

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivo General . . . . .	2
1.2.1. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	3
1.4. Estructura de la memoria . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Definiciones . . . . .	5
2.1.1. Puesta a tierra . . . . .	5
2.1.2. Malla de tierra . . . . .	6
2.1.3. Resistividad . . . . .	6
2.2. Seguridad de las personas en instalaciones eléctricas . . . . .	6
2.2.1. Efectos de la corriente en el ser humano . . . . .	7
2.2.2. Impedancia del ser humano y resistencias de contacto . . . . .	8
2.2.3. Voltajes tolerables por el cuerpo humano . . . . .	9
2.2.4. Solicitaciones de voltaje para las personas en una instalación eléctrica	11
2.3. Principales factores para el diseño de una puesta a tierra . . . . .	12
2.3.1. Corriente residual dispersada . . . . .	12
2.3.2. Tiempo de duración de la falla residual . . . . .	13
2.3.3. Resistividad del terreno . . . . .	13
2.3.4. Características del conductor . . . . .	17
2.4. Cálculo de resistencia de puesta a tierra . . . . .	19
2.4.1. Resistencia propia de una barra en un terreno de dos estratos . . . . .	21
2.4.2. Resistencia propia de un conductor horizontal . . . . .	22
2.4.3. Resistencia mutua entre dos barras verticales paralelas . . . . .	22
2.4.4. Resistencia mutua entre una barra vertical y un conductor horizontal	23
2.4.5. Resistencia mutua entre dos conductores horizontales paralelos, ente-	
rrados a igual profundidad . . . . .	24
2.4.6. Resistencia mutua entre dos conductores horizontales ortogonales en-	
terrados a igual profundidad . . . . .	25
2.5. Cálculo solicitaciones de voltaje en puesta a tierra . . . . .	26
2.5.1. Determinación de las solicitaciones de voltaje . . . . .	27
2.5.2. Determinación de los potenciales sobre el terreno . . . . .	28
2.5.3. Potencial sobre la superficie del terreno en el contorno de una barra .	28

2.5.4. Potencial sobre la superficie del terreno inducido por un conductor horizontal . . . . .	30
<b>3. Antecedentes Caso de Estudio</b>	<b>32</b>
3.1. Descripción parque fotovoltaico Diego de Almagro . . . . .	32
3.2. Diagrama unilineal simplificado . . . . .	32
3.3. Plano de disposición general . . . . .	34
3.4. Sistema de puesta a tierra central Emelda . . . . .	35
3.5. Canalización del cableado . . . . .	36
3.5.1. Canalizaciones de baja tensión . . . . .	36
3.5.2. Canalizaciones de media tensión . . . . .	36
3.6. Estructuras de soporte de módulos fotovoltaicos . . . . .	37
<b>4. Metodología</b>	<b>38</b>
4.1. Procedimiento diseño de mallas de tierra para parques fotovoltaicos de grandes dimensiones . . . . .	38
4.2. Diagrama de bloques diseño malla de tierra de parques fotovoltaicos . . . . .	40
4.3. Estudio resistividad de suelo caso de estudio . . . . .	41
4.4. Determinación máxima corriente de falla residual . . . . .	46
4.4.1. Corriente de falla en sistemas de baja tensión . . . . .	47
4.4.2. Corriente de falla en sistema de media tensión . . . . .	48
4.4.3. Corriente de falla en sistema de alta tensión . . . . .	48
4.4.4. Estimación corriente asimétrica máxima de falla residual dispersada por la malla de tierra . . . . .	49
4.5. Dimensionamiento sección conductores de malla de tierra . . . . .	50
4.6. Estimación límites de sollicitación de voltaje . . . . .	52
4.7. Diseño inicial malla de tierra parque fotovoltaico . . . . .	53
4.8. Cálculo resistencia de malla de tierra . . . . .	54
4.8.1. Resistencia malla de tierra principal . . . . .	55
4.8.2. Resistencia malla de tierra centros de conversión . . . . .	56
4.8.3. Resistencia malla de sala eléctrica y sala de control . . . . .	58
4.8.4. Resistencia malla de tierra central térmica . . . . .	59
4.8.5. Resistencia malla de tierra subestación eléctrica Emelda . . . . .	59
4.8.6. Resistencia general parque fotovoltaico Diego de Almagro . . . . .	60
4.9. Corriente dispersada por elementos de puesta a tierra . . . . .	60
4.10. Determinación sollicitaciones de voltaje en la instalación . . . . .	61
4.11. Verificación criterios de seguridad . . . . .	62
4.12. Modificación del diseño inicial . . . . .	62

<b>5. Resultados</b>	<b>63</b>
5.1. Resistividad de suelo caso de estudio . . . . .	63
5.2. Estimación límites de sollicitación de voltaje . . . . .	64
5.2.1. Límites sollicitación de tensión instalaciones parque fotovoltaico . . . . .	64
5.2.2. Límites sollicitación de tensión subestación eléctrica Emelda . . . . .	65
5.2.3. Límites sollicitación de tensión cerco perimetral . . . . .	66
5.3. Resistencia de puesta a tierra . . . . .	67
5.3.1. Malla de tierra principal de media tensión . . . . .	67
5.3.2. Malla de tierra cabinas de conversión de subcampos . . . . .	69
5.3.3. Malla de tierra módulos fotovoltaicos de subcampos . . . . .	69
5.3.4. Malla de tierra sala eléctrica y sala de control . . . . .	70
5.3.5. Malla de tierra central termoeléctrica Emelda . . . . .	71
5.3.6. Puesta a tierra parque fotovoltaico Diego de Almagro . . . . .	72
5.4. Potencial inducido en la superficie del terreno . . . . .	73
5.4.1. Potencial inducido por malla de tierra principal . . . . .	73
5.4.2. Potencial inducido en cabina de conversión de subcampos . . . . .	73
5.4.3. Potencial inducido en subcampos . . . . .	74
5.4.4. Potencial inducido en sala eléctrica y sala de control . . . . .	75
5.4.5. Potencial inducido en central Emelda . . . . .	75
5.5. Sollicitaciones de tensión de contacto . . . . .	76
5.5.1. Tensión en cabina de conversión de subcampos . . . . .	76
5.5.2. Tensión de contacto en subcampos . . . . .	77
5.5.3. Tensión de contacto en sala eléctrica y sala de control . . . . .	78
5.5.4. Tensión de contacto en central termoeléctrica Emelda . . . . .	79
5.5.5. Tensión de contacto en subestación eléctrica Emelda . . . . .	79
5.5.6. Tensión de contacto en cerco perimetral . . . . .	80
5.6. Sollicitaciones de tensión de paso . . . . .	81
5.6.1. Tensión de paso en malla principal de media tensión . . . . .	81
5.6.2. Tensión de paso en subcampos . . . . .	82
5.6.3. Tensión de paso en sala eléctrica y sala de control . . . . .	83
5.6.4. Tensión de paso en central termoeléctrica Emelda . . . . .	83
5.7. Tiempos de ejecución rutinas de código . . . . .	84
<b>6. Análisis</b>	<b>85</b>
6.1. Análisis de Resultados . . . . .	85
6.1.1. Resistividad de suelo caso de estudio . . . . .	85
6.1.2. Estimación límites de sollicitación de voltaje . . . . .	86
6.1.3. Resistencia de puesta a tierra . . . . .	87

6.1.4.	Potencial inducido en la superficie del terreno . . . . .	88
6.1.5.	Solicitaciones de tensión de contacto . . . . .	89
6.1.6.	Solicitaciones de tensión de paso . . . . .	91
6.1.7.	Tiempos de ejecución rutinas de código implementadas en Matlab . .	92
6.2.	Análisis de Sensibilidad . . . . .	92
6.2.1.	Malla de tierra sin elementos auxiliares de parque fotovoltaico . . . .	92
6.2.2.	Puesta a tierra de parque fotovoltaico sin malla de interconexión . . .	94
6.2.3.	Puesta tierra de parque fotovoltaico independiente de malla de subes- tación eléctrica . . . . .	96
6.2.4.	Lazo en puesta a tierra de subcampos para mejorar solicitaciones de tensión . . . . .	98
6.3.	Análisis Económico . . . . .	99
6.3.1.	Diseño y análisis malla de tierra reticulada en subcampos . . . . .	100
6.3.2.	Costo de inversión mallas de tierra . . . . .	109
6.3.3.	Comparación económica . . . . .	112
<b>7.</b>	<b>Conclusión</b>	<b>114</b>
7.1.	Conclusiones generales . . . . .	114
7.2.	Conclusiones metodología aplicada . . . . .	115
7.3.	Conclusiones programa implementado . . . . .	116
7.4.	Conclusiones análisis de sensibilidad . . . . .	117
7.5.	Conclusión final . . . . .	118
<b>8.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>119</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo: Descripción del Programa Implementado</b>	<b>124</b>
A.1.	Módulo cálculo de resistencia y corrientes dispersadas por elementos . . . . .	124
A.1.1.	Métodos de cálculo . . . . .	124
A.1.2.	Diagrama de bloques . . . . .	127
A.1.3.	Revisión de resultados . . . . .	128
A.2.	Módulo cálculo de potencial inducido en la superficie . . . . .	129
A.2.1.	Métodos de cálculo . . . . .	129
A.2.2.	Diagrama de bloques . . . . .	129
A.2.3.	Revisión de resultados . . . . .	131
A.3.	Módulo cálculo solicitaciones de contacto . . . . .	132
A.3.1.	Métodos de cálculo . . . . .	132
A.3.2.	Diagrama de bloques . . . . .	132
A.3.3.	Revisión de resultados . . . . .	133

A.4. Módulo cálculo solicitaciones de paso . . . . .	134
A.4.1. Métodos de cálculo . . . . .	134
A.4.2. Diagrama de bloques . . . . .	134
A.4.3. Revisión de resultados . . . . .	135
<b>B. Anexo: Comparación de Resultados con Software Comercial</b>	<b>136</b>
<b>C. Anexo: Principales Códigos Programados en Matlab</b>	<b>140</b>
C.1. Resistividad caso de estudio . . . . .	140
C.2. Método de reducción de estratos propuesto por Yakobs . . . . .	141
C.3. Cálculo de resistencia de puesta a tierra de sub-mallas . . . . .	141
C.4. Cálculo general resistencia de puesta a tierra . . . . .	142
C.5. Cálculo de potencial inducido en el terreno . . . . .	143
C.6. Determinación de zonas de posible contacto . . . . .	144
C.7. Cálculo de solicitación de tensión de paso . . . . .	145

## Índice de tablas

2.1. Valores típicos de resistividad para diferentes tipos de suelos [1]. . . . .	14
2.2. Secciones nominales para conductores de puesta a tierra de servicio [2]. . . . .	18
2.3. Parámetros fórmula de Sverak [3], para algunos materiales conductores según [4]. . . . .	19
5.1. Resultados resistividad de suelo, caso de estudio. . . . .	64
5.2. Reducción según Yakobs de un sistema de $n = 4$ estratos a uno equivalente de 2 estratos, $S = 65$ [ha], $b = 1$ [m], según ecuaciones (2.11) - (2.18). . . . .	65
5.3. Reducción según Yakobs de un sistema de $n = 4$ estratos a uno equivalente de 2 estratos, $S = 0,28$ [ha], $b = 0,6$ [m], según ecuaciones (2.11) - (2.18). . . . .	66
5.4. Reducción según Yakobs de un sistema de $n = 4$ estratos a uno equivalente de 2 estratos, $S = 100$ [ha], $b = 1$ [m], según ecuaciones (2.11) - (2.18). . . . .	67
5.5. Resistencia de bloques puesta a tierra principal de media tensión. . . . .	68
5.6. Resistencia puesta a tierra de subcampos. . . . .	70
5.7. Especificaciones técnicas computador utilizado. . . . .	84
5.8. Tiempo de ejecución rutinas de código implementadas en Matlab, versión R2017b. . . . .	84
6.1. Resistencia y área de mallas reticuladas de subcampos, parque fotovoltaico Diego de Almagro. . . . .	104
6.2. Parámetros utilizados en función de costo malla de tierra. . . . .	110
6.3. Costo de inversión mallas de tierras, parque fotovoltaico Diego de Almagro. . . . .	111

B.1. Cuadro comparativo entre resistencias de subcampos estimadas en XGSLab y calculadas por programa implementado. . . . .	137
---	-----

## Índice de ilustraciones

2.1. Solicitaciones típicas de voltaje en una instalación eléctrica [4]. . . . .	10
2.2. Modelo de un terreno estratificado [5]. . . . .	14
3.1. Vista satelital ubicación planta fotovoltaica Diego de Almagro. . . . .	32
3.2. Diagrama unilineal simplificado, parque fotovoltaico Diego de Almagro [6]. . . . .	33
3.3. Plano de disposición general, parque fotovoltaico Diego de Almagro [7]. . . . .	34
3.4. Esquema sistema de puesta a tierra central Emelda [8]. . . . .	35
3.5. Vista de corte, zanja de baja tensión de 3 ductos. . . . .	36
3.6. Vista de corte, zanja de media tensión de 3 ternas. . . . .	37
3.7. Estructuras de soporte de módulos solares, parque fotovoltaico Diego de Almagro. . . . .	37
4.1. Diagrama de bloques, diseño de mallas de tierra de parques fotovoltaicos. . . . .	40
4.2. Configuración de Schlumberger. . . . .	41
4.3. Zonas de sondeo eléctrico vertical parque fotovoltaico Diego de Almagro. . . . .	42
4.4. Esquema diseño inicial malla de tierra parque fotovoltaico Diego de Almagro. . . . .	54
4.5. Plano trazado canalizaciones media tensión, parque fotovoltaico Diego de Almagro. . . . .	56
4.6. Reducción malla de tierra centro de conversión subcampo SF 1.1. . . . .	57
5.1. Interpretación computacional: resistividad de suelo, configuración de Schlumberger. . . . .	63
5.2. Diseño final malla de tierra principal de media tensión. . . . .	68
5.3. Diseño final malla de tierra cabinas de conversión de subcampos. . . . .	69
5.4. Diseño final malla de tierra centro de conversión subcampo SF 1.2. . . . .	70
5.5. Diseño final malla de tierra sala eléctrica y sala de control. . . . .	71
5.6. Diseño malla de tierra central termoeléctrica y subestación Emelda. . . . .	71
5.7. Diseño final malla de tierra parque fotovoltaico Diego de Almagro. . . . .	72
5.8. Potencial superficial inducido por malla de tierra principal. . . . .	73
5.9. Potencial superficial inducido por malla de tierra de cabina de conversión de subcampos. . . . .	74
5.10. Potencial superficial inducido en subcampo SF 1.6. . . . .	74
5.11. Potencial superficial inducido en sala eléctrica y sala de control. . . . .	75
5.12. Potencial superficial inducido en central termoeléctrica Emelda. . . . .	75
5.13. Potencial superficial inducido en subestación eléctrica Emelda. . . . .	76

