



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**

“CIMENTACIONES SUPERFICIALES PARA TORRES AUTOSOPORTADAS Y SU EFECTO EN LA CONSTRUCCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ALTA TENSIÓN, PERÚ, 2023”.

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Civil

Autor:

Jaime Medina Ayala

Asesor:

Dra. Ing. Sheyla Yuliana Cornejo Rodríguez
<https://orcid.org/0000-0001-8198-2250>

Trujillo - Perú

2023

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Nixon Brayan Peche Melo
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	Alberto Ruben Vásquez Diaz
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	Gonzalo Hugo Diaz García
	Nombre y Apellidos

INFORME DE SIMILITUD

“CIMENTACIONES SUPERFICIALES PARA TORRES AUTOSOPORTADAS Y SU EFECTO EN LA CONSTRUCCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ALTA TENSIÓN, PERÚ, 2023”.

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	7%
2	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	2%
3	www.lumensoft.pe Fuente de Internet	2%
4	ri.ues.edu.sv Fuente de Internet	1%
5	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y ponerme siempre en los caminos adecuados para cumplir con mis objetivos

A la memoria de mi padre, y a quien agradeceré toda mi vida por su ejemplo de trabajo y valores inculcados.

A mi madre y mis hermanos por su apoyo incondicional en todo momento.

AGRADECIMIENTO

A todos los docentes de la Universidad Privada del Norte que compartieron sus conocimientos y fortalezas para mi formación profesional. Con especial consideración a la Dra. Ing. Sheyla Yuliana Cornejo Rodríguez, por su apoyo como asesor para la elaboración y culminación de este trabajo de investigación

TABLA DE CONTENIDOS

JURADO EVALUADOR	2
INFORME DE SIMILITUD	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
TABLA DE CONTENIDOS	6
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS	14
RESUMEN	21
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	23
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA.	23
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	30
1.3. ANTECEDENTES.	30
1.4. OBJETIVOS	33
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.	33
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	33
1.5. HIPÓTESIS.....	33
1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL.	33
1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	33
1.5.3. JUSTIFICACIÓN.	34
1.6. BASES TEÓRICAS.....	35
1.6.1. LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	35
1.6.1.1. TENSIÓN.....	36
1.6.1.1.1. TENSIÓN NOMINAL DEL SISTEMA.....	36
1.6.2. TORRES DE CELOSÍA, AUTOSOPORTADAS.....	37
1.6.3. DETERMINACIÓN DE LAS EXTENSIONES DE LAS PATAS DE LAS TORRES	41
1.6.4. TIPOS DE TORRE AUTOSOPORTADA POR SU FUNCIÓN.....	42
1.6.4.1. TORRE DE SUSPENSIÓN.....	42
1.6.4.2. TORRE DE ANGULO.....	43
1.6.4.3. ESTRUCTURAS DE REMATE.....	47
1.6.4.4. TORRES PARA TRANSPOSICIÓN.....	49
1.6.5. CIMENTACIONES PARA TORRