdidas de material en los rieles de usando el valor de la constante electroquímica del hierro determinado en el apartado 3, se tiene que a lo largo de las vías y durante cada segundo de operación, producto de las corrientes de fuga, se están perdiendo las siguientes cantidades de acero estructural y de los rieles:

T [s]	Pérdidas [gr]
0	0
2	0.00000022149
4	0.00000110380
6	0.00000215410
8	0.00000223000
10	0.00000218240
12	0.00000217790
14	0.00000216580
16	0.00000211440
18	0.00000208310
20	0.00000204830
22	0.00000199620
24	0.00000194640
26	0
28	0
30	0
32	0
34	0
36	0
38	0
40	0
42	0

T [s]	Pérdidas [gr]
44	0
46	0
48	0
50	0
52	0
54	0
56	0
58	0
60	0
62	0
64	0
66	0
68	0
70	0
72	0.00000767890
74	0.00000110740
76	0.00000063498
78	0.00000063665
80	0.00000071516
82	0.00000081045
84	0.00000091801
86	0.00000103800

T [s]	Pérdidas [gr]
88	0.00000116820
90	0.00000129700
92	0.00000138670
94	0.00000129920
96	0
98	0
100	0
102	0
104	0
106	0
108	0
110	0
112	0
114	0
116	0
118	0
120	0
122	0
124	0
125	0

Tabla 4.13: Gramos perdidos de material por corrientes parásitas.

Por tanto se tiene que durante la operación de un tren se pierden alrededor de $4,1 \times 10^{-5}$ [gr] de material del acero estructural, así como de los rieles. Si se considera ahora, que el sistema funciona cerca de 17 horas diarias, lo que equivale a 61.200 [s] de operación, y se tienen trenes en los dos sentidos de las vías, con un tiempo de explotación promedio de 160 [s], se obtiene que durante un día de operación normal, las pérdidas pueden llegar a ser cercanas a $3,15 \times 10^{-5}$ [kg], en el intervalo correspondiente entre dos S/E R.

Y considerando la operación correspondiente a un año normal, las pérdidas toman un valor cercano a 0,1 [kg] entre dos estaciones consecutivas.

CAPITULO 5

EFECTOS DE LAS PERDIDAS

5.1 Resultado del Modelo extendido de n+2 corrientes

A partir del desarrollo explicado en el apartado anterior, y considerando un tramo de línea ubicado entre dos subestaciones rectificadoras consecutivas, donde la primera estación de pasajeros se ubica en el mismo punto que la S/E R, se muestran en la Tabla 5.1 los resultados para los parámetros del sistema en función de la distancia¹⁰.

T	D	Rf	Rr	rt	rb	R _{tren}
[s]	[m]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
0	0	117	0.015034	11.7	0.0081315	1.39
2	1.17	651	0.068619	53.4	0.037113	0.56
4	6.51	1544	0.12979	101	0.070195	0.43
6	16.61	2452	0.1853	144.2	0.10022	0.25
8	31.03	3286	0.23695	184.4	0.12816	0.25
10	49.47	4021	0.27974	217.7	0.1513	0.26
12	71.24	4640	0.3165	246.3	0.17118	0.24
14	95.87	5188	0.35016	272.5	0.18939	0.21
16	123.12	5690	0.381	296.5	0.20607	0.22
18	152.77	6148	0.40902	318.3	0.22122	0.23
20	184.6	6560	0.43394	337.7	0.2347	0.25
22	218.37	6927	0.45618	355	0.24672	0.26
24	253.87	7152	0.46286	360.2	0.25034	0.27

¹⁰ La distancia corresponde al punto de la línea donde se encuentra el tren en el tiempo t, los parámetros, de acuerdo a lo explicado en el apartado anterior, se determinan en base a la distancia recorrida entre los tiempos i e i+1, donde i es el tiempo en el que se medirá el voltaje riel y la corriente de fuga.

T	D	R_f	R_r	r_t	r_b	R_{tren}
[s]	[m]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
26	289.89	7145	0.45528	354.3	0.24624	Inf
28	325.32	7026	0.44757	348.3	0.24207	Inf
30	360.15	6906	0.43986	342.3	0.2379	Inf
32	394.38	6786	0.43215	336.3	0.23373	Inf
34	428.01	6666	0.42444	330.3	0.22956	Inf
36	461.04	6546	0.41673	324.3	0.22539	Inf
38	493.47	6425	0.40889	318.2	0.22115	Inf
40	525.29	6304	0.40118	312.2	0.21698	Inf
42	556.51	6184	0.39347	306.2	0.21281	Inf
44	587.13	6064	0.38576	300.2	0.20864	Inf
46	617.15	5943	0.37792	294.1	0.2044	Inf
48	646.56	5822	0.37021	288.1	0.20023	Inf
50	675.37	5703	0.36263	282.2	0.19613	Inf
52	703.59	5586	0.35517	276.4	0.1921	Inf
54	731.23	5472	0.34798	270.8	0.18821	Inf
56	758.31	5360	0.34078	265.2	0.18431	Inf
58	784.83	5248	0.33359	259.6	0.18042	Inf
60	810.79	4924	0.29915	232.8	0.1618	Inf
62	834.07	4176	0.23747	184.8	0.12844	Inf
64	852.55	3216	0.17579	136.8	0.095076	Inf

T	D	R_f	R_r	r_t	r_b	R_{tren}
[s]	[m]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
66	866.23	2256	0.11411	88.8	0.061716	Inf
68	875.11	1296	0.052428	40.8	0.028356	Inf
70	879.19	456	0.006168	4.8	0.003336	Inf
72	879.67	343	0.037908	29.5	0.020503	0.8
74	882.62	1078	0.10062	78.3	0.054418	0.43
76	890.45	2009	0.15754	122.6	0.085207	0.25
78	902.71	2878	0.21228	165.2	0.11481	0.25
80	919.23	3669	0.25918	201.7	0.14018	0.24
82	939.4	4341	0.29863	232.4	0.16152	0.22
84	962.64	4921	0.33371	259.7	0.18049	0.21
86	988.61	5445	0.36597	284.8	0.19794	0.22
88	1017.1	5925	0.39539	307.7	0.21385	0.23
90	1047.9	6360	0.42187	328.3	0.22817	0.24
92	1080.7	6749	0.44538	346.6	0.24089	0.25
94	1115.3	7069	0.46299	360.3	0.25041	0.27
96	1151.4	7176	0.45913	357.3	0.24832	Inf
98	1187.1	7086	0.45142	351.3	0.24415	Inf
100	1222.2	6966	0.44371	345.3	0.23998	Inf
102	1256.8	6846	0.436	339.3	0.23581	Inf
104	1290.7	6726	0.42829	333.3	0.23164	Inf

T	D	R_f	R_r	r_t	r_b	R_{tren}
[s]	[m]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
106	1324	6606	0.42058	327.3	0.22747	Inf
108	1356.8	6486	0.41287	321.3	0.2233	Inf
110	1388.9	6364	0.4049	315.1	0.21899	Inf
112	1420.4	6244	0.39745	309.3	0.21496	Inf
114	1451.3	6124	0.38948	303.1	0.21065	Inf
116	1481.6	6003	0.3819	297.2	0.20655	Inf
118	1511.4	5883	0.37406	291.1	0.20231	Inf
120	1540.5	5763	0.36648	285.2	0.19821	Inf
122	1569	5644	0.35877	279.2	0.19404	Inf
124	1596.9	4167	0.17669	137.5	0.095562	Inf
125	1610.7	1375				Inf

Tabla 5.1: Valores de parámetros de línea para simulación

Ahora bien, para cada instante en el que se quiera resolver el sistema, el valor de los parámetros de línea permanece constante, a excepción del valor correspondiente a la resistencia equivalente del (los) tren(es) donde es un valor único por segundo, luego, por ejemplo para el segundo 2 de operación el circuito queda:

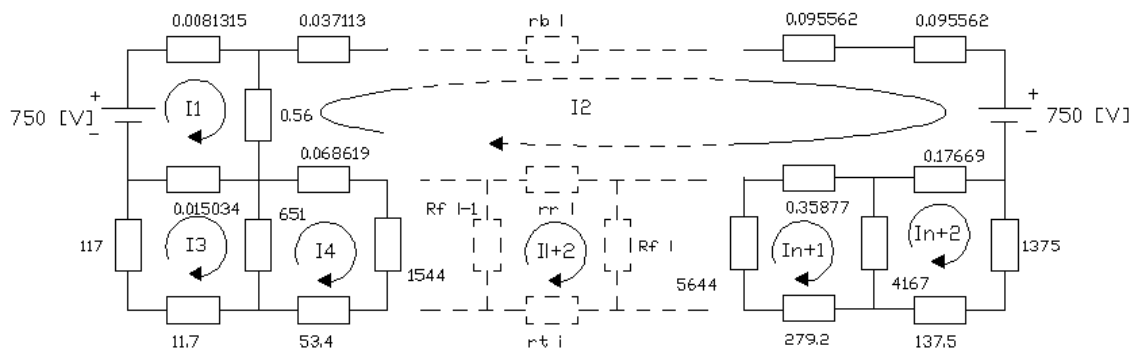


Figura 5.1: Circuito de simulación en $t = 6$ [s]

Al resolver el circuito anterior se obtiene que:

$$I_{\text{fuga}} = 0.0011536 \text{ [A]} \text{ y } V_{\text{riel-tierra}} = 0.75098 \text{ [V]}$$

Los valores obtenidos para cada circuito se presentan en la Tabla 5.2. Cabe recordar que la simulación considera un voltaje de operación de 750 [V], y la presencia de un único tren en el tramo considerado.

T [s]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	t [s]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]
0	0	0	64	0	0
2	0.0011536	0.75098	66	0	0
4	0.0057489	8.8763	68	0	0
6	0.011219	27.509	70	0	0
8	0.011615	38.166	72	0.039994	13.718
10	0.011367	45.705	74	0.0057676	6.2175
12	0.011343	52.631	76	0.0033072	6.6441
14	0.01128	58.521	78	0.0033159	9.5431
16	0.011013	62.662	80	0.0037248	13.666
18	0.01085	66.704	82	0.0042211	18.324
20	0.010668	69.982	84	0.0047813	23.529
22	0.010397	72.018	86	0.0054064	29.438
24	0.010138	72.503	88	0.0060841	36.048
26	0	0	90	0.0067552	42.963
28	0	0	92	0.0072223	48.744
30	0	0	94	0.0067669	47.835
32	0	0	96	0	0

T	I_{fuga}	V_{riel-tierra}	t	I_{fuga}	V_{riel-tierra}
[s]	[A]	[V]	[s]	[A]	[V]
34	0	0	98	0	0
36	0	0	100	0	0
38	0	0	102	0	0
40	0	0	104	0	0
42	0	0	106	0	0
44	0	0	108	0	0
46	0	0	110	0	0
48	0	0	112	0	0
50	0	0	114	0	0
52	0	0	116	0	0
54	0	0	118	0	0
56	0	0	120	0	0
58	0	0	122	0	0
60	0	0	124	0	0
62	0	0	125	0	0

Tabla 5.2: Corrientes de fuga y voltajes riel - tierra por cada segundo de simulación

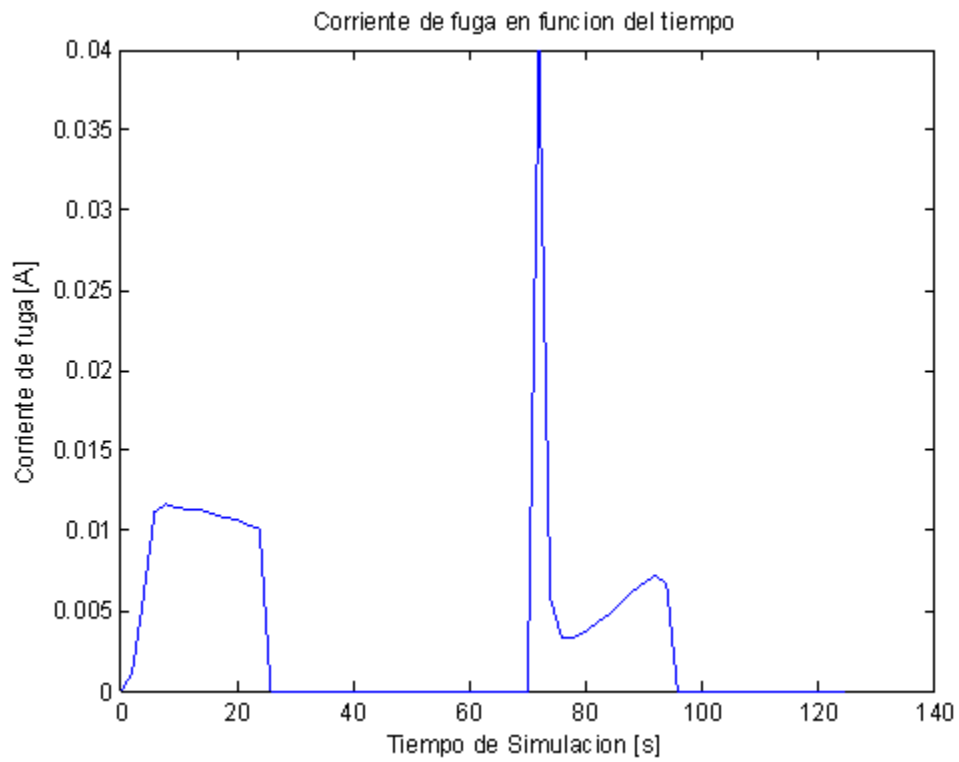


Figura 5.2: Corriente de fuga por cada segundo de operación.

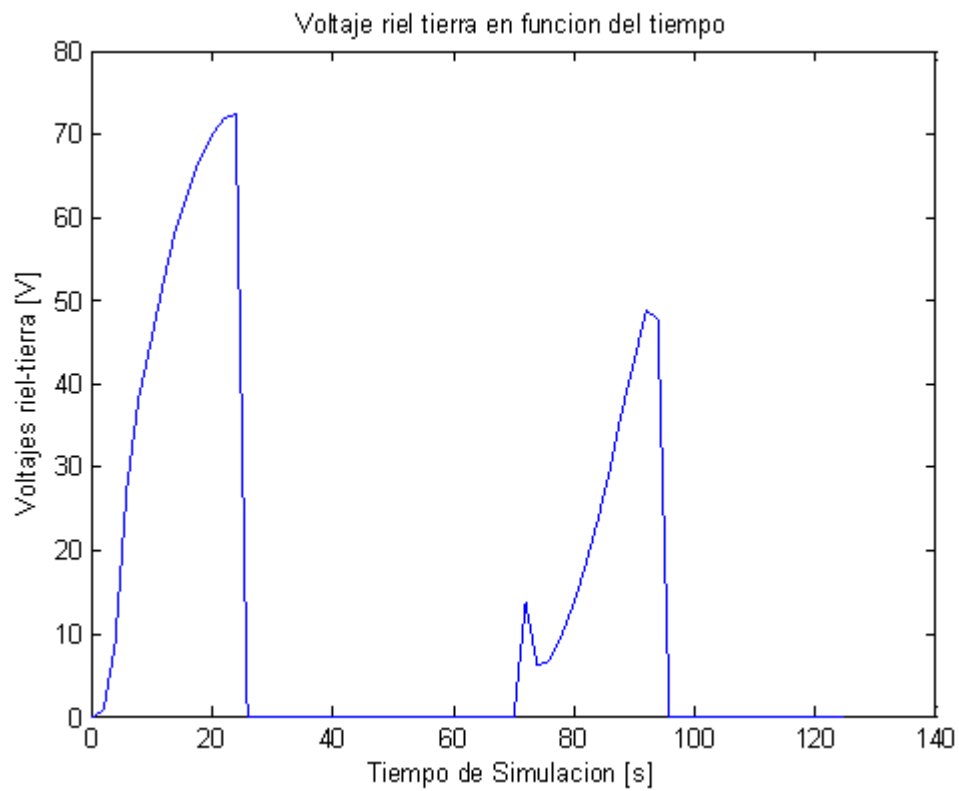


Figura 5.3: Voltaje riel-tierra por cada segundo de operación.

De acuerdo al apartado 3.6, para un instante cualquiera, el valor medido en cualquier parte de la línea para el segundo t sigue la siguiente distribución:

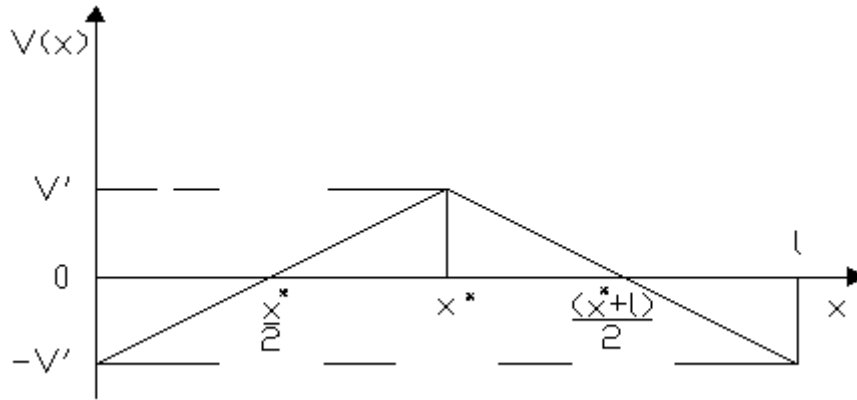


Figura 5.4: Distribución del Voltaje de riel entre S/E R

Luego, si se considera el voltaje en el segundo 24, se tiene que:

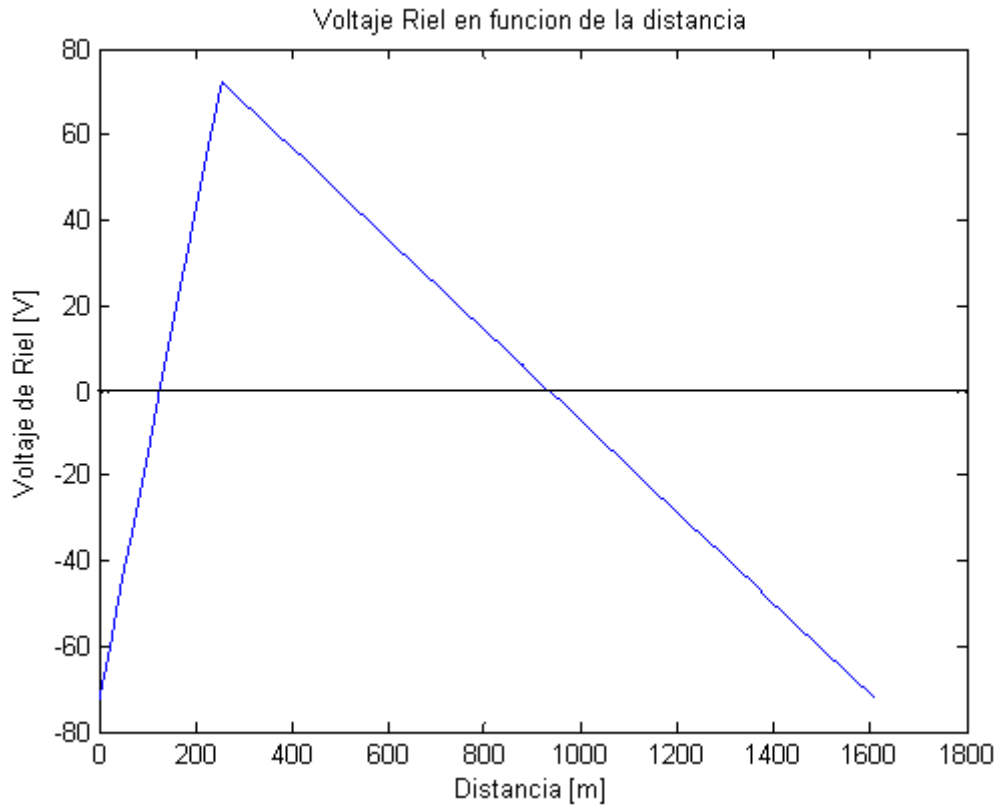


Figura 5.5: Distribución de voltaje a lo largo del riel para t operación 24 [s]

Ahora bien, si se desea ver el voltaje en un punto específico de la línea, para todos los segundos de operación del tren se tiene:

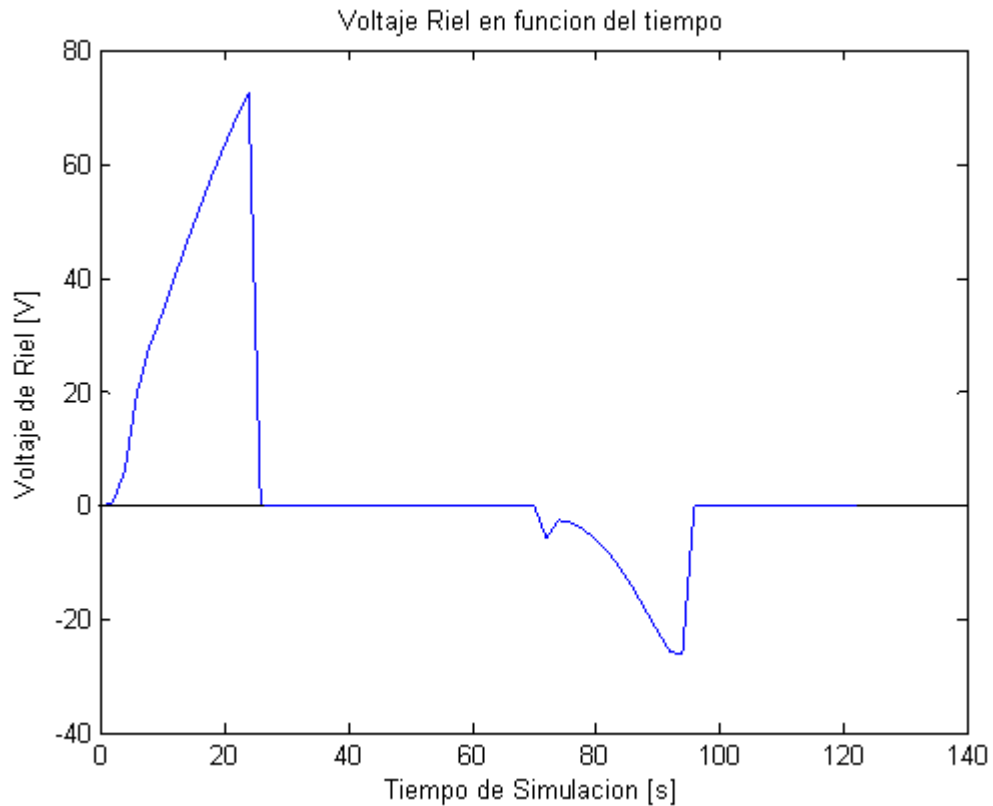


Figura 5.6: Voltaje del riel a 253 [m] de S/E R1, en función del tiempo.

Los valores obtenidos en la simulación se asemejan bastante a los obtenidos en mediciones reales de la operación del sistema [12].

En la Tabla 5.3, se muestra los efectos producidos en ambas variables, en función del tiempo de operación de la línea, donde se puede encontrar desde 1, hasta 4 trenes operando en el tramo (dependiendo del intervalo de explotación)¹¹.

Para un caso con Voltaje nominal en las S/E R se tiene:

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
0	0	0	0	0	0	0
2	0.0011536	0.0022191	0.0041233	0.75098	1.4446	2.6843
4	0.0057489	0.0093485	0.013609	8.8763	14.434	21.012

¹¹ Para considerar más trenes en el intervalo, se consideró que se tienen 4 trenes operando en paralelo (por tanto la resistencia R_{tren}^* equivalente usada para estos casos, corresponde a $R_{tren}/4$, donde R_{tren} es la resistencia calculada para un tren). Esta simplificación se realizó debido a la gran cantidad de opciones mediante las cuales se puede simular la operación en estas condiciones.

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes _{riel-tierra} [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
6	0.011219	0.014332	0.016641	27.509	35.143	40.804
8	0.011615	0.01361	0.014889	38.166	44.723	48.926
10	0.011367	0.012735	0.013552	45.705	51.209	54.491
12	0.011343	0.01227	0.012793	52.631	56.934	59.36
14	0.01128	0.011907	0.012247	58.521	61.772	63.537
16	0.011013	0.011526	0.0118	62.662	65.581	67.145
18	0.01085	0.011287	0.011519	66.704	69.393	70.82
20	0.010668	0.011065	0.011274	69.982	72.585	73.96
22	0.010397	0.010746	0.01093	72.018	74.439	75.712
24	0.010138	0.010451	0.010615	72.503	74.744	75.917
26	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes _{riel-tierra} [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
48	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
72	0.039994	0.04192	0.042955	13.718	14.379	14.734
74	0.0057676	0.0059205	0.006	6.2175	6.3823	6.4679
76	0.0033072	0.0033588	0.0033852	6.6441	6.7478	6.8009
78	0.0033159	0.0033678	0.0033944	9.5431	9.6926	9.7691
80	0.0037248	0.0037812	0.00381	13.666	13.873	13.979
82	0.0042211	0.0042802	0.0043103	18.324	18.58	18.711
84	0.0047813	0.0048459	0.0048788	23.529	23.846	24.009
86	0.0054064	0.0054839	0.0055235	29.438	29.86	30.076
88	0.0060841	0.0061769	0.0062244	36.048	36.598	36.88

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes _{riel-tierra} [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
90	0.0067552	0.0068652	0.0069216	42.963	43.663	44.021
92	0.0072223	0.0073483	0.0074129	48.744	49.594	50.03
94	0.0067669	0.0068987	0.0069666	47.835	48.767	49.247
96	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0	0
106	0	0	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0
116	0	0	0	0	0	0
118	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
122	0	0	0	0	0	0
124	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.3: Valores de variables en función del tiempo de explotación del sistema.

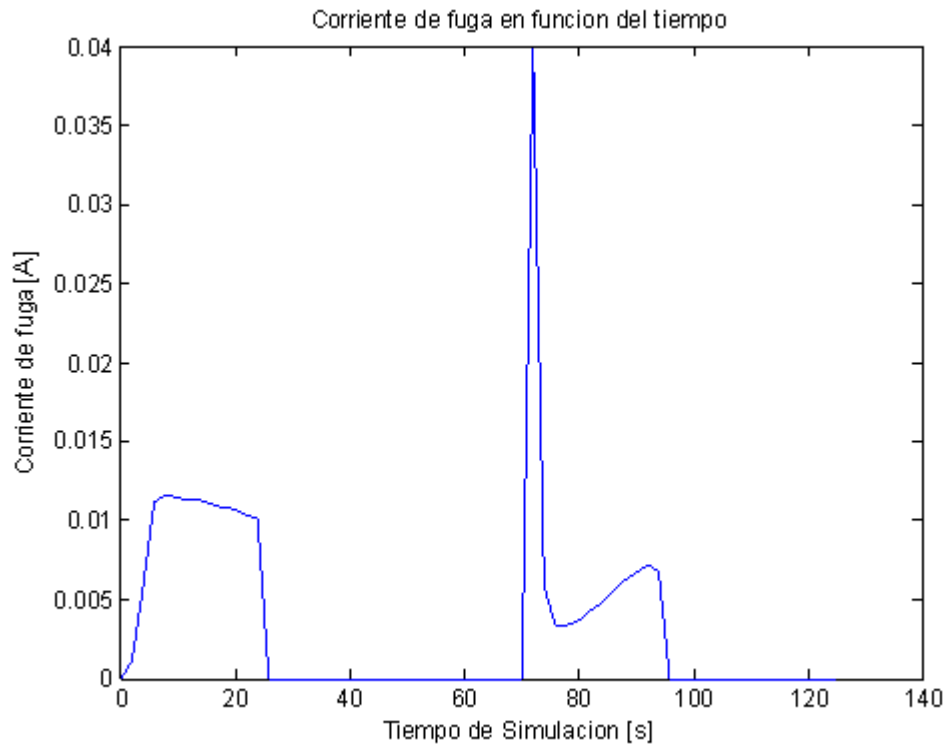


Figura 5.7: Corriente de fuga a 750 [V] y un tren en el intervalo.

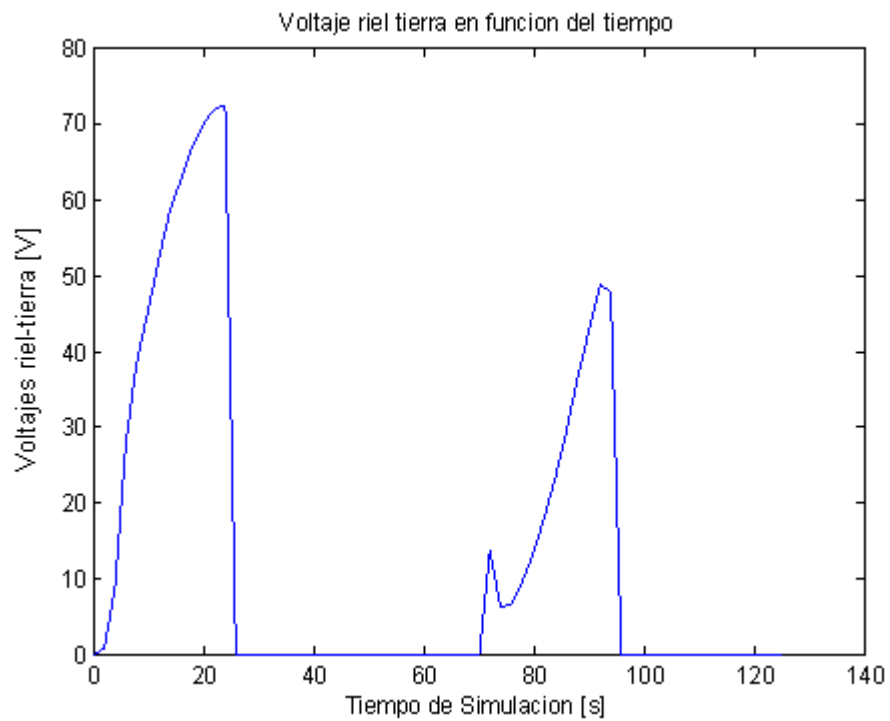


Figura 5.8: Voltaje riel-tierra a 750 [V] y un tren en el intervalo

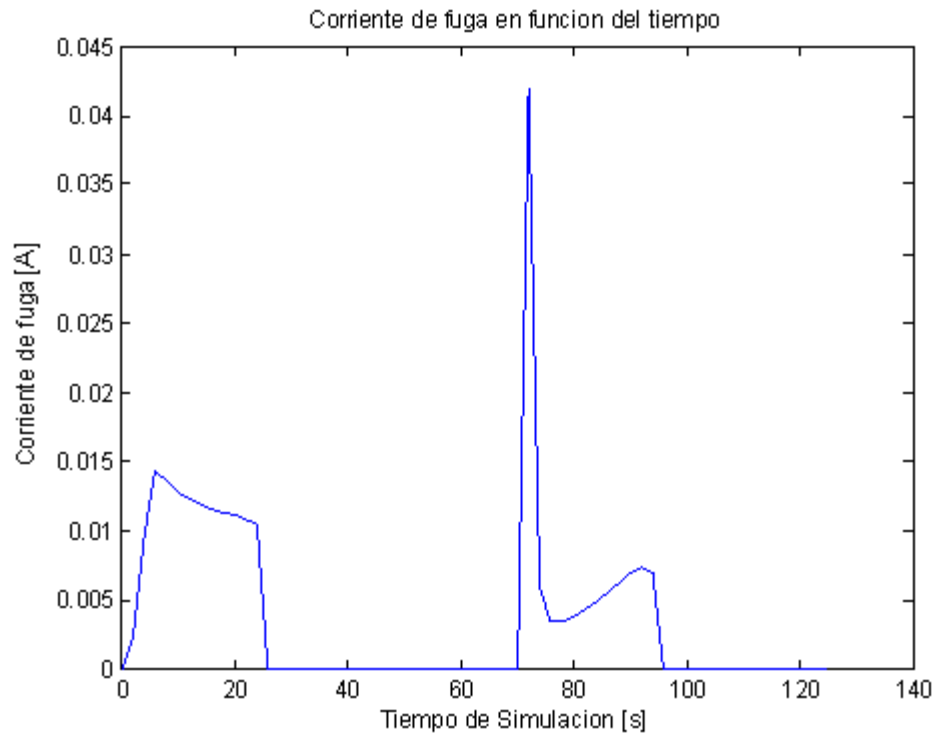


Figura 5.9: Corriente de fuga a 750 [V] y dos trenes en el intervalo

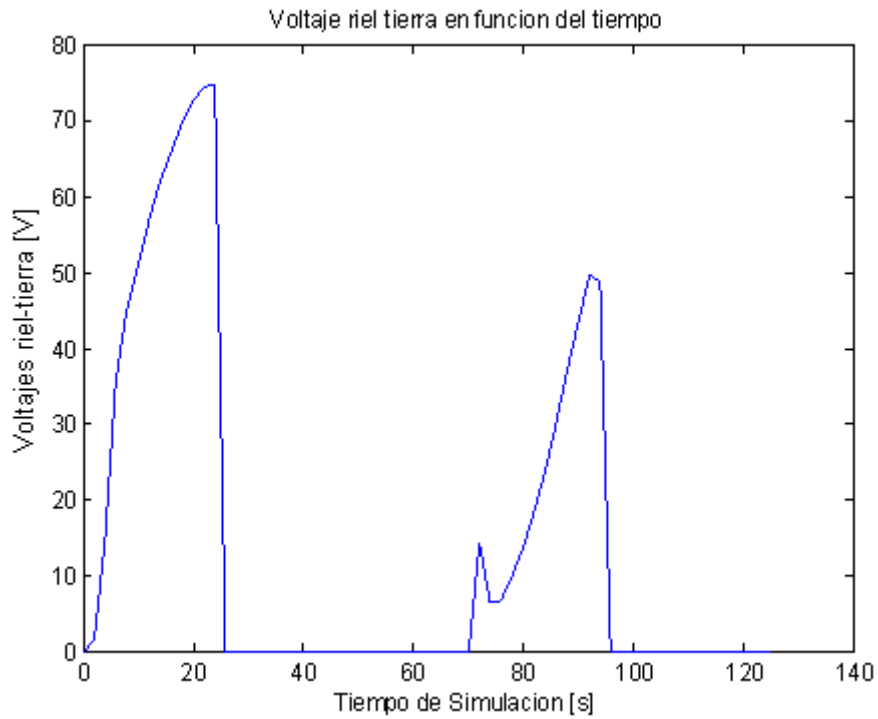


Figura 5.10: Voltaje riel-tierra a 750 [V] y dos trenes en el intervalo

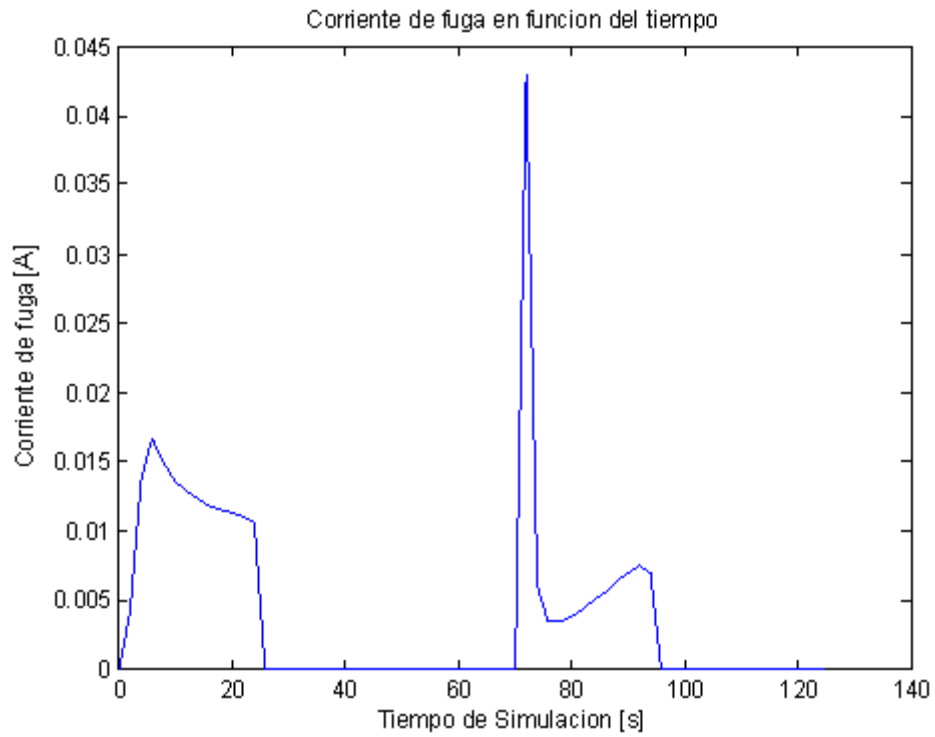


Figura 5.11: Corriente de fuga a 750 [V] y cuatro trenes en el intervalo

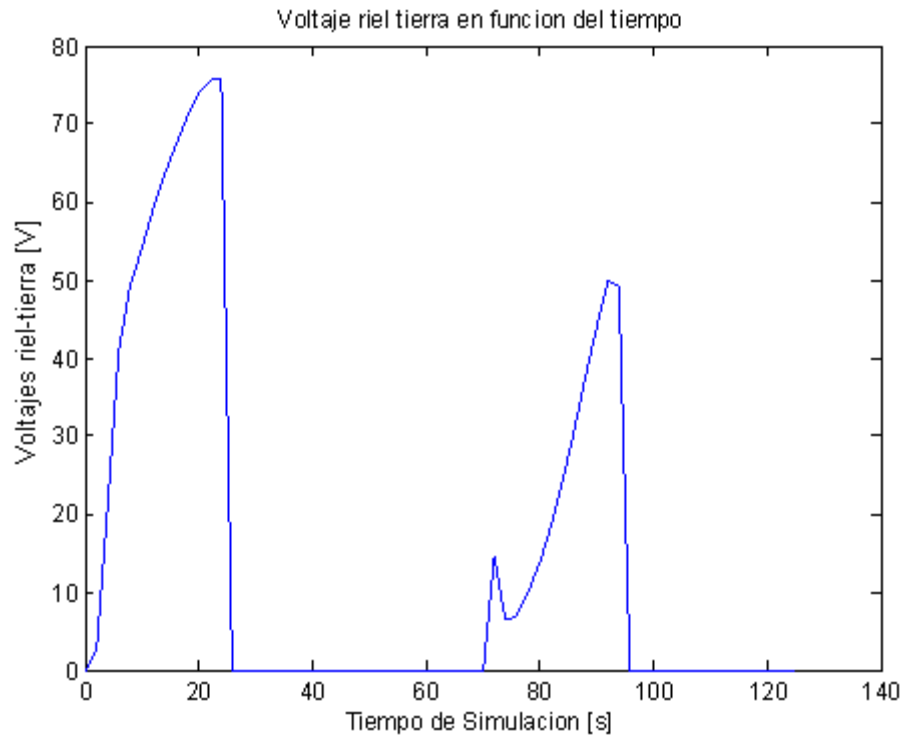


Figura 5.12: Voltaje riel-tierra a 750 [V] y cuatro trenes en el intervalo

5.2 Análisis de los resultados de las simulaciones

De acuerdo a los resultados anteriores, se puede ver que los valores máximos de corriente de fuga y de voltaje riel-tierra, no ocurren ambas en el mismo segundo de operación, sin embargo, el máximo de cada variable ocurre a la misma distancia de las S/E R. De esta forma tenemos que el máximo valor obtenido para la corriente de fuga ocurre aproximadamente a los 72 [s] de operación, cuando el tren inicia la etapa de tracción en la estación de pasajeros intermedia; a su vez, el máximo valor del voltaje riel-tierra se detecta a los 24 [s], en el momento en que el tren pasa de tracción a marcha a la vela.

Es posible decir entonces, que el voltaje tiene su máximo en torno a los 253 [m] desde la primera S/E R; y la Corriente de fuga muestra su máximo valor en torno a los 879 [m]. Con esto, la primera aproximación induce a pensar que la corriente de fuga adquiere su máximo valor en la mitad del intervalo inter Subestaciones de rectificación.

Por otro lado, el máximo del voltaje riel-tierra ocurre durante el último segundo de tracción del tren, pero de la misma forma que la corriente, como las magnitudes de los parámetros dependen de la distancia que se defina entre dos segundos de operación, también se debe analizar el hecho en el que se modifique la distancia a la que se encuentra la estación de pasajeros de la subestación de rectificación.

En el anexo 2 del presente documento, se puede ver cómo varían las magnitudes de estas variables, cuando se producen cambios en las condiciones de operación del tren (variación del voltaje de entrada y del número de trenes) o modificando los valores de los parámetros de la línea. Entonces se puede deducir lo siguiente:

- Si aumenta el voltaje de entrada, circulará mayor corriente por la línea, y por lo tanto, la corriente de fuga y el voltaje riel-tierra aumentará con respecto a la operación en condiciones nominales. De la misma forma, si se considera una operación a Voltaje de entrada constante, y se modifica el intervalo de explotación, al aumentar la cantidad de trenes dentro del mismo intervalo, la resistencia equivalente de los trenes disminuye, por tanto, la corriente circulante por las líneas aumenta, lo mismo que la corriente de fuga y por consecuencia el voltaje riel-tierra.

Con respecto a la variación de los parámetros, se analizarán a continuación los efectos de ellos, independientes unos de otros.

- **Resistencia de fuga:** Una variación de la resistencia de fuga, influye directamente en el voltaje riel-tierra (ley de ohm, $V=R*I$); el valor estimado de este parámetro, según apartado anterior, varía desde 100 Ω , hasta 7000 Ω aproximados. Por tanto, al obtener el voltaje riel-tierra, la magnitud de la corriente de fuga se vuelve despreciable comparado al valor de la resistencia de fuga. Si se considera entonces que la resistencia varía (en la realidad, el desgaste del material estructural de los aisladores, o el cambio de los tipos de aisladores usados podrían provocar estas variaciones), se tiene que:
 - La corriente de fuga aumenta, el voltaje riel-tierra disminuye si R_f disminuye.
 - La corriente de fuga disminuye, el voltaje riel-tierra aumenta si R_f aumenta.

Si bien la relación anterior es genérica, es posible notar que al variar en un 50% el valor nominal de R_f , se obtienen variaciones de la corriente de fuga entre un 60 y un 110% del valor

inicial (Tabla 5.3 considerando un tren en operación), donde el valor más alto se obtiene al finalizar la etapa de tracción de la segunda estación. Esta variación se hace mucho más notoria cuando se disminuye en un 50% el valor de R_f , ya que se obtiene desde un 50 hasta 300% más del valor inicial para esta variable; el máximo bajo esta condición, ocurre al inicio de la etapa de tracción de la segunda estación.

Para la variación de voltaje riel-tierra, se obtiene un aumento entre un 1 y un 67% cuando R_f aumenta, y una variación entre 70 y 200% del valor nominal, cuando R_f disminuye (ver Tabla C.1). Si bien, estos resultados muestran inconsistencias con respecto al primer análisis realizado, se puede mencionar que los valores de las variables de interés poseen una gran dependencia del valor de la resistencia de fuga, ésta a su vez determina si la dependencia del valor del voltaje riel-tierra está determinada principalmente por R_f o por la corriente de fuga.

- Resistencia longitudinal del terreno: Como se explicó anteriormente, esta depende directamente de la resistividad del terreno, la cual puede ser modificada por condiciones ambientales o por el uso de algún aditivo, de forma de aumentar o disminuir la resistividad. Este valor de acuerdo a valores estimados, varía desde 11 a 360 Ω aproximados. Luego, las variables varían de acuerdo a:
 - La corriente de fuga aumenta, el voltaje riel-tierra aumenta si r_t disminuye.
 - La corriente de fuga disminuye, el voltaje riel-tierra disminuye si r_t aumenta.

En este caso, ante una variación de $\pm 50\%$ del valor nominal, la corriente de fuga y el voltaje riel-tierra varían en el mismo porcentaje. Para un aumento del valor de r_t , las variables de interés varían entre un 10 y un 90%, en cambio, para la disminución de r_t , las variables aumentan entre un 2 y un 100% con respecto al valor inicial (ver Tabla C.2).

- Resistencia de barras guías: La resistencia de barras guías depende directamente de la resistividad del material del cual están hechos; este valor se puede modificar cambiando la materialidad de los rieles o recubriendo el acero con un elemento de menor o mayor resistividad dependiendo de lo que se desee hacer. Entonces, de acuerdo a las variaciones posibles del valor de este parámetro, es posible ver que:
 - La corriente de fuga aumenta, el voltaje riel-tierra aumenta si r_t disminuye.
 - La corriente de fuga disminuye, el voltaje riel-tierra disminuye si r_t aumenta.

Al igual que en caso anterior, la variación de las variables se produce en el mismo porcentaje, frente a una variación del valor de la resistencia de las barras guías; de esta forma tenemos que un aumento de un 100% de r_b , los valores de la corriente de fuga y el voltaje riel-tierra disminuyen entre a valores entre un 98 y un 74% del valor de su operación inicial. A su vez, si r_b disminuye a un 50% de su valor nominal, los valores de ambas variables aumentan entre un 0 y un 20% aproximadamente (ver Tabla C.3). Por tanto, la disminución del valor de r_b provoca mayores variaciones que su aumento.

- Resistencia de rieles: Los rieles son los encargados de retornar la corriente a la fuente, sobre ellos, es donde se pueden producir los mayores problemas producto de la corriente de fuga y parte de la “pila” que se forma para producir corrosión. Dependiendo de si la corriente sale o retorna de los rieles, es si actúa como ánodo o cátodo y por tanto si se produce o no corrosión en ellos, de acuerdo a éste, se puede obtener como variaciones en los rieles que:

- La corriente de fuga aumenta, el voltaje riel-tierra aumenta si r_r aumenta.
- La corriente de fuga disminuye, el voltaje riel-tierra disminuye si r_r disminuye.

Considerando las variaciones en el mismo porcentaje que se las realizadas al valor de la resistencia de las barras guías, para éste caso se obtiene: Cuando se disminuye el valor de r_r a su mitad, ambas variables toman valores entre un 50 y un 72% del caso inicial, a su vez, cuando r_r aumenta al doble, el aumento de la corriente de fuga y el voltaje riel-tierra alcanza valores entre 122 y 194% de su valor inicial. Claramente, el aumento del valor de la resistencia de los rieles provoca una mayor pérdida de corriente, lo que a su vez provoca el aumento del valor del voltaje del riel, indudablemente, este efecto es mucho más significativo que el producido por la disminución del valor de r_r (ver Tabla C.4).

Ahora bien, si analizamos los resultados del Anexo E, es posible ver que la operación genera el máximo potencial riel-tierra durante los últimos segundos de tracción; o en algunos casos se presentan altos voltajes en el inicio de la etapa de tracción cuando la estación se encuentra en medio del intervalo alimentado por el par de SE/R adyacentes considerado.

5.3 Análisis de los efectos de la corrosión

Como se tienen estructuras de acero, éstas presentan una configuración granulada, dependiendo de los elementos usados en su fabricación, así como de la calidad del material. De por sí, éste se comporta como un electrodo con una tendencia anódica o catódica específica. Para que se conforme una pila, es necesario un medio electrolito que transporte electrones, que en este caso puede ser el aire o la humedad del mismo, así como también el suelo (si la estructura está enterrada).

Este circuito conforma una celda de corrosión y si se tienen en cuenta los valores obtenidos en el apartado anterior de kilos de material perdido en un día de operación, se considera entonces que el material perdido durante un año, podría llegar a ser cercano a 0,1 [kg] entre dos S/E R consecutivas. Además si se considera como ejemplo una línea que ha estado operando durante 20 años, se obtiene una cantidad cercana a los 2 [kg]; recordar que ésta estimación se obtuvo usando el valor del equivalente electroquímico de los iones férrico (Fe^{+++}), el cual puede variar considerablemente, si se considera la aleación real de los rieles.

Existen variados métodos que ayudan a prevenir este efecto indeseable en las construcciones (ya que sólo lo mitigan pero no lo pueden anular): recubrimientos, ánodos de sacrificio, selección de materiales, inhibidores de corrosión, etc. Sin embargo, lo más importante para mantener un buen estándar de operación y protección es realizar periódicamente mediciones que permitan descubrir aquellos puntos conflictivos dentro de las instalaciones, uniones de rieles, fisuras, fracturas, etc.; esto es debido a que en la operación de este sistema de tracción hay presentes muchas otras fuerzas que no se han considerado en este trabajo.

Por tanto, un adecuado reconocimiento y medición de los ambientes de operación ayudará en gran medida a poder controlar la corriente de fuga y el voltaje riel-tierra. A su vez, esto permite determinar la factibilidad de diseñar y aplicar medidas de regulación del valor de los principales parámetros que influyen en el valor de las variables eléctricas.

Si se consideran que los rieles no están instalados bajo el nivel del terreno, sino que están sobre él, es necesario utilizar otros criterios para su protección. Si bien estas estructuras son propensas al depósito o acumulación de agua, polvo, herrumbre, etc. (aunque en pequeñas cantidades). La aplicación de pintura y un programa de limpieza superficial y mantenimiento permiten alargar la vida útil de las mismas. Sin embargo, el recubrimiento de pintura debe hacerse con especial cuidado, eliminando la grasa y depósitos de aceite, así como su limpieza

con elementos libres de plomo, etc. Como la limpieza es poco probable de realizar en las instalaciones de Metro, es recomendable el diseño adecuado de recubrimientos que consideren todas las fuerzas y condiciones a las que están sometidos.

Para las enfierraduras estructurales, es necesario considerar que ellas se encuentran sumergidas en un medio electrolito. Cada suelo tiene características particulares de resistividad - conductividad específicas, y a lo largo de la longitud de la línea, esta resistividad varía por efectos de cercanías a cuerpos de agua, instalaciones enterradas, o condiciones de emplazamiento (recordemos que existen estaciones subterráneas, a nivel de suelo o aéreas, las cuales están sometidas a diferentes condiciones climáticas), por tanto la sola utilización de enfierraduras con recubrimiento no es suficiente. Es recomendable el análisis de la aplicación de revestimientos que aíslen las enfierraduras del medio (podrían ser polietileno, polipropileno, resina epóxica, brea epóxica, etc.), sin embargo su uso está supeditado a la utilidad y a la no modificación de las características de obras de hormigón en las cuales están inmersas dichas enfierraduras.

Finalmente cabe señalar que el control de la corrosión es un proceso continuo y dinámico. La clave de un efectivo control de la corrosión está en la calidad del diseño y las instalaciones de los equipos, bajo la consideración de todas las zonas y tipos de operación a la que estará sujeta; el empleo de una tecnología adecuada, un mantenimiento continuo y monitoreo ejecutado por personal capacitado. Un programa de monitoreo e inspección puede ser la mejor garantía contra estos problemas. Dicho control, extiende la vida útil de cualquier estructura. El costo de una parada inesperada o de un accidente, supera en magnitud los gastos que acarrea la instalación de un sistema de protección contra la corrosión. Controlar el deterioro de estas estructuras por corrosión, ahorra dinero, preserva el ambiente, protege la integridad de las instalaciones y de las vidas humanas.

5.4 Efectos sobre un contacto involuntario con los rieles.

Ahora bien, si se considera la tabla de efectos en función de la corriente que se encuentra en el Anexo D, es posible generar el siguiente resumen, donde se pueden analizar los efectos producidos sobre una persona que involuntariamente entrara en contacto con los rieles, durante la operación de los trenes. A continuación se presenta una tabla que muestra los efectos en función del voltaje. Se consideraron dos casos posibles, ambiente húmedo y ambiente seco, con sus respectivos valores de resistencia equivalente del cuerpo humano, se tiene entonces que:¹²

Voltaje [V] R=11 [kΩ]	Voltaje [V] R=330 [kΩ]	Efectos de la corriente
0-330	0-11	Umbral de percepción
330-2640	11-88	Sorpresa fuerte, sin perder control muscular

¹² Los valores usados como referencia para la resistencia equivalente del cuerpo humano son los utilizados en el curso EL56A.

Voltaje [V] R=11 [kΩ]	Voltaje [V] R=330 [kΩ]	Efectos de la corriente
2640-4950	88-165	Reacción Violenta, separándose del objeto
4950-16500	165-550	Paralización muscular, fuertes contracciones y dificultad para respirar
16500-33000	550-1100	Puede causar fibrilación ventricular.
33000-66000	1100-2200	FATAL, siempre con fibrilación ventricular
66000 o más	2200 o más	Fuertes contracciones que oprimen el corazón

Tabla 5.4: Efectos producidos sobre el cuerpo humano, en función del voltaje.

Los valores obtenidos en la simulación de corrientes de fuga y voltajes riel-tierra, ha entregado resultados menores en todos los casos a 200 [V], por tanto, de acuerdo a la tabla anterior, la persona que entre en contacto con los rieles, sufrirá desde la precepción de la corriente, hasta la posibilidad, en el peor de los casos, de sufrir paralización muscular, contracciones y dificultad para respirar; sin embargo, no llegando a sufrir fibrilación ventricular.

Claramente, los resultados finales producidos por el contacto involuntario serán determinados por un conjunto de factores, y los que se muestran aquí son sólo referenciales.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos es bueno mencionar que es posible apreciar el grado de dependencia que tienen las variables con respecto a los parámetros de la línea, es así, como una variación en la resistencia de fuga puede llevar a tener 300% del valor normal. Si se considerara el caso en el que todas los valores de los parámetros varíen de forma que cada uno provoque un aumento del valor de la corriente de fuga y del voltaje riel-tierra, sería posible llegar a una situación crítica, fuera de norma y pero aún peligrosa para el personal de Metro.

Del estudio, modelación, programación y análisis de la operación del Metro de Santiago, y sus respectivos valores estimados de corrientes de fuga y voltajes de riel, es posible concluir lo siguiente:

- Los valores de corrientes de fuga, por lo general se mantienen dentro de rangos permisibles que no afectan en gran medida las instalaciones del Metro.
- En general, los valores obtenidos para los Voltajes riel-tierra, no están dentro de los rangos críticos, que puedan poner en peligro, por un corto tiempo, la vida de las personas que entren en contacto involuntario con los rieles.
- El material perdido en las instalaciones de Metro, considerando la operación de la simulaciones, no afectan en gran medida las instalaciones existentes.
- Se propone implementar un sistema periódico de mediciones y mantención de rieles, de forma de mantener constante el control de las corrientes de fuga, en instalaciones existentes. Esto unido en nuevas instalaciones con sistemas de protección como la anódica, el recubrimiento u otra, generan un mayor control sobre las variables estudiadas.
- Al momento del diseño de una línea o en la evaluación del sistema existente, es recomendable tener presente: Considerar el uso de los rieles con la menor resistencia posible; utilizar aditivos de tal forma que la resistencia longitudinal del terreno alcance los mayores valores posibles; diseñar y revisar frecuentemente la aislación riel-tierra, de forma que la resistencia de fuga se mantenga en el mayor valor posible y finalmente, en el diseño de las barras guías, considerar un alto valor de resistencia. El conjunto de estas medidas contribuirá de gran forma en mantener valores mínimos de corrientes de fuga y voltajes riel-tierra.

Para la Línea 5, se tiene que el máximo valor de voltaje riel-tierra ocurre entre las S/E R Valdovinos y Pedreros, cuando el tren pasa de tracción a marcha a la vela entre las estaciones San Joaquín y Pedrero con 82,619 [V].

La corriente de fuga máxima ocurre al inicio de la etapa de tracción cuando el tren se dirige de estación Plaza de Armas a Bellas Artes entre las S/E R Santa Ana y Plaza de Armas, con 0,40302 [A].

Las mayores pérdidas ocurren en el mismo punto anterior, con $7.74 \cdot 10^{-05}$ [gr], cada vez que pasa un tren por este punto, por tanto es la parte donde los rieles deben estar más debilitados de toda la línea (ver anexo E).

Sin embargo, estas conclusiones, puntuales, dentro del desarrollo del presente trabajo,

están sujetas a todas las hipótesis utilizadas dentro de la modelación. Por tanto, no puede asumirse que los valores sean 100% representativos ni confiables. Como se encuentra plasmado en el documento, cada una de las suposiciones realizadas puede generar variaciones importantes en los resultados obtenidos; principalmente, las variaciones más importantes se podrían encontrar en la modificación del equivalente electroquímico de los rieles, o los valores reales de los parámetros de línea considerados.

Cabe señalar también, que se ha apreciado dentro del desarrollo de este trabajo, que una pequeña modificación en el algoritmo de programación para calcular corrientes de fuga y voltajes riel-tierra, varía considerablemente los resultados finales.

Por tanto, se sugiere proseguir en el desarrollo de este tema, que puede ser de apoyo tanto a nivel de Metro de Santiago, como a la operación de los sistemas de tracción usados en todo el mundo.

De forma específica, es recomendable lograr extender este modelo de tal forma que considere la actual operación de Metro, donde los trenes tienen etapa de tracción sólo al salir de una estación, sino que en muchas oportunidades deben iniciar el movimiento dentro de los túneles. Estos mayores consumos de energía provocan mayores pérdidas. De la misma forma se recomienda realizar modelaciones para los trenes que operan con motores de inducción y frenado regenerativo, ya que éstos provocan circulación de corriente por los rieles durante un mayor tiempo de operación, por lo cual es posible presenten mayores pérdidas que los trenes con motores de corriente continua.

Otro punto donde es recomendable profundizar es en la modelación de la operación del sistema frente a las variaciones en la frecuencia de operación de la red. El modelo actual considera, como simplificación, que cuando se encuentra más de un tren en el intervalo entre dos S/E R consecutivas, estos trenes operan en paralelo; sin embargo, en estricto rigor los trenes están en todo momento a una distancia distinta de cero. De la misma forma, sería interesante ver el comportamiento de las variables cuando existen perturbaciones en la red, como la caída de alguna S/E R.

Dentro de los objetivos del presente trabajo, se encontraba además el análisis, estudio y proposiciones de mejora y de implementación del sistema de protecciones del Metro, enfocado al control de los Voltajes de riel elevados y la minimización de las corrientes de fuga. Sin embargo, dicho análisis no fue posible realizarlo debido a que no se pudo contar, dentro de los plazos de realización del presente trabajo, con la información esencial, para poder efectuar un estudio que fuese relativamente aceptable.

Bibliografía

- [1] Metro de Santiago. «Anexo Estadístico.» *Memoria Anual*. Santiago, 2005.
- [2] Systra. «Metro de Santiago Segunda Etapa, Extensión Línea 5.» *Simulaciones MARCADET*. Santiago, 2000.
- [3] Cortes, María, y Pablo Ortiz. «Corrosión.» *Apuntes Científicos*. Uniandinos.
- [4] Valverde, Mario. «PREVENCION de la CORROSION en Estructuras Sumergidas o Enterradas (método de protección catódica).» *Seminario*. Chile: Cides.
- [5] Yu, J. G. «The Effects of Earthing Strategies on rail Potential and Stray Currents in D.C. Transist Railways.» *International Conference on Developments in Mass Transit Systems*. Inglaterra: IEEE, Abril de 1998.
- [6] Söylemez, Mehmet Turan, Süleyman Acikbas, y Adam Kaypmaz. «Controlling Rail Potential of DC Supplied Rail Traction Systems.» Istanbul-Turquía: IEEE, 2006
- [7] Goodman, C. J., y J. G. Yu. «Modelling of Rail Potential Rise and Leakage Current in DC Rail Transit Systems.»
- [8] Tan, K.Y., y H. Eren. «Prediction of Stray Current and Rail Potential in D.C. Traction Railway Systems.»
- [9] Lucero, Augusto. «Tracción Eléctrica.» *Publicaciones Docentes*. Santiago, Otoño de 2006.
- [10] Villar R., Jacqueline y Urzua G., Reinaldo. «Proyecto de Alimentacion y Distribucion de Energia Electrica a la Línea 5 del Metro de Santiago.» Chile, Abril de 1991.
- [11] Morales, Nelson, Rodolfo Palma, Jorge Romo, y Ariel Valdenegro. «Máquinas Eléctricas.» *Publicación Docente*. Santiago: Oficina de Publicaciones Docentes, Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Chile, 1996.
- [12] IDIEM. «Estudio Diagnostico Estructural de Tuneles en Línea 1 y 2 del Metro S.A.» *Informe de Avance N° 3*. Santiago, 15 de Enero de 2003.
- [13] Yu, J.G., y C.J. Goodman. «Stray Current Design Parameters for DC Railways.»
- [14] Allen, Stuart. «An Integrated Systems Engineering Approach to managing the

implementation of New Transit Technologies.» *TTC Rapid Transit Expansion Program*. Toronto: IEEE, 1993.

[15] Romo, Jorge. «Laboratorio de Conversión electromecánica de la energía.» *Publicaciones Docentes*. Santiago, Otoño de 2006

[16] Ardizzon, Luca, Paolo Pinato, y Dario Zaninelli. «Electric traction and electrolytic corrosion: a software tool for stray currents calculation.» Milan: IEEE, 2003.

[17] Aylott, P.J. «Stray current is for life - not just for Christmas.» *Stray current corrosion management strategies for d.c. traction systems*. Inglaterra: IEEE, 20 de Octubre de 1999.

[18] Bahra, K. S., y R. B. Catlow. «Control of Stray Current for D.C. traction Systems.» *Electric Railways in a United Europe*. Inglaterra: IEEE, 27 de Marzo de 1995.

[19] Bahra, K.S., y P.G. Batty. «Earthing and Bonding of Electrified Railways.» *International Conference on Developments in Mass Transit Systems*. IEEE, Abril de 1988.

[20] Case, Steve. «DC Traction Stray Current Control, So What's the problem?» *The Institution of Electrical Engineers*. Inglaterra: IEEE, 1999.

[21] Chan, W. M Sim and C. F. «Stray Current Monitoring and Control On Singapore MRT System.» Singapur: IEEE, 21 - 24 de Noviembre de 2004.

[22] Chen, Shi-Lin. «Analysis of Rail Potencial and Stray Current for Taipei Metro.» IEEE, 1 de Junio de 2006.

[23] Chen, Shin-Lin, Shih-Che Hsu, Chin-Tien Tseng, Kun-Hong Yan, Huang-Yu Chou, y Tong-Ming Too. «Analysis of Rail Potential and Stray Current for Taipei Metro.» *IEEE Transaction on vehicular Technology*. IEEE, Enero de 2006.

[24] Chen, Y.C. Liu and J.F. «Control scheme for reducing rail potencial and stray current in MRT systems.» China: IEEE, 2004.

[25] Dodds, Ray. «DC Traction Stray Current Control.» *A Case Study From a Utility*. Inglaterra: IEEE, 1999.

[26] González, Paz, y Carlos Renato. «Alimentación Eléctrica N °5 del Metro de Santiago: Proposición y Análisis de Alternativas.» *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista*. Chile, 1993.

[27] Systra. «Simulaciones de Tracción, Extensión Línea 5.» *Simulaciones MARCADET*.

2000.

[28] Kale, Eugene D., Martin Sanders, y William Sidoriak. «Corrosion Control for the Dallas Area Rapid Transit System.» Ieee, 1999.

[29] Luca Ardizzon, Paolo Pinato, Dario Zaninelli. «Electric traction and electrolytic corrosion: a software tool for stray currents calculation.» Italia: IEEE, 2003.

[30] Yu, J G. «Computer Aided Design of Power Supplies for Rail Transit Systems.» Suiza, Junio de 1996

[31] Metro S.A. «Resumen del Programa de Operación de la Línea Quinta Normal - Vicente Valdes (Línea 5).» *Línea Quinta Normal - Vicente Valdes, Tercera Extensión.*

[32] Sim, W. M, y C. F. Chan. «Stray Current Monitoring and Control On Singapore MRT System.» Singapur: IEEE, 21 - 24 de Noviembre de 2004.

[33] Sim, W.M., Melvyn Thong T.L, y C.F. Chan. «Touch Voltage Protection on Singapore MRT System.»

[34] Thomas, Ralph S., y Walt E. Stinger. «Analysis of stray current, track-to-earth potentials & substation negative grounding in DC traction electrification system.» *ASME Joint rail Conference.* Toronto: IEEE, 17-19 de Abril de 2001.

ANEXO A

MODELACIÓN DE LA MARCHA DE UN TREN.

A.1 Ecuación Dinámica.

Para efectuar la simulación de la marcha de un tren se recurre a la ecuación de la dinámica:

$$F_m - F_r = M \times a \quad [N] \quad (A.1)$$

Donde:

$$F_m = \text{Fuerza Motriz del tren} \quad [N]$$

$$F_r = \text{Fuerza de resistencia al rodado} \quad [kg]$$

$$M = \text{Masa del tren corregida por efectos inerciales} \quad [kg]$$

$$M = m \times 1,124 \quad (\text{factor dado por el fabricante}) \quad [kg]$$

$$m = \text{Masa del tren} \quad [kg]$$

$$a = \text{Aceleración} \quad [m/s^2]$$

Esta ecuación debe aplicarse para las fases de:

- Tracción
- Marcha inercial
- Frenado

A.2 Sistema Discreto.

Para resolver la ecuación se debe calcular en cada intervalo de simulación, la aceleración, la velocidad y la distancia acumulada. Para ello se recurre a discretizar el sistema.

Las ecuaciones, son las ecuaciones de la cinemática aplicadas a cada intervalo de simulación:

$$\begin{aligned}
 a_i &= \frac{(Fm - Fr)}{M} \\
 v_i &= v_{i-1} + a_i \times \Delta t \\
 s_i &= s_{i-1} + v_{i-1} \times \Delta t + \frac{1}{2} \times a_i \times \Delta t^2
 \end{aligned}
 \tag{A.2}$$

Donde:

$$a_i = \text{aceleración en el intervalo } i \quad [m/s^2]$$

$$v_i = \text{velocidad en el intervalo } i \quad [m/s]$$

$$\Delta t = \text{intervalo de simulación} \quad [s]$$

$$s_i = \text{distancia acumulada en el intervalo } i \quad [m]$$

A.3 Fuerza motriz en función de la corriente.

Por especificaciones de fábrica, el esfuerzo en llantas **por motor** en función de la corriente está dado por curvas, las cuales linealizadas quedan representadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 F_m(I) = & \begin{aligned} & 53 \times I - 5.902 & 0 \leq t < 9 \\ & 52 \times I - 8.490 & 9 \leq t < 11 \\ & 43 \times I - 7.867 & 11 \leq t < 13 \\ & 37 \times I - 7.610 & 13 \leq t \end{aligned}
 \end{aligned}
 \tag{A.3}$$

Donde las unidades son: F_m [N], I [A] y t [s].

A.4 Corriente de un motor en función del tiempo.

De la inscripción de corriente en función del tiempo de un coche motriz (4 motores conectados en serie durante el comienzo de la partida y después en serie – paralelo), se obtiene la curva de corriente de un motor en función del tiempo, la cual linealizada queda representada por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 I(t) = & \begin{array}{ll} 133 \times t + 180 & 0 \leq t < 3 \\ 580 & 3 \leq t < 5 \\ 510 & 5 \leq t < 9 \\ -40 \times t + 890 & 9 \leq t < 11 \\ -45 \times t + 1.065 & 11 \leq t < 13 \\ -13 \times t + 767 & 13 \leq t \end{array} \quad (A.4)
 \end{aligned}$$

A.5 Fuerza motriz en función del tiempo.

Efectuando los reemplazos, las ecuaciones que rigen la fuerza motriz en función del tiempo **para un motor**, son para un material rodante, formado por trenes de 5 coches (3 motrices con 4 motores c/u, 2 por boggie), total 12 motores:

$$\begin{aligned}
 Fm(t) = & \begin{array}{ll} 7.049 \times t + 3.638 & 0 \leq t < 3 \\ 24.838 & 3 \leq t < 5 \\ 21.128 & 5 \leq t < 9 \\ -2.080 \times t + 37.790 & 9 \leq t < 11 \\ -1.935 \times t + 37.928 & 11 \leq t < 13 \\ -481 \times t + 20.767 & 13 \leq t \end{array} \quad (A.5)
 \end{aligned}$$

Esto es para un motor, para 12 motores multiplicar por 12.

A.6 Fuerza de resistencia al rodado.

Para el caso de un tren de metro de cinco coches c/u, según especificaciones de fábrica el esfuerzo de resistencia al avance efectuando equivalencias de gradientes y curvas, queda representado por:

$$Fr = \left(11,6 + g_{equiv} + 500 \times Tr / R_{equiv} \right) \times P + 25,92 \times v^2 \quad (A.6)$$

Donde:

Fr	= Fuerza de resistencia al rodado	[N]
P	= Peso total del tren	[kg × N]
g_{equiv}	= Gradiente equivalente	[‰]
Tr	= Trocha	[m]
R_{equiv}	= Radio equivalente	[m]
v	= Velocidad	[m/s]

Finalmente, mediante esta simulación, es posible obtener:

- Tiempo de simulación (0 a x seg.) con un intervalo de 1 seg.
- La Fuerza motriz del tren obtenida de la fuerza motriz correspondiente de un motor.
- Aceleración aplicando la ecuación dinámica en cada etapa, tracción, marcha inercial y frenado.
- Velocidad en m/seg. y km/h.
- Distancia recorrida.
- Energía consumida, suponiendo en cada intervalo $E = F \cdot v \cdot \Delta t$

La línea queda discretizada en segmentos de largo no uniforme, correspondientes c/u de ellos a una celda de simulación separadas en el intervalo de simulación de valor constante, en este caso 1 segundo.

Anexo B

VARIACIONES DE LA CONDICIÓN NOMINAL.

A partir de las condiciones iniciales de simulación comentadas durante el trabajo, a continuación se presenta como varían las magnitudes de las variables en análisis, de acuerdo a variaciones en los valores de los parámetros del modelo.

B.1 Variación en Voltaje de entrada

Como primer caso veamos lo que sucede cuando varía el voltaje generado por las S/E R.

En la Tabla B.1 es posible ver el caso en que las S/E R operan en el mínimo permitido por los trenes, i.e. 500 [Vcc].

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
0	0	0	0	0	0	0
2	0.0011407	0.0021546	0.0038779	0.74261	1.4026	2.5245
4	0.0051151	0.0078282	0.010654	7.8977	12.087	16.449
6	0.008866	0.010615	0.011777	21.739	26.029	28.877
8	0.008657	0.0096717	0.010274	28.447	31.781	33.76
10	0.0081869	0.0088597	0.0092393	32.92	35.625	37.151
12	0.007562	0.0081801	0.0085287	35.088	37.956	39.573
14	0.0075201	0.0079379	0.0081646	39.014	41.182	42.358
16	0.0073417	0.0076837	0.007867	41.774	43.72	44.763
18	0.0072331	0.0075247	0.0076795	44.469	46.262	47.214
20	0.007112	0.0073765	0.0075163	46.655	48.39	49.307
22	0.0069312	0.0071642	0.0072867	48.012	49.626	50.475
24	0.0067583	0.0069672	0.0070765	48.336	49.829	50.611

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
26	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
68	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
72	0.027516	0.028409	0.028877	9.4381	9.7442	9.9048
74	0.0039108	0.0039813	0.0040175	4.2159	4.2919	4.3309
76	0.0022295	0.0022519	0.0022632	4.479	4.524	4.5468
78	0.0022354	0.0022579	0.0022694	6.4335	6.4984	6.5313
80	0.0025081	0.0025335	0.0025465	9.2023	9.2956	9.3429
82	0.0028141	0.0028534	0.0028735	12.216	12.387	12.474
84	0.0031875	0.0032306	0.0032525	15.686	15.898	16.006
86	0.0036043	0.003656	0.0036824	19.625	19.907	20.05
88	0.0040561	0.004118	0.0041496	24.032	24.399	24.586
90	0.0045035	0.0045768	0.0046144	28.642	29.109	29.347
92	0.0048149	0.0048989	0.004942	32.496	33.062	33.353
94	0.0045112	0.0045992	0.0046444	31.89	32.511	32.831
96	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0	0
106	0	0	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
110	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0
116	0	0	0	0	0	0
118	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
122	0	0	0	0	0	0
124	0	0 <td 0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0

Tabla B.1: Valores de variables en función del tiempo de explotación del sistema a 500 [V].

En las Figuras B.1 a B.6 se pueden las curvas obtenidas de esta simulación para las variables de interés:

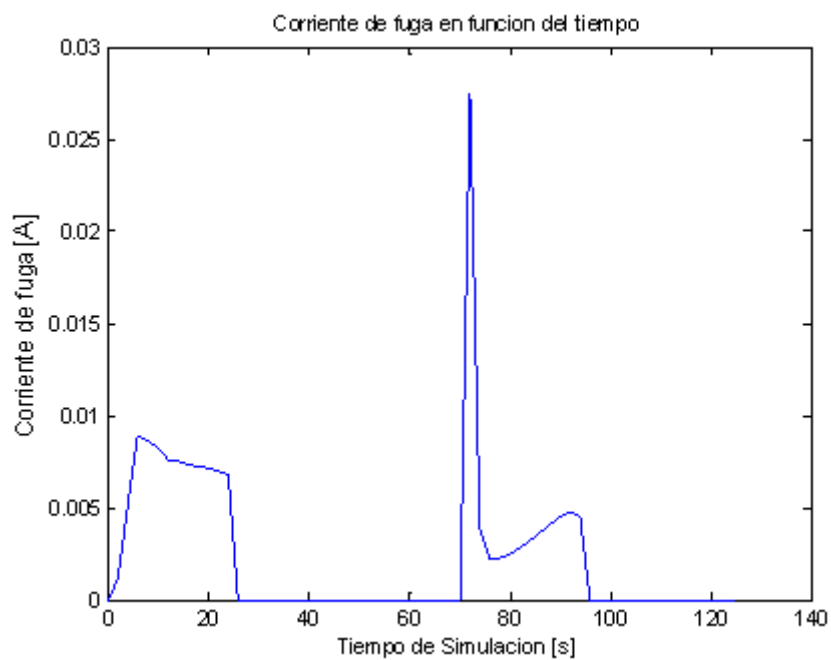


Figura B.1: Corriente de fuga a 500 [V] y un tren en el intervalo

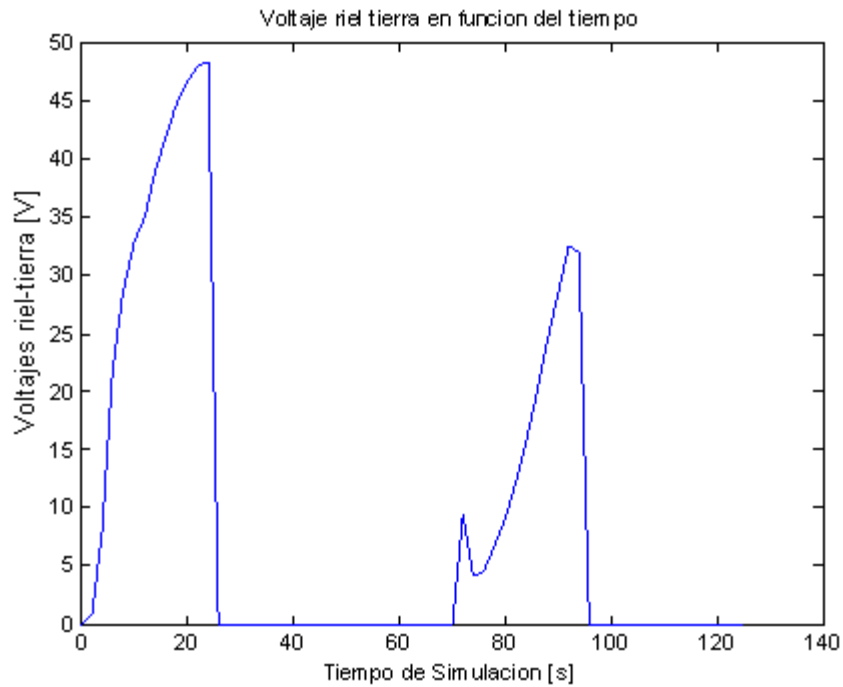


Figura B.2: Voltaje riel-tierra a 500 [V] y un tren en el intervalo

Veamos las gráficas, si operan 2 trenes dentro del mismo sector inter-Subestaciones, esta operación simula un tiempo de operación de 125 [s] aproximadamente.

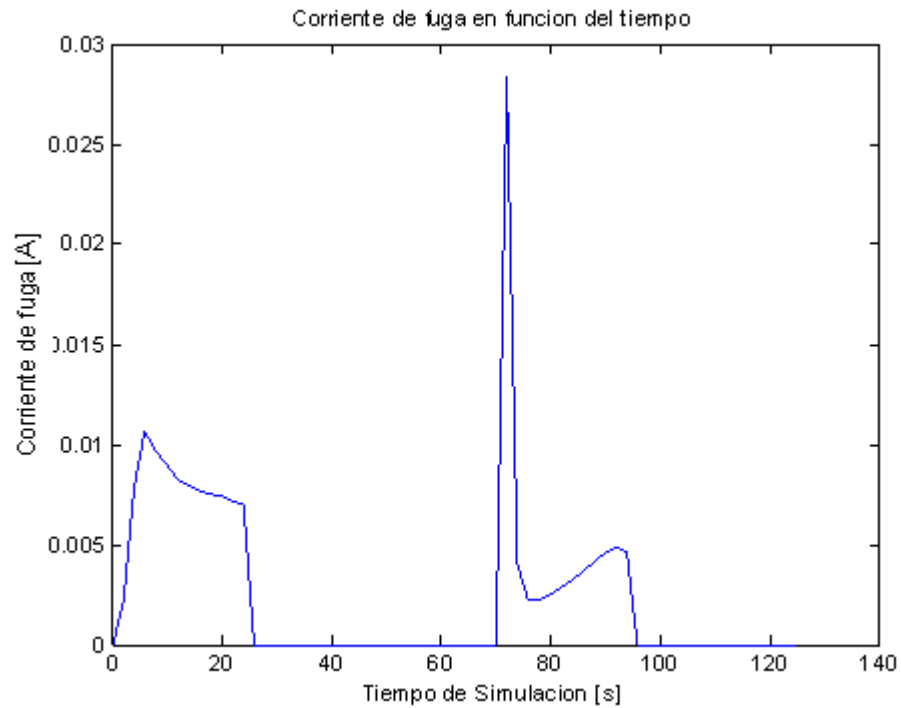


Figura B.3: Corriente de fuga a 500 [V] y dos trenes en el intervalo.

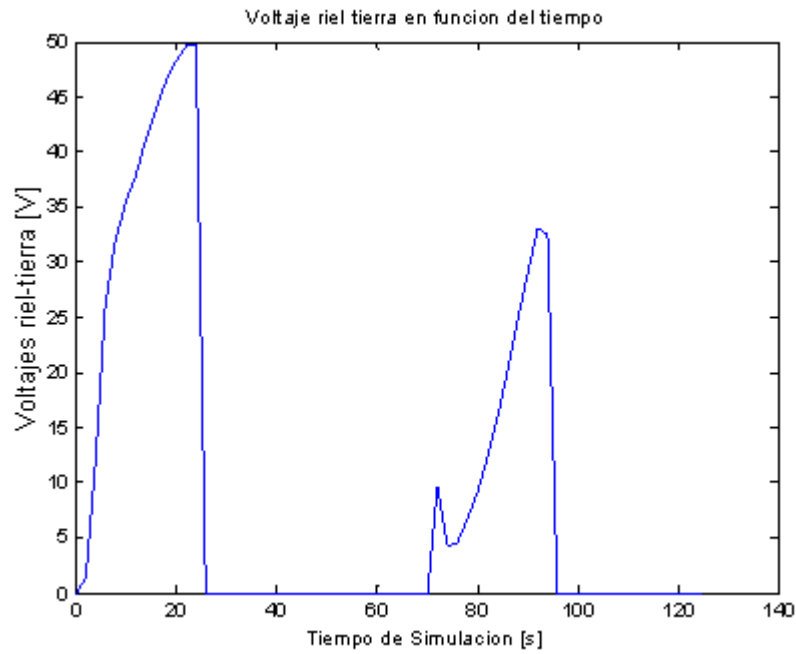


Figura B.4: Voltaje riel-tierra a 500 [V] y dos trenes en el intervalo

Si se considera, que Metro busca operar en intervalos de 90 [s], de forma de mejorar el servicio, se puede llegar a tener 4 trenes en un intervalo inter-Subestaciones, obteniendo las siguientes curvas:

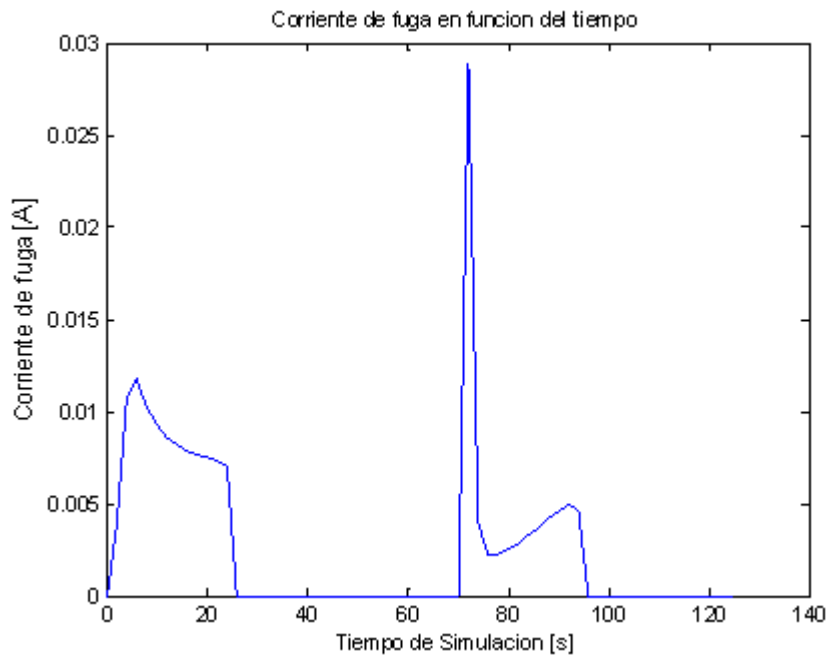


Figura B.5: Corriente de fuga a 500 [V] y cuatro trenes en el intervalo

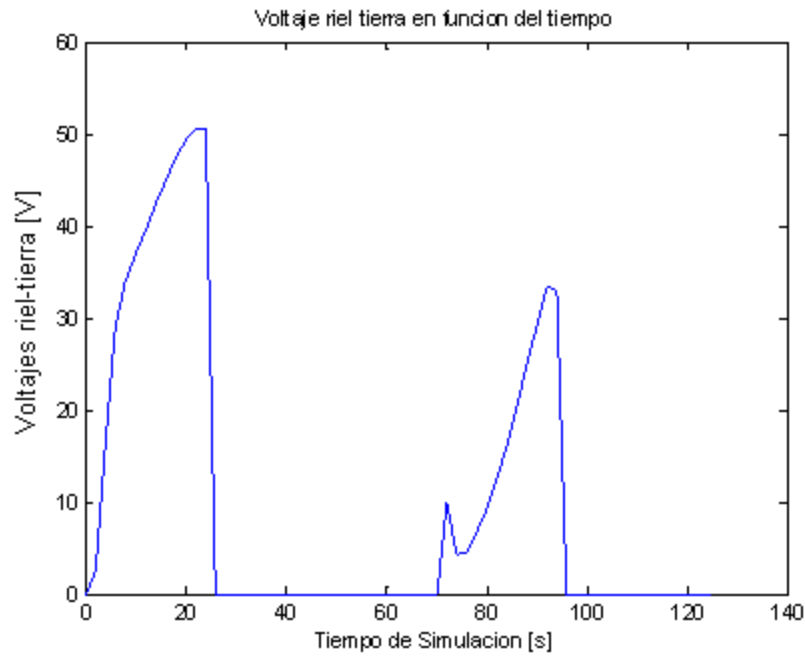


Figura B.6: Voltaje riel-tierra a 500 [V] y cuatro trenes en el intervalo

Considerando ahora el voltaje máximo permitido por los trenes, 900 [V] se tiene que los valores de las variables son:

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
0	0	0	0	0	0	0
2	0.0011646	0.0022539	0.0042342	0.75816	1.4673	2.7565
4	0.0059411	0.0099183	0.014909	9.173	15.314	23.019
6	0.012588	0.016468	0.019467	30.866	40.378	47.734
8	0.013313	0.015895	0.017603	43.747	52.232	57.842
10	0.013098	0.014937	0.016064	52.668	60.06	64.593
12	0.013612	0.014724	0.015352	63.158	68.32	71.231
14	0.013536	0.014288	0.014696	70.226	74.127	76.245
16	0.013215	0.013831	0.014161	75.194	78.697	80.574
18	0.01302	0.013544	0.013823	80.045	83.271	84.984

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
20	0.012802	0.013278	0.013529	83.979	87.102	88.753
22	0.012476	0.012896	0.013116	86.422	89.327	90.854
24	0.012165	0.012541	0.012738	87.004	89.693	91.1
26	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes _{riel-tierra} [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
62	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
72	0.047127	0.049825	0.051293	16.164	17.09	17.593
74	0.0068472	0.0070654	0.0071798	7.3813	7.6165	7.7398
76	0.0039492	0.0040205	0.0040572	7.9339	8.0772	8.1508
78	0.0039595	0.0040313	0.0040681	11.396	11.602	11.708
80	0.0044477	0.004526	0.0045662	16.319	16.606	16.753
82	0.0050653	0.0051362	0.0051724	21.989	22.296	22.453
84	0.0057375	0.005815	0.0058546	28.234	28.616	28.81
86	0.0064877	0.0065807	0.0066282	35.325	35.832	36.091
88	0.0073009	0.0074123	0.0074693	43.258	43.918	44.256
90	0.0081063	0.0082383	0.0083059	51.556	52.395	52.825
92	0.0086668	0.008818	0.0088955	58.492	59.512	60.036
94	0.0081202	0.0082785	0.0083599	57.402	58.521	59.096
96	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0	0

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	1 tren	2 trenes	4 trenes	1 tren	2 trenes	4 trenes
104	0	0	0	0	0	0
106	0	0	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0
116	0	0	0	0	0	0
118	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
122	0	0	0	0	0	0
124	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0

Tabla B.2: Valores de Corriente de fuga y Voltaje riel tierra para un voltaje de operación de 900 [V]

Y las gráficas correspondientes:

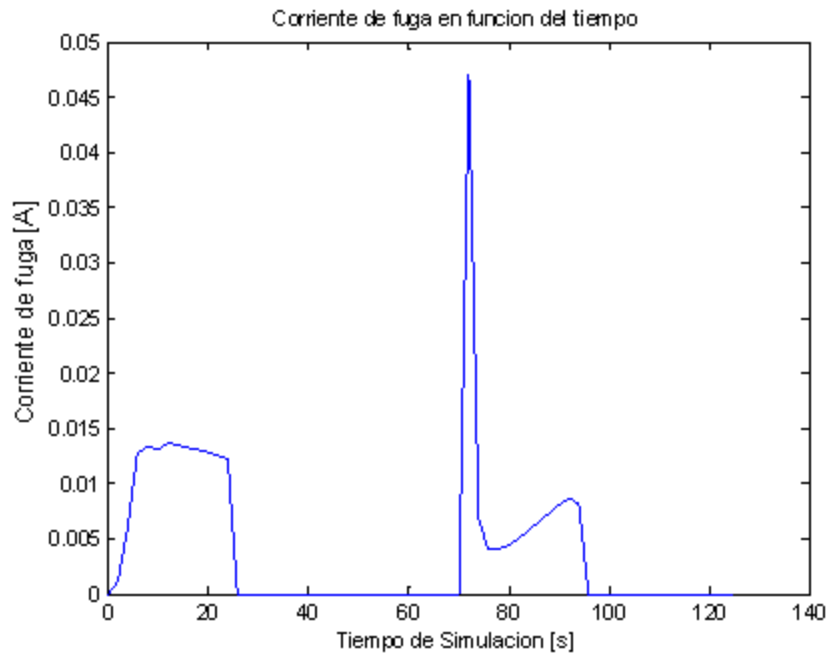


Figura B.7: Corriente de fuga a 900 [V] y 1 tren en el intervalo

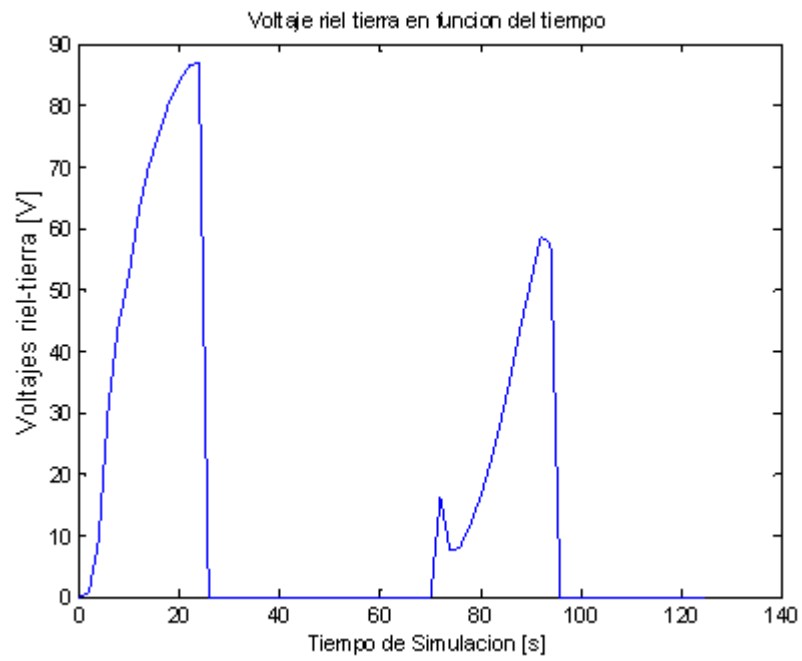


Figura B.8: Voltaje riel-tierra a 900 [V] y 1 tren en el intervalo

Para 2 trenes se tiene entonces:

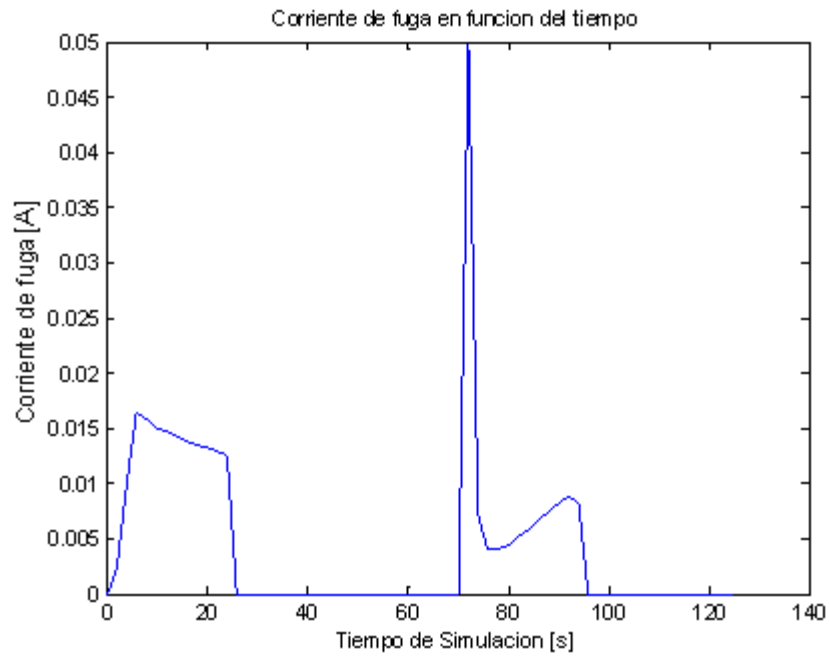


Figura B.9: Corriente de fuga a 900 [V] y dos trenes en el intervalo

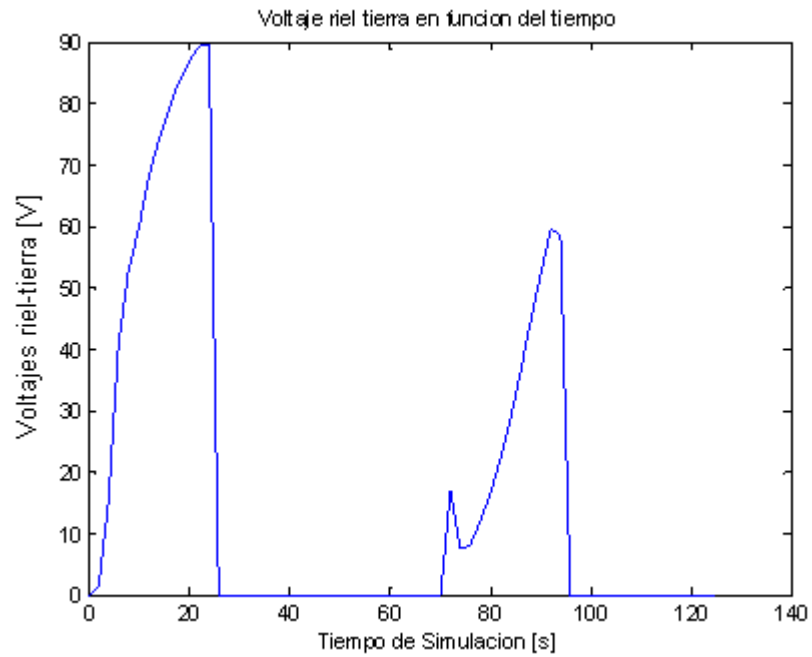


Figura B.10: Voltaje riel-tierra a 900 [V] y dos trenes en el intervalo

Finalmente para 4 trenes:

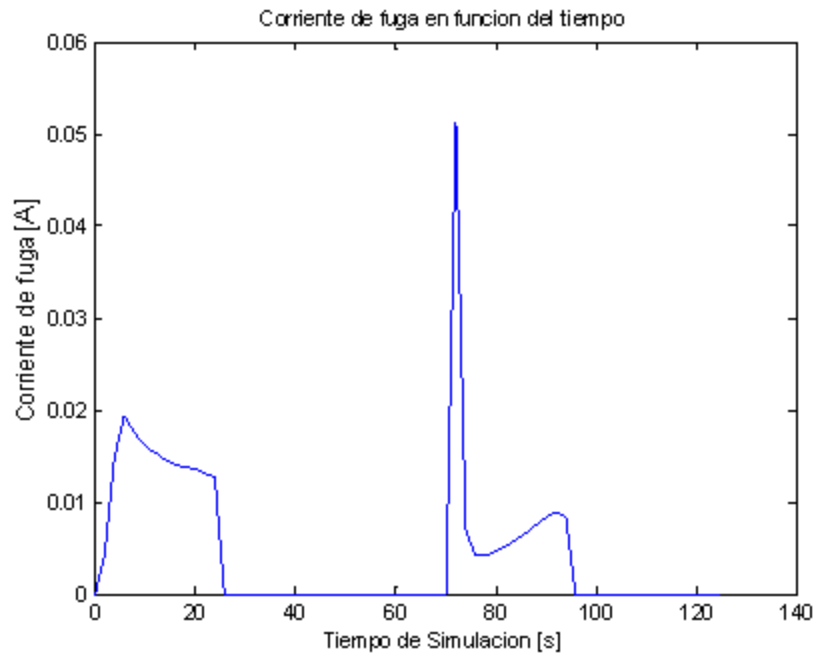


Figura B.11: Corriente de fuga a 900 [V] y cuatro trenes en el intervalo

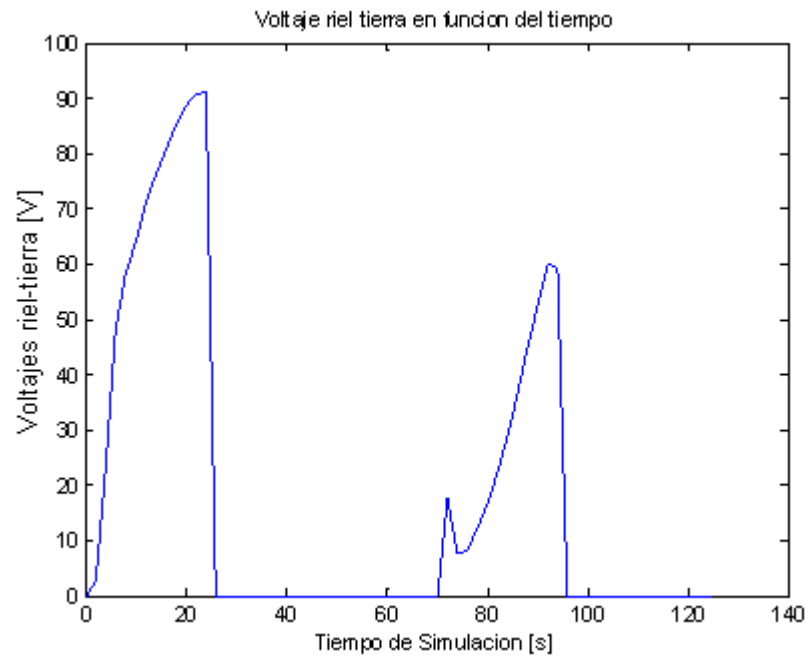


Figura B.12: Voltaje riel-tierra a 900 [V] y cuatro trenes en el intervalo

ANEXO C

VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LÍNEA

A continuación se podrá ver los valores de las variables estudiadas, en función de variaciones a los parámetros de la línea considerados en la simulación, vale decir, resistencia de rieles, de barras, resistencia de fuga y resistencia longitudinal del terreno.

C.1 Variación de la resistencia de fuga

El valor en condiciones normales es de 400 [Ω], por tanto, se han considerado una variación de ± 200 [Ω].

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	> Rf	< Rf	Caso Base	> Rf	< Rf
0	0	0	0	0	0	0
2	0.0011536	0.00078014	0.0022205	0.75098	0.76181	0.72279
4	0.0057489	0.0039101	0.010942	8.8763	9.0558	8.4471
6	0.011219	0.0076902	0.021124	27.509	28.284	25.897
8	0.011615	0.0080634	0.021512	38.166	39.745	35.343
10	0.011367	0.0080331	0.020597	45.705	48.452	41.409
12	0.011343	0.008204	0.019994	52.631	57.1	46.385
14	0.01128	0.008398	0.019229	58.521	65.353	49.879
16	0.011013	0.0084824	0.018063	62.662	72.397	51.389
18	0.01085	0.0086676	0.017074	66.704	79.933	52.485
20	0.010668	0.0088325	0.016115	69.982	86.912	52.858
22	0.010397	0.0088311	0.015202	72.018	91.76	52.652
24	0.010138	0.0085656	0.014705	72.503	91.891	52.586

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes _{riel-tierra} [V]		
	Caso Base	> Rf	< Rf	Caso Base	> Rf	< Rf
26	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes _{riel-tierra} [V]		
	Caso Base	> Rf	< Rf	Caso Base	> Rf	< Rf
66	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
72	0.039994	0.031775	0.15932	13.718	16.348	27.323
74	0.0057676	0.0045164	0.018766	6.2175	7.3031	10.115
76	0.0033072	0.0025105	0.0075127	6.6441	7.5653	7.5465
78	0.0033159	0.0025245	0.0062724	9.5431	10.898	9.026
80	0.0037248	0.002894	0.006699	13.666	15.927	12.289
82	0.0042211	0.0033741	0.0076114	18.324	21.97	16.52
84	0.0047813	0.0039559	0.0088877	23.529	29.201	21.868
86	0.0054064	0.0046576	0.010615	29.438	38.041	28.899
88	0.0060841	0.0054907	0.012979	36.048	48.799	38.45
90	0.0067552	0.0064322	0.016225	42.963	61.363	51.595
92	0.0072223	0.0073412	0.020518	48.744	74.318	69.239
94	0.0067669	0.0075333	0.024823	47.835	79.879	87.735
96	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0	0

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes _{riel-tierra} [V]		
	Caso Base	> Rf	< Rf	Caso Base	> Rf	< Rf
106	0	0	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0
116	0	0	0	0	0	0
118	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
122	0	0	0	0	0	0
124	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0

Tabla C.1: Valores obtenidos para las variables del sistema, cuando varía la resistencia de fuga.

Quando disminuye la resistencia de fuga, la grafica de las variables son las siguientes:

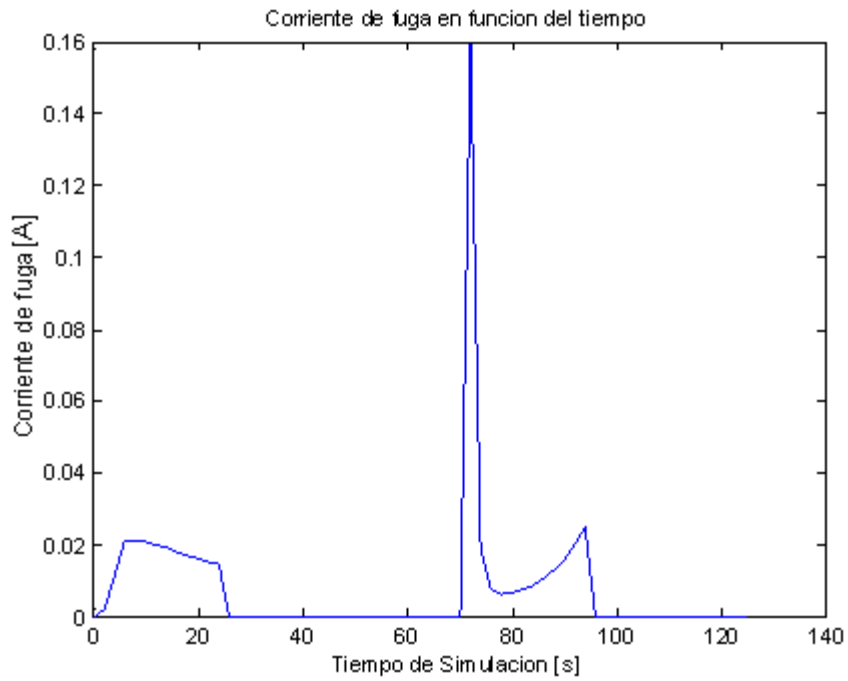


Figura C.1: Corriente de fuga cuando $R_f = 200 \text{ } [\Omega]$

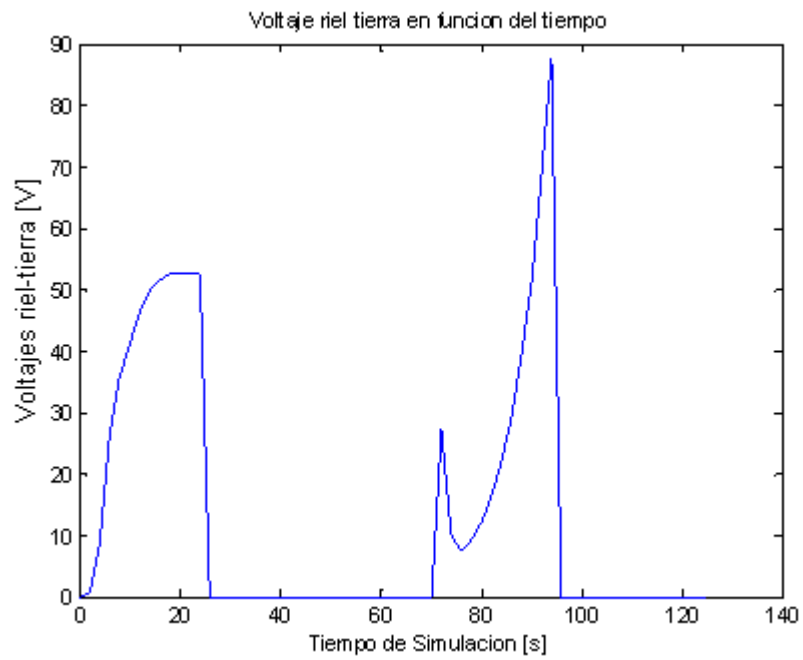


Figura C.2: Voltaje riel-tierra cuando $R_f = 200 \text{ } [\Omega]$

En cambio, si la resistencia de fuga aumenta su valor, las gráficas vistas serán las siguientes:

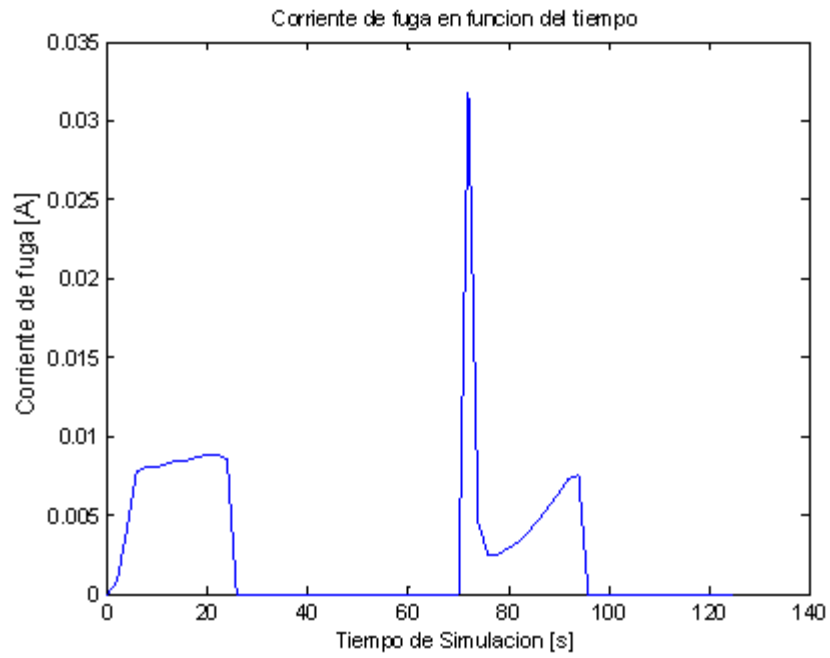


Figura C.3: Corriente de fuga para $R_f = 400 \text{ } [\Omega]$

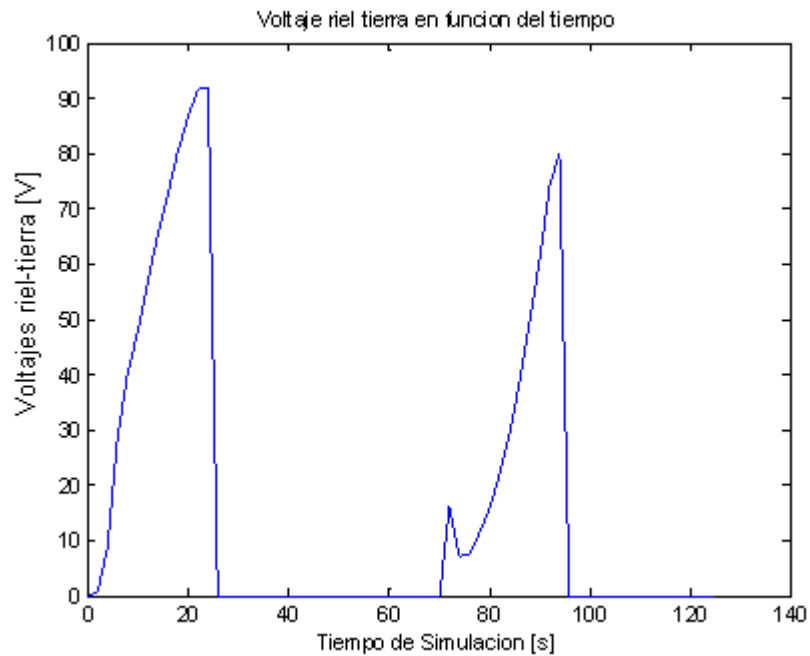


Figura C.4: Voltaje riel-tierra para $R_f = 400 \text{ } [\Omega]$

C.2 Variación de la resistencia longitudinal del terreno

En cambio, si varía la resistividad del terreno, como efecto de alguna condición ambiental o generada por acción humana, se pueden obtener las siguientes variaciones en las

variables de interés. Se considero una variación de $\pm 10 [\Omega]$ en torno a su valor inicial.

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	>rt	<rt	Caso Base	>rt	<rt
0	0	0	0	0	0	0
2	0.0011536	0.0011312	0.0011804	0.75098	0.73642	0.76844
4	0.0057489	0.0056033	0.0059454	8.8763	8.6514	9.1797
6	0.011219	0.010866	0.011792	27.509	26.643	28.914
8	0.011615	0.011139	0.012541	38.166	36.604	41.209
10	0.011367	0.010758	0.012745	45.705	43.259	51.247
12	0.011343	0.010556	0.013351	52.631	48.982	61.948
14	0.01128	0.010283	0.014099	58.521	53.348	73.148
16	0.011013	0.0098003	0.014757	62.662	55.763	83.967
18	0.01085	0.0094081	0.015644	66.704	57.841	96.177
20	0.010668	0.0090174	0.016504	69.982	59.154	108.27
22	0.010397	0.0086196	0.016899	72.018	59.708	117.06
24	0.010138	0.0083947	0.016272	72.503	60.039	116.38
26	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	>rt	<rt	Caso Base	>rt	<rt
38	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
72	0.039994	0.04549	0.062352	13.718	15.603	21.387
74	0.0057676	0.0058694	0.0084538	6.2175	6.3273	9.1132
76	0.0033072	0.0026402	0.004286	6.6441	5.3041	8.6106

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	>rt	<rt	Caso Base	>rt	<rt
78	0.0033159	0.0020255	0.0041674	9.5431	5.8293	11.994
80	0.0037248	0.0015668	0.0047793	13.666	5.7486	17.535
82	0.0042211	0.00076283	0.005637	18.324	3.3115	24.47
84	0.0047813	-0.0006748	0.0067128	23.529	-3.3204	33.034
86	0.0054064	-0.0031234	0.008041	29.438	-17.007	43.783
88	0.0060841	-0.0071445	0.0096492	36.048	-42.331	57.172
90	0.0067552	-0.013562	0.011504	42.963	-86.252	73.168
92	0.0072223	-0.023462	0.013364	48.744	-158.34	90.196
94	0.0067669	-0.036658	0.013972	47.835	-259.14	98.765
96	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0	0
106	0	0	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0
116	0	0	0	0	0	0

Tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes _{riel-tierra} [V]		
	Caso Base	>rt	<rt	Caso Base	>rt	<rt
118	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
122	0	0	0	0	0	0
124	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0

Tabla C.2: Valores obtenidos para las variables del sistema, cuando varía la resistencia longitudinal del terreno

Entonces, cuando aumenta el valor de la resistencia longitudinal del terreno, se tiene que los valores de corriente de fuga y voltaje riel-tierra se comportan de la siguiente forma:

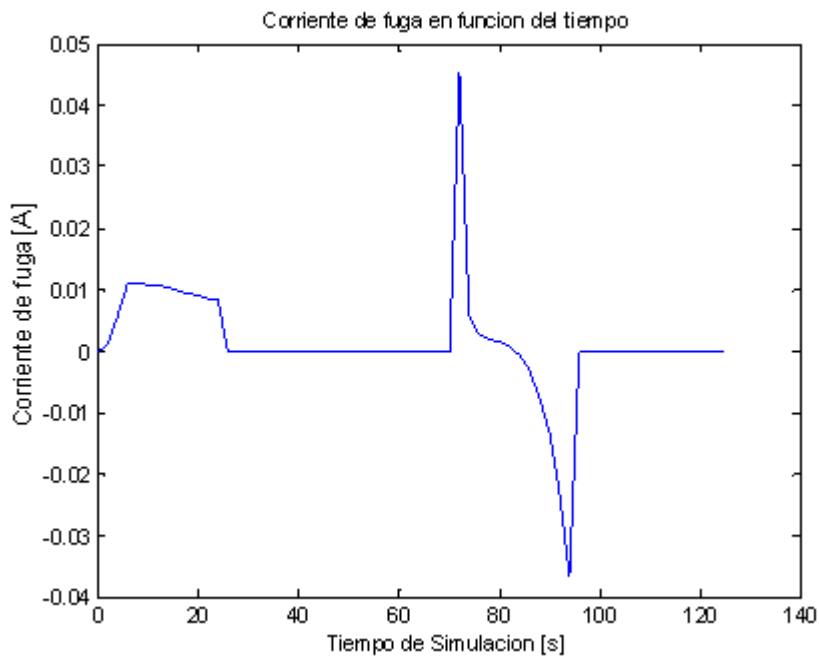


Figura C.5: Corriente de fuga cuando $rt = 30 [\Omega]$

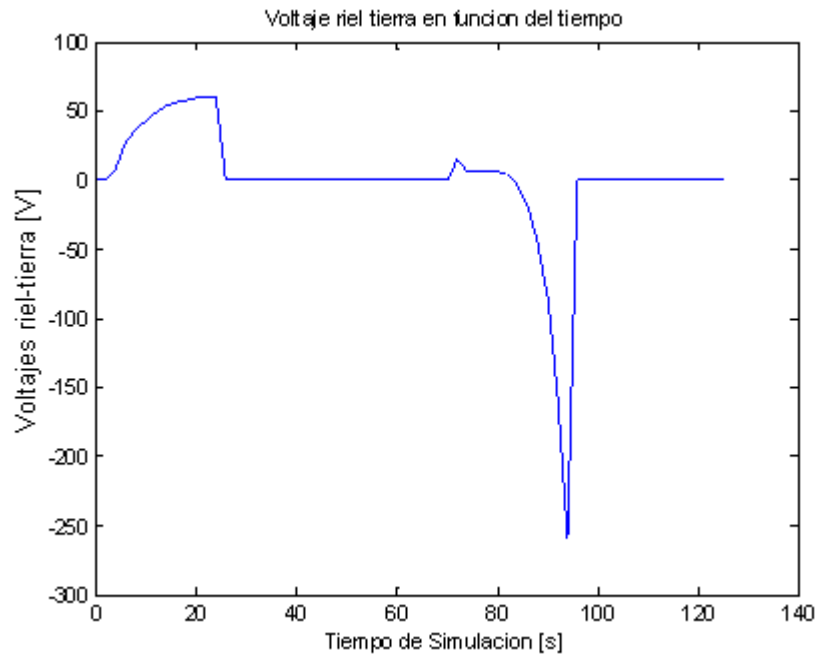


Figura C.6: Voltaje riel-tierra cuando $rt = 30 [\Omega]$

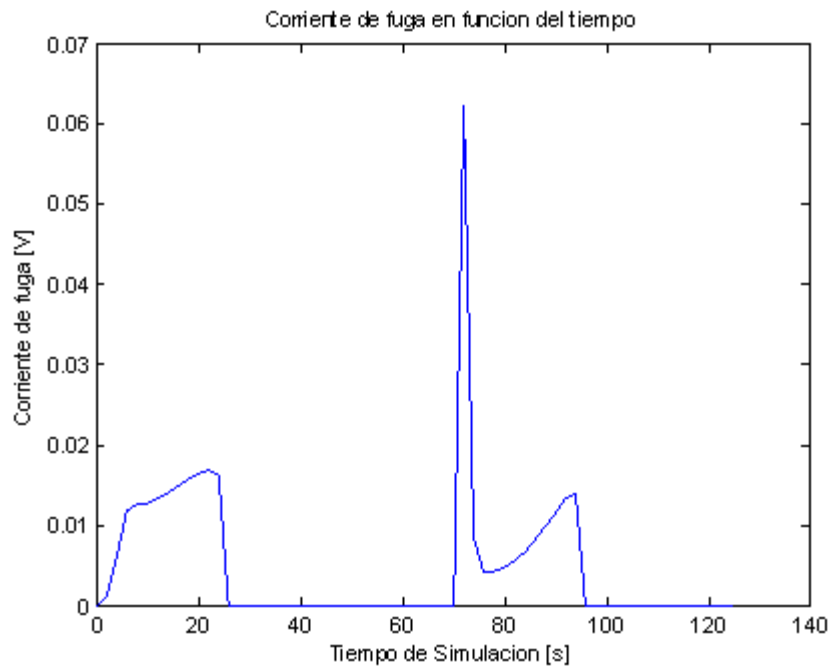


Figura C.7: Corriente de fuga cuando $rt = 10 [\Omega]$

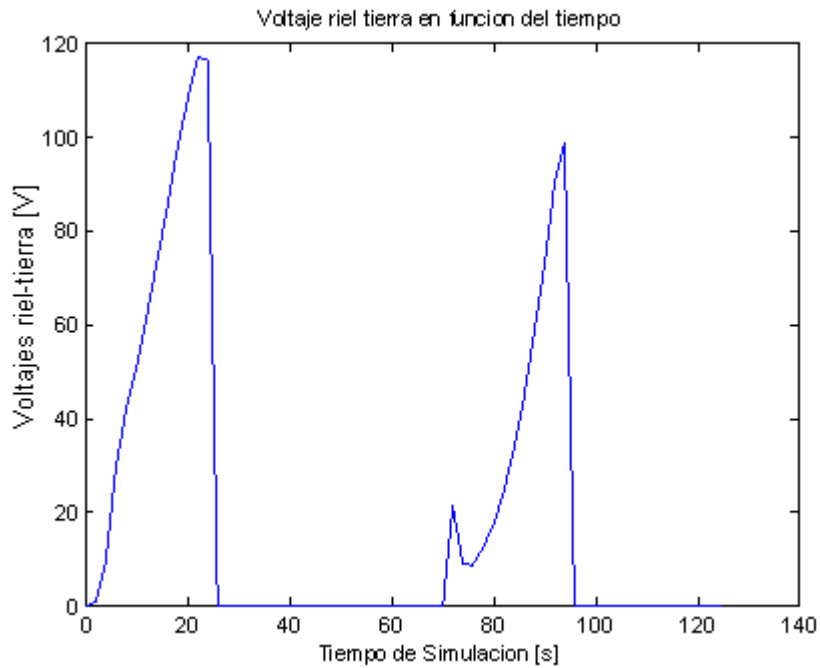


Figura C.8: Voltaje riel-tierra cuando $r_t = 10 [\Omega]$

C.3 Variaciones de la resistencia equivalente de las barras guías.

Ahora bien, las barras guías corresponden al positivo del circuito de alimentación de los trenes, si se considera la mitad y el doble de su valor en condición nominal, se obtienen los siguientes valores:

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	> r_b	< r_b	Caso Base	> r_b	< r_b
0	0	0	0	0	0	0
2	0.0011536	0.0011377	0.0011617	0.75098	0.74066	0.75625
4	0.0057489	0.0053196	0.0059906	8.8763	8.2134	9.2495
6	0.011219	0.0093607	0.012456	27.509	22.952	30.541
8	0.011615	0.009306	0.013259	38.166	30.58	43.571
10	0.011367	0.008911	0.013183	45.705	35.831	53.008
12	0.011343	0.008739	0.013329	52.631	40.549	61.846

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	>rb	<rb	Caso Base	>rb	<rb
14	0.01128	0.008584	0.013382	58.521	44.534	69.424
16	0.011013	0.0083442	0.013109	62.662	47.479	74.588
18	0.01085	0.0081957	0.012946	66.704	50.387	79.591
20	0.010668	0.0080462	0.012744	69.982	52.783	83.604
22	0.010397	0.0078278	0.012438	72.018	54.223	86.156
24	0.010138	0.0076224	0.01214	72.503	54.515	86.829
26	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	>rb	<rb	Caso Base	>rb	<rb
54	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
72	0.039994	0.030324	0.047581	13.718	10.401	16.32
74	0.0057676	0.0043269	0.0069197	6.2175	4.6644	7.4594
76	0.0033072	0.0024677	0.003985	6.6441	4.9576	8.0059
78	0.0033159	0.0024743	0.0039953	9.5431	7.1211	11.499
80	0.0037248	0.0027787	0.004489	13.666	10.195	16.47
82	0.0042211	0.0031471	0.0050895	18.324	13.662	22.094
9,8	0.0047813	0.0035639	0.0057661	23.529	17.538	28.375
86	0.0054064	0.0040316	0.0065177	29.438	21.952	35.489
88	0.0060841	0.0045392	0.0073319	36.048	26.895	43.441
90	0.0067552	0.0050425	0.0081371	42.963	32.071	51.752
92	0.0072223	0.0053945	0.0086955	48.744	36.407	58.686

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	>rb	<rb	Caso Base	>rb	<rb
94	0.0067669	0.0050596	0.0081403	47.835	35.766	57.544
96	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0	0
106	0	0	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0
116	0	0	0	0	0	0
118	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
122	0	0	0	0	0	0
124	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0

Tabla C.3: Valores obtenidos para las variables del sistema, cuando varía la resistencia de las barras guías

Por tanto las gráficas de las simulaciones son:

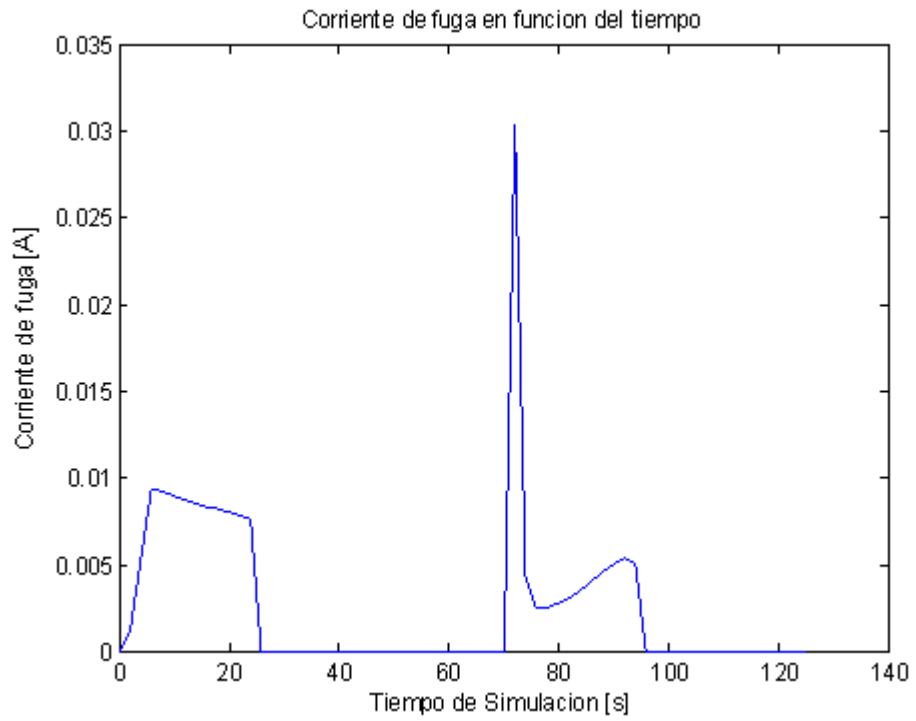


Figura C.9: Corriente de fuga para resistencia de barras al doble de su valor estimado

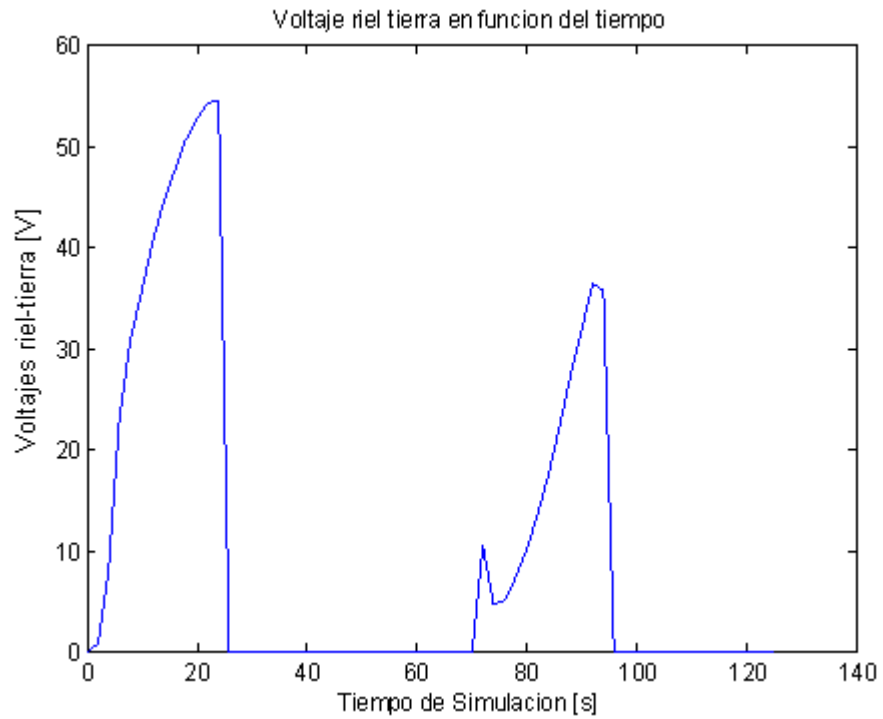


Figura C.10: Voltaje riel-tierra para resistencia barras guías al doble de su valor estimado

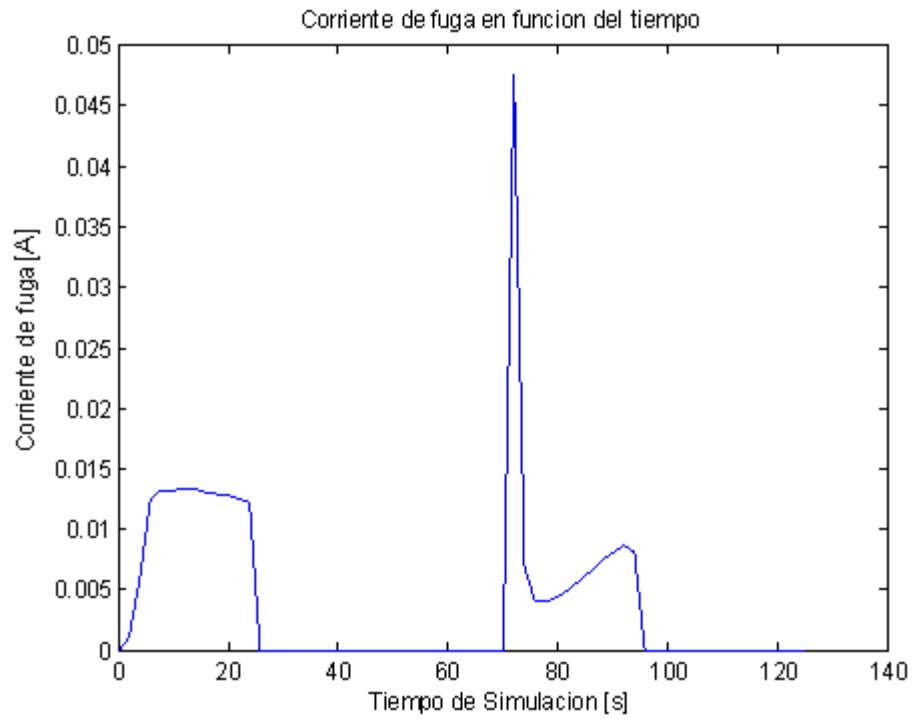


Figura C.11: Corriente de fuga para resistencia de barras a la mitad de su valor estimado

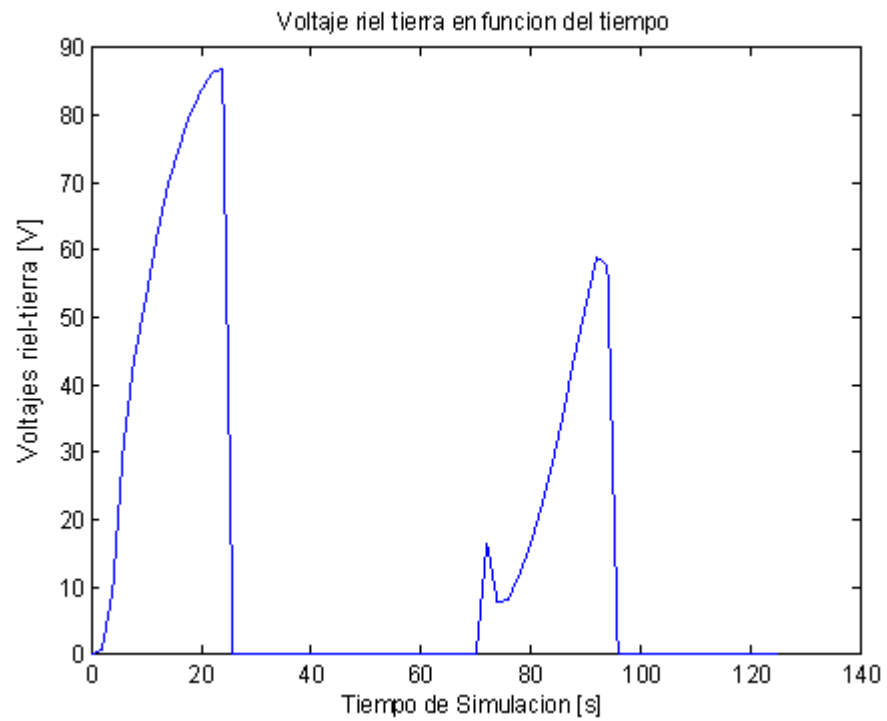


Figura C.12: Voltaje riel-tierra para resistencia barras guías a la mitad de su valor estimado

C.4 Variación de la resistencia de rieles

Se considerará el doble y la mitad del valor estimado, considerando la resistencia de las cajas inductivas, por tanto, los valores estimados para las variables son:

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	> rr	< rr	Caso Base	> rr	< rr
0	0	0	0	0	0	0
2	0.0011536	0.0022491	0.00058433	0.75098	1.4642	0.3804
4	0.0057489	0.010004	0.0031063	8.8763	15.447	4.7961
6	0.011219	0.016413	0.0068707	27.509	40.244	16.847
8	0.011615	0.015924	0.0075359	38.166	52.325	24.763
10	0.011367	0.015059	0.0076263	45.705	60.551	30.665
12	0.011343	0.014625	0.0078283	52.631	67.861	36.324
14	0.01128	0.014269	0.0079485	58.521	74.03	41.237
16	0.011013	0.013838	0.0078183	62.662	78.736	44.486
18	0.01085	0.013568	0.0077441	66.704	83.415	47.611
20	0.010668	0.013308	0.0076354	69.982	87.3	50.088
22	0.010397	0.012933	0.0074647	72.018	89.589	51.708
24	0.010138	0.012584	0.007296	72.503	90.004	52.181
26	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	> rr	< rr	Caso Base	> rr	< rr
36	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
72	0.039994	0.05035	0.028346	13.718	17.27	9.7227
74	0.0057676	0.0071411	0.0041657	6.2175	7.6981	4.4906

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	> rr	< rr	Caso Base	> rr	< rr
76	0.0033072	0.0040585	0.0024128	6.6441	8.1536	4.8473
78	0.0033159	0.0040683	0.0024193	9.5431	11.709	6.9629
80	0.0037248	0.0045675	0.0027192	13.666	16.758	9.9769
82	0.0042211	0.0051707	0.003085	18.324	22.446	13.392
84	0.0047813	0.0058537	0.0034963	23.529	28.806	17.205
86	0.0054064	0.0066217	0.0039508	29.438	36.055	21.512
88	0.0060841	0.0074548	0.0044429	36.048	44.17	26.324
90	0.0067552	0.0082805	0.0049293	42.963	52.664	31.351
92	0.0072223	0.0088563	0.0052659	48.744	59.771	35.54
94	0.0067669	0.0083044	0.0049265	47.835	58.704	34.826
96	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0	0
106	0	0	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0

tiempo [t]	Corrientes de fuga [A]			Voltajes riel-tierra [V]		
	Caso Base	> rr	< rr	Caso Base	> rr	< rr
116	0	0	0	0	0	0
118	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
122	0	0	0	0	0	0
124	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0

Tabla C.4: Valores de voltajes riel-tierra y Corrientes de fuga ante variaciones en la resistencia de los rieles

Lo que gráficamente es:

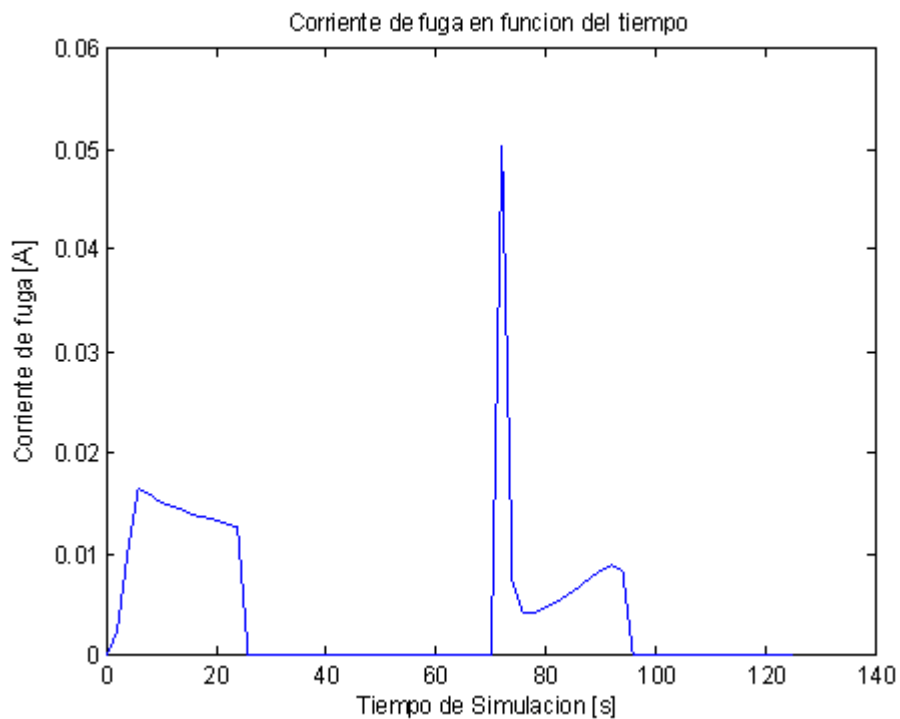


Figura C.13: Corriente de fuga para resistencia de rieles al doble de su valor estimado

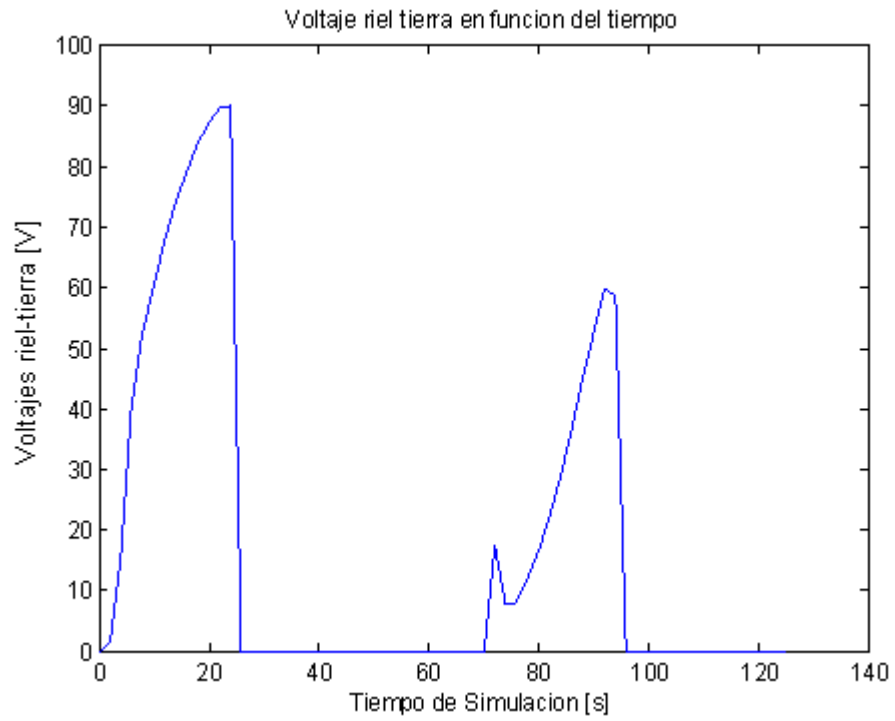


Figura C.14: Voltaje riel-tierra para resistencia rieles al doble de su valor estimado

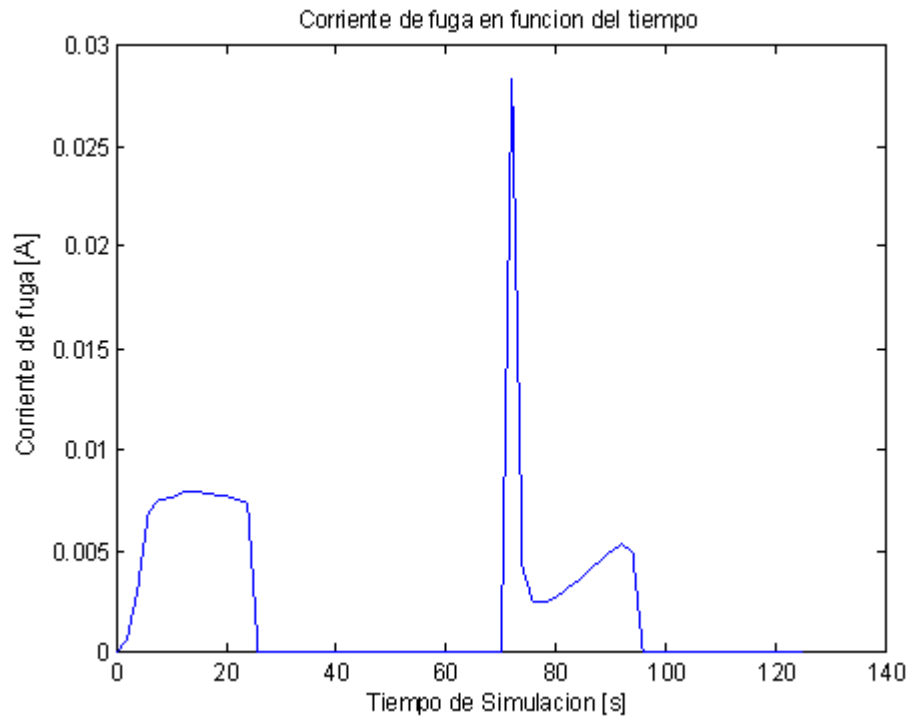


Figura C.15: Corriente de fuga para resistencia de rieles a la mitad de su valor estimado

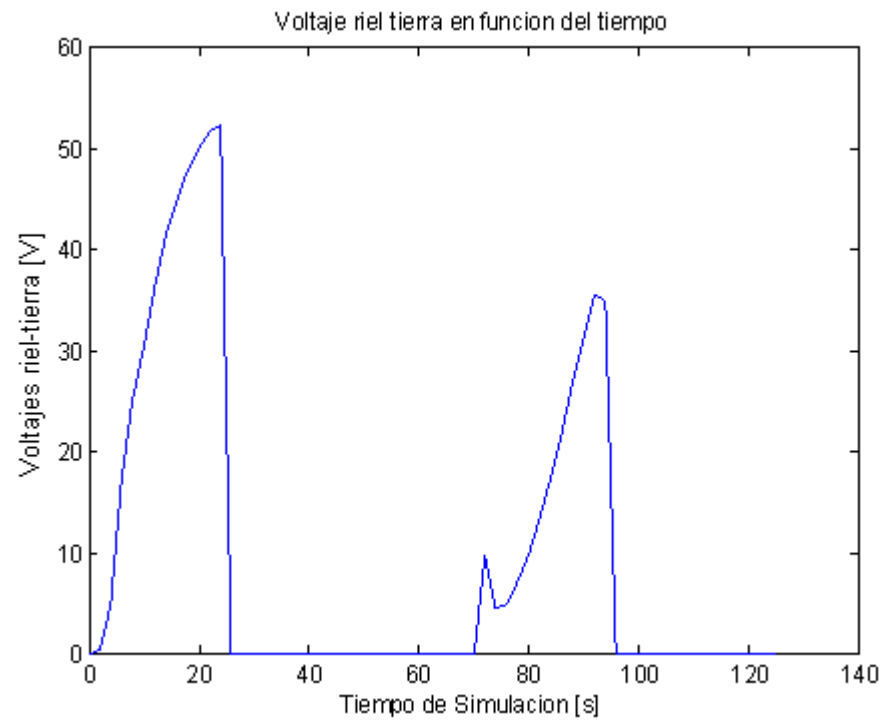


Figura C.16: Voltaje riel-tierra para resistencia rieles guías a la mitad de su valor estimado

ANEXO D

EFFECTOS DE LA CORRIENTE POR EL CUERPO HUMANO

La gravedad de las lesiones que recibe una persona, cuando se vuelve parte de un circuito eléctrico, está determinada por tres factores principales:

- Magnitud de la corriente que circula por el cuerpo.
- Trayectoria de la corriente por el cuerpo.
- Tiempo en que el cuerpo forma parte del circuito.

Ahora bien, para darnos una idea aproximada de los efectos de la corriente eléctrica al pasar por el cuerpo humano, incluimos a continuación una tabla que relaciona dichos efectos con la intensidad en “Miliamperes”.

MILIAMPERES	EFFECTOS DE LA CORRIENTE
0-1	Umbral de percepción
1-8	Sorpresa fuerte, sin perder control muscular
9-15	Reacción Violenta, separándose del objeto
16-50	Paralización muscular, fuertes contracciones y dificultad para respirar
51-100	Puede causar fibrilación ventricular.
101-200	FATAL, siempre con fibrilación ventricular
201 o más	Fuertes contracciones que oprimen el corazón

Tabla D.1: Efectos de la corriente de acuerdo a la corriente circulante.

De esta tabla, se puede deducir que existe una diferencia de sólo 100 Miliamperes entre una corriente que puede ser sentida y una que puede ser **FATAL**. En los circuitos de bajo voltaje, si la persona no puede soltarse o no es rescatada, la proporción en intensidad de corriente entre una que apenas puede sentirse y una peligrosa, puede llegar a ser hasta de uno a cinco. Este factor siempre debe recordarse con respecto a las partes vivas de los circuitos de bajo voltaje, ya que la diferencia de resistencia entre una piel seca y una piel mojada por agua o

sudor, tendrá una variante mucho mayor que de uno a cinco. Además en un accidente por bajo voltaje existen muchas más posibilidades de fibrilación ventricular, en la que como se sabe, existe un 99% de posibilidad de muerte.

Por otra parte, accidentes en alto voltaje causan por lo general, parálisis del centro respiratorio y muchas víctimas se salvan mediante la aplicación de respiración artificial.

La cantidad de corriente que fluye por el cuerpo está determinada por la resistencia de éste (especialmente la de la piel en el punto de entrada y salida) y el grado en que el cuerpo está aislado de corriente.

Cuando la piel está seca, puede presentar resistencia hasta de 600.000 Ohms, dependiendo del grueso de la misma y de otros factores personales. La humedad de la piel varía dentro de amplios límites, dependiendo dicha variación de las condiciones de temperatura del centro laboral, lo que determinará la cantidad de transpiración producida. En estos casos la resistencia de la piel al paso de la corriente eléctrica baja radicalmente hasta una cifra aproximada de mil Ohms (1.000 Ohms). Por otra parte, si se trabaja en superficies húmedas o si existe una herida en la piel, la resistencia puede bajar en algunos casos a unos pocos cientos de Ohms.

Ahora bien, con respecto a la trayectoria de la corriente a través del cuerpo, las lesiones dependen si la corriente pasa a través de órganos vitales particularmente corazón y pulmones. Por otra parte, el tiempo en que el cuerpo permanece conectado a un circuito también es importante, motivando la gravedad de las quemaduras. Estas acaban con la resistencia de la piel y entre más grave sea la quemadura mayor será el amperaje y más severos el golpe eléctrico, ya que la resistencia disminuye al deteriorarse ésta.

Para el caso de los ejemplos que veremos a continuación, tomaremos dos valores promedio de resistencia de la piel, uno para Piel Húmeda y otro para Piel Seca:

RESISTENCIA MEDIA PIEL HUMEDA.....11.000 Ohms.

RESISTENCIA MEDIA PIEL SECA.....330.000 Ohms.

Vamos a suponer un caso frecuente en que una persona con las manos transpiradas, entra en contacto con un circuito de 220 volts. En este caso y aplicando la ley de Ohm, tendríamos:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{11000} = 0,02 \text{ Amperes} = 20 \text{ Miliamperes}$$

Según nuestra tabla, en este caso estaríamos en presencia de un accidente que provocaría fuertes contracciones y dificultad respiratoria, pudiendo agravarse esto de acuerdo a la naturaleza del contacto. Ahora bien, tomando el mismo caso pero con piel seca tendríamos:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{330.000} = 0,0066 \text{ Amp.} = 0.66 \text{ Miliamperes}$$

Este contacto y la corriente circulante correspondiente cae dentro del umbral de percepción y por lo tanto no traería mayores consecuencias. En todo caso es conveniente dejar claramente establecido que: NO HAY VOLTAJE QUE NO SEA PELIGROSO, ya que la acción de la corriente sólo va a depender del contacto que se establezca y de las características del medio donde se produce el accidente [15].

ANEXO E

RESULTADOS DE SIMULACIÓN LINEA 5

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el caso modelado de la Línea 5, principal objeto del presente trabajo, se podrán ver los valores entre las Subestaciones de Rectificación correspondientes.

E.1 Intervalo SE/ R Santa Ana – Plaza de Armas.

T [s]	D [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
0	0.0	0	0	0
2	30.0	0	0	0
4	59.4	0	0	0
6	88.2	0	0	0
8	116.5	0	0	0
10	144.1	0	0	0
12	171.2	0	0	0
14	197.7	0	0	0
16	223.7	0	0	0
18	246.9	0	0	0
20	265.4	0	0	0
22	279.1	0	0	0
24	288.0	0	0	0
26	292.1	0	0	0
28	292.5	0.40302	69.118	7.74E-05

t [s]	D [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
30	295.5	0.043352	23.367	8.32E-06
32	303.3	0.012017	12.071	2.31E-06
34	315.6	0.007148	10.286	1.37E-06
36	332.1	0.0065826	12.076	1.26E-06
38	352.3	0.0070294	15.257	1.35E-06
40	375.5	0.0077284	19.016	1.48E-06
42	401.5	0.0084685	23.055	1.63E-06
44	430.0	0.0092392	27.371	1.77E-06
46	460.7	0.010034	31.909	1.93E-06
48	493.6	0.01076	36.309	2.07E-06
50	528.2	0.011093	39.207	2.13E-06
52	564.3	0	0	0
54	600.0	0	0	0
56	635.1	0	0	0
58	669.6	0	0	0
60	703.6	0	0	0
62	736.9	0	0	0
64	769.6	0	0	0
66	801.8	0	0	0
68	833.3	0	0	0
70	864.2	0	0	0

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
72	894.5	0	0	0
74	924.2	0	0	0
76	953.3	0	0	0
78	981.9	0	0	0
80	1,009.8	0	0	0
82	1,037.1	0	0	0
84	1,063.9	0	0	0
86	1,090.2	0	0	0
88	1,115.3	0	0	0
90	1,136.2	0	0	0
92	1,152.3	0	0	0
94	1,163.6	0	0	0
96	1,170.0	0	0	0
98	1,171.7	0	0	0
100	1,172.9	0.060006	19.532	1.15E-05
102	1,178.2	0.013765	10.627	2.64E-06
104	1,188.3	0.0093713	11.489	1.80E-06
106	1,202.8	0.0092448	15.189	1.78E-06
108	1,221.2	0.010009	20.122	1.92E-06
110	1,243.0	0.011135	25.834	2.14E-06
112	1,267.6	0.012644	32.798	2.43E-06

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
114	1,294.8	0.014458	41.132	2.78E-06
116	1,324.5	0.016664	51.224	3.20E-06
118	1,356.3	0.01923	63.074	3.69E-06
120	1,390.1	0.021024	72.817	4.04E-06
122	1,425.6	0.019455	69.572	3.74E-06
124	1,461.6	0	0	0
126	1,497.0	0	0	0
128	1,531.9	0	0	0
130	1,566.1	0	0	0

Tabla E.1: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Santa Ana – Plaza de Armas

E.2 Intervalo SE/ R Plaza de Armas – Baquedano.

T [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
0	0	0	0	0
2	33.03	0	0	0
4	65.46	0	0	0
6	97.28	0	0	0
8	128.5	0	0	0
10	159.12	0	0	0
12	189.14	0	0	0

t [s]	d [m]	I _{fuga} [A]	V _{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
14	218.55	0	0	0
16	247.36	0	0	0
18	275.58	0	0	0
20	303.22	0	0	0
22	330.3	0	0	0
24	356.82	0	0	0
26	382.78	0	0	0
28	406.06	0	0	0
30	424.54	0	0	0
32	438.22	0	0	0
34	447.1	0	0	0
36	451.18	0	0	0
38	451.66	0.28375	48.664	5.45E-05
40	454.61	0.030793	16.598	5.91E-06
42	462.44	0.0092424	9.284	1.77E-06
44	474.7	0.0060485	8.7037	1.16E-06
46	491.22	0.005823	10.682	1.12E-06
48	511.39	0.0063132	13.703	1.21E-06
50	534.63	0.0070304	17.298	1.35E-06
52	560.6	0.007851	21.374	1.51E-06
54	589.08	0.008778	26.005	1.69E-06

t [s]	d [m]	I _{fuga} [A]	V _{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
56	619.85	0.0098169	31.218	1.88E-06
58	652.68	0.010877	36.705	2.09E-06
60	687.34	0.011476	40.563	2.20E-06
62	723.37	0	0	0
64	759.1	0	0	0
66	794.23	0	0	0
68	828.76	0	0	0
70	862.69	0	0	0
72	896.02	0	0	0
74	928.75	0	0	0
76	960.88	0	0	0
78	992.39	0	0	0
80	1023.3	0	0	0
82	1053.6	0	0	0
84	1083.3	0	0	0
86	1112.5	0	0	0
88	1141	0	0	0
90	1168.9	0	0	0
92	1196.3	0	0	0
94	1223.1	0	0	0
96	1249.3	0	0	0

t [s]	d [m]	I _{fuga} [A]	V _{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
98	1274.5	0	0	0
100	1295.3	0	0	0
102	1311.4	0	0	0
104	1322.7	0	0	0
106	1329.2	0	0	0
108	1330.8	0	0	0
110	1332	0.054972	17.893	1.06E-05
112	1337.4	0.015707	12.126	3.02E-06
114	1347.5	0.012861	15.768	2.47E-06
116	1361.9	0.01318	21.654	2.53E-06
118	1380.3	0.013848	27.841	2.66E-06
120	1402.1	0.014234	33.022	2.73E-06
122	1426.7	0.013853	35.935	2.66E-06
124	1454	0.013853	39.412	2.66E-06
126	1483.6	0.013853	42.585	2.66E-06
128	1515.4	0.013853	45.438	2.66E-06
130	1549.2	0	0	0

Tabla E.2: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Plaza de Armas - Baquedano

E.3 Intervalo SE/ R Baquedano – Santa Isabel.

t [s]	d [m]	I _{fuga} [A]	V _{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
0	0	0	0	0
2	35.73	0	0	0
4	70.86	0	0	0
6	105.39	0	0	0
8	139.32	0	0	0
10	172.65	0	0	0
12	205.38	0	0	0
14	237.51	0	0	0
16	269.02	0	0	0
18	299.95	0	0	0
20	330.26	0	0	0
22	359.98	0	0	0
24	389.09	0	0	0
26	417.61	0	0	0
28	445.53	0	0	0
30	472.89	0	0	0
32	499.69	0	0	0
34	525.93	0	0	0
36	551.08	0	0	0
38	571.96	0	0	0

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
40	588.04	0	0	0
42	599.32	0	0	0
44	605.8	0	0	0
46	607.48	0	0	0
48	608.65	0.10774	35.069	2.07E-05
50	613.99	0.018366	14.179	3.53E-06
52	624.09	0.0079855	9.7902	1.53E-06
54	638.51	0.0061652	10.129	1.18E-06
56	656.95	0.006164	12.393	1.18E-06
58	678.72	0.0067259	15.604	1.29E-06
60	703.35	0.007569	19.634	1.45E-06
62	730.6	0.0085954	24.454	1.65E-06
64	760.25	0.0098511	30.282	1.89E-06
66	792.08	0.011349	37.225	2.18E-06
68	825.85	0.012757	44.182	2.45E-06
70	861.35	0.013448	48.089	2.58E-06
72	897.37	0	0	0
74	932.8	0	0	0
76	967.63	0	0	0
78	1001.9	0	0	0
80	1035.5	0	0	0

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
82	1068.5	0	0	0
84	1101	0	0	0
86	1132.8	0	0	0
88	1164	0	0	0
90	1194.6	0	0	0
92	1224.6	0	0	0
94	1254	0	0	0
96	1282.8	0	0	0
98	1311.1	0	0	0
100	1338.7	0	0	0
102	1365.8	0	0	0
104	1392.3	0	0	0
106	1418.3	0	0	0
108	1441.6	0	0	0
110	1460	0	0	0
112	1473.7	0	0	0
114	1482.6	0	0	0
116	1486.7	0	0	0
118	1487.1	0.098354	16.868	1.89E-05
120	1490.1	0.022248	11.992	4.27E-06
122	1497.9	0.01856	18.643	3.56E-06

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
124	1510.2	0.01856	26.707	3.56E-06
126	1526.7	0.01856	34.048	3.56E-06
128	1546.9	0.01856	40.284	3.56E-06
130	1570.1	0	0	0

Tabla E.3: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Baquedano – Santa Isabel.

E.4 Intervalo SE/ R Santa Isabel – San Eugenio.

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
0	0	0	0	0
2	29.65	0.012822	39.414	2.46E-06
4	61.48	0.017062	55.964	3.28E-06
6	95.25	0.017941	62.138	3.44E-06
8	130.75	0.017877	63.928	3.43E-06
10	166.77	0	0	0
12	202.2	0	0	0
14	237.03	0	0	0
16	271.26	0	0	0
18	304.89	0	0	0
20	337.92	0	0	0
22	370.35	0	0	0

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
24	402.17	0	0	0
26	433.39	0	0	0
28	464.01	0	0	0
30	494.03	0	0	0
32	523.44	0	0	0
34	552.25	0	0	0
36	580.47	0	0	0
38	608.11	0	0	0
40	635.19	0	0	0
42	661.71	0	0	0
44	687.67	0	0	0
46	710.95	0	0	0
48	729.43	0	0	0
50	743.11	0	0	0
52	751.99	0	0	0
54	756.07	0	0	0
56	756.55	0.18349	31.468	3.52E-05
58	759.5	0.020887	11.258	4.01E-06
60	767.33	0.0075615	7.5955	1.45E-06
62	779.59	0.0058611	8.4341	1.13E-06
64	796.11	0.0060526	11.103	1.16E-06

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
66	816.28	0.0067348	14.618	1.29E-06
68	839.52	0.0076816	18.901	1.47E-06
70	865.49	0.0088922	24.209	1.71E-06
72	893.97	0.010447	30.949	2.01E-06
74	924.74	0.012443	39.569	2.39E-06
76	957.57	0.014872	50.185	2.86E-06
78	992.23	0.016901	59.736	3.25E-06
80	1028.3	0	0	0
82	1064	0	0	0
84	1099.1	0	0	0
86	1133.7	0	0	0
88	1167.6	0	0	0
90	1200.9	0	0	0
92	1233.6	0	0	0
94	1265.8	0	0	0
96	1297.3	0	0	0
98	1328.2	0	0	0
100	1358.5	0	0	0
102	1388.2	0	0	0
104	1417.3	0	0	0
106	1445.9	0	0	0

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
108	1473.8	0	0	0
110	1501.2	0	0	0
112	1527.9	0	0	0
114	1554.2	0	0	0
116	1579.3	0	0	0

Tabla E.4: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Santa Isabel – San Eugenio

E.5 Intervalo SE/ R San Eugenio - Valdovinos.

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
0	0	0	0	0
2	20.88	0	0	0
4	36.96	0	0	0
6	48.24	0	0	0
8	54.72	0	0	0
10	56.4	0	0	0
12	57.57	-0.017326	-5.6397	-3.33E-06
14	62.91	0.0019866	1.5336	3.81E-07
16	73.01	0.0077808	9.5393	1.49E-06
18	87.43	0.010442	17.156	2.00E-06
20	105.87	0.01197	24.066	2.30E-06

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
22	127.64	0.013064	30.309	2.51E-06
24	152.27	0.013722	35.594	2.63E-06
26	179.52	0.013895	39.53	2.67E-06
28	209.17	0.013946	42.871	2.68E-06
30	241	0.013857	45.452	2.66E-06
32	274.77	0.013618	47.165	2.61E-06
34	310.27	0.013477	48.194	2.59E-06
36	346.29	0	0	0
38	381.72	0	0	0
40	416.55	0	0	0
42	450.78	0	0	0
44	484.41	0	0	0
46	517.44	0	0	0
48	549.87	0	0	0
50	581.69	0	0	0
52	612.91	0	0	0
54	643.53	0	0	0
56	673.55	0	0	0
58	702.96	0	0	0
60	731.77	0	0	0
62	759.99	0	0	0

t [s]	d [m]	I _{fuga} [A]	V _{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
64	787.63	0	0	0
66	814.71	0	0	0
68	841.23	0	0	0
70	867.19	0	0	0
72	890.47	0	0	0
74	908.95	0	0	0
76	922.63	0	0	0
78	931.51	0	0	0
80	935.59	0	0	0
82	936.07	0.15017	25.754	2.88E-05
84	939.02	0.018072	9.7408	3.47E-06
86	946.85	0.0076135	7.6477	1.46E-06
88	959.11	0.0065143	9.3741	1.25E-06
90	975.63	0.0069509	12.752	1.33E-06
92	995.8	0.0078	16.93	1.50E-06
94	1019	0.0089403	21.998	1.72E-06
96	1045	0.010428	28.391	2.00E-06
98	1073.5	0.012387	36.697	2.38E-06
100	1104.3	0.014963	47.584	2.87E-06
102	1137.1	0.018172	61.322	3.49E-06
104	1171.8	0.020853	73.703	4.00E-06

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
106	1207.8	0	0	0
108	1243.5	0	0	0
110	1278.6	0	0	0
112	1313.2	0	0	0
114	1347.1	0	0	0
116	1380.4	0	0	0
118	1413.2	0	0	0
120	1445.3	0	0	0
122	1476.8	0	0	0
124	1507.7	0	0	0
126	1538	0	0	0
128	1567.8	0	0	0

Tabla E.5: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R San Eugenio - Valdovinos

E.6 Intervalo SE/ R Valdovinos - Pedreros.

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
0	0	0	0	0
2	27.92	0	0	0
4	55.28	0	0	0
6	82.08	0	0	0

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
8	108.32	0	0	0
10	133.47	0	0	0
12	154.35	0	0	0
14	170.43	0	0	0
16	181.71	0	0	0
18	188.19	0	0	0
20	189.87	0	0	0
22	191.04	-10.271	-3343.1	-0.0019719
24	196.38	-1.5007	-1158.5	-0.00028813
26	206.48	-0.39129	-479.72	-7.51E-05
28	220.9	-0.12388	-203.54	-2.38E-05
30	239.34	-0.043072	-86.596	-8.27E-06
32	261.11	-0.013661	-31.695	-2.62E-06
34	285.74	-0.00089275	-2.3158	-1.71E-07
36	312.99	0.0052908	15.052	1.02E-06
38	342.64	0.0085712	26.348	1.65E-06
40	374.47	0.010483	34.383	2.01E-06
42	408.24	0.011544	39.982	2.22E-06
44	443.74	0.012036	43.039	2.31E-06
46	479.76	0	0	0
48	515.19	0	0	0

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
50	550.02	0	0	0
52	584.25	0	0	0
54	617.88	0	0	0
56	650.91	0	0	0
58	683.34	0	0	0
60	715.16	0	0	0
62	746.38	0	0	0
64	777	0	0	0
66	807.02	0	0	0
68	836.43	0	0	0
70	865.24	0	0	0
72	893.46	0	0	0
74	921.1	0	0	0
76	948.18	0	0	0
78	974.7	0	0	0
80	1000.7	0	0	0
82	1023.9	0	0	0
84	1042.4	0	0	0
86	1056.1	0	0	0
88	1065	0	0	0
90	1069.1	0	0	0

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
92	1069.5	0.1349	23.135	2.59E-05
94	1072.5	0.017329	9.3405	3.33E-06
96	1080.3	0.0083882	8.4259	1.61E-06
98	1092.6	0.0076931	11.07	1.48E-06
100	1109.1	0.0083583	15.333	1.60E-06
102	1129.3	0.0093819	20.363	1.80E-06
104	1152.5	0.010702	26.333	2.05E-06
106	1178.5	0.012401	33.763	2.38E-06
108	1207	0.014614	43.294	2.81E-06
110	1237.7	0.017482	55.592	3.36E-06
112	1270.6	0.020955	70.712	4.02E-06
114	1305.2	0.023375	82.619	4.49E-06
116	1341.3	0	0	0
118	1377	0	0	0
120	1412.1	0	0	0
122	1446.6	0	0	0
124	1480.6	0	0	0
126	1513.9	0	0	0
128	1546.6	0	0	0

Tabla E.6: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Valdovinos – Pedreros.

E.7 Intervalo SE/ R Pedreros - Mirador.

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
0	0	0	0	0
2	30.93	0	0	0
4	61.24	0	0	0
6	90.96	0	0	0
8	120.07	0	0	0
10	148.59	0	0	0
12	176.51	0	0	0
14	203.87	0	0	0
16	230.67	0	0	0
18	256.91	0	0	0
20	282.06	0	0	0
22	302.94	0	0	0
24	319.02	0	0	0
26	330.3	0	0	0
28	336.78	0	0	0
30	338.46	0	0	0
32	339.63	0.17806	57.96	3.42E-05
34	344.97	0.028556	22.046	5.48E-06
36	355.07	0.010734	13.16	2.06E-06
38	369.49	0.0072405	11.896	1.39E-06

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
40	387.93	0.0068068	13.685	1.31E-06
42	409.7	0.00724	16.797	1.39E-06
44	434.33	0.0079574	20.642	1.53E-06
46	461.58	0.0087543	24.906	1.68E-06
48	491.23	0.0096523	29.671	1.85E-06
50	523.06	0.010617	34.824	2.04E-06
52	556.83	0.011424	39.567	2.19E-06
54	592.33	0.011811	42.237	2.27E-06
56	628.35	0	0	0
58	663.78	0	0	0
60	698.61	0	0	0
62	732.84	0	0	0
64	766.47	0	0	0
66	799.5	0	0	0
68	831.93	0	0	0
70	863.75	0	0	0
72	894.97	0	0	0
74	925.59	0	0	0
76	955.61	0	0	0
78	985.02	0	0	0
80	1013.8	0	0	0

t [s]	d [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
82	1042.1	0	0	0
84	1069.7	0	0	0
86	1096.8	0	0	0
88	1123.3	0	0	0
90	1149.2	0	0	0
92	1172.5	0	0	0
94	1191	0	0	0
96	1204.7	0	0	0
98	1213.6	0	0	0
100	1217.6	0	0	0
102	1218.1	0.1172	20.1	2.25E-05
104	1221.1	0.016688	8.9949	3.20E-06
106	1228.9	0.0096018	9.645	1.84E-06
108	1241.2	0.0093899	13.512	1.80E-06
110	1257.7	0.010284	18.865	1.97E-06
112	1277.9	0.011386	24.714	2.19E-06
114	1301.1	0.012644	31.111	2.43E-06
116	1327.1	0.014059	38.275	2.70E-06
118	1355.6	0.015586	46.173	2.99E-06
120	1386.3	0.017022	54.13	3.27E-06
122	1419.1	0.017658	59.588	3.39E-06

t [s]	D [m]	I_{fuga} [A]	V_{riel-tierra} [V]	Perdidas [gr]
124	1453.8	0.017658	62.413	3.39E-06
126	1489.8	0	0	0
128	1525.6	0	0	0
130	1560.7	0	0	0

Tabla E.7: Resultados de la modelación de línea 5 para intervalo entre SE/R Pedreros – Mirador