5.14. Solicitación tensión de contacto en cabinas de conversión de subcampos. . . . .	77
5.15. Solicitación tensión de contacto en subcampos, parque fotovoltaico. . . . .	77
5.16. Solicitación tensión de contacto en subcampo SF 1.7. . . . .	78
5.17. Solicitación tensión de contacto en sala eléctrica y sala de control. . . . .	78
5.18. Solicitación tensión de contacto en central termoeléctrica Emelda. . . . .	79
5.19. Solicitación tensión de contacto en subestación eléctrica Emelda. . . . .	80
5.20. Solicitación tensión de contacto en cerco perimetral de parque fotovoltaico. . .	80
5.21. Solicitación tensión de paso en malla principal de media tensión. . . . .	81
5.22. Solicitación tensión de paso en subcampos, parque fotovoltaico. . . . .	82
5.23. Solicitación tensión de paso en subcampo SF 1.3. . . . .	82
5.24. Solicitación tensión de paso en sala eléctrica y de control. . . . .	83
5.25. Solicitación tensión de paso en central termoeléctrica Emelda. . . . .	83
6.1. Diseño de puesta a tierra de parque fotovoltaico sin elementos auxiliares. . .	93
6.2. Solicitación tensión de contacto en subestación eléctrica Emelda. . . . .	93
6.3. Diseño de puesta a tierra de parque fotovoltaico sin malla de interconexión. .	94
6.4. Solicitación tensión de contacto en central termoeléctrica Emelda. . . . .	95
6.5. Solicitación tensión de contacto en subestación eléctrica Emelda. . . . .	96
6.6. Circuito equivalente de falla residual entre dos mallas de tierra separadas. . .	97
6.7. Malla de tierra de subcampo SF 1.7, con lazo en perímetro de puesta a tierra. .	98
6.8. Solicitación tensión de contacto en subcampo SF 1.7. . . . .	99
6.9. Simplificación geometría de subcampos por cuadrados de área equivalente. . .	101
6.10. Diseño final malla de tierra parque fotovoltaico Diego de Almagro. . . . .	104
6.11. Solicitaciones tensión de paso y contacto en subcampos, parque fotovoltaico Diego de Almagro. . . . .	109
6.12. Comparación económica entre dos tipos de mallas de tierra de parques foto- voltaicos. . . . .	112
A.1. Ilustración método aproximado cálculo de resistencia mutua. . . . .	125
A.2. Diagrama de bloques, módulo cálculo de resistencia de puesta a tierra y co- rrientes dispersadas por elementos. . . . .	128
A.3. Revisión módulo cálculo de resistencia de puesta a tierra y corrientes disper- sadas por elementos. . . . .	129
A.4. Diagrama de bloques, módulo cálculo de potencial inducido en la superficie por la malla de tierra. . . . .	130
A.5. Revisión módulo cálculo de potencial inducido en la superficie por la malla de tierra. . . . .	131
A.6. Diagrama de bloques, módulo cálculo de solicitudes de contacto en instala- ción eléctrica. . . . .	133

A.7. Diagrama de bloques, módulo cálculo de solicitaciones de paso en instalación eléctrica. . . . .	134
A.8. Revisión módulo cálculo de solicitaciones de paso en instalación eléctrica. . .	135
B.1. Diseño de malla de tierra de subcampo SF 1.9, ingresado en software XGSLab.	136
B.2. Simulación realizada en XGSLab de solicitaciones de tensión de contacto en subcampo SF 1.9. . . . .	138
B.3. Simulación realizada en XGSLab de solicitaciones de tensión de paso en subcampo SF 1.9. . . . .	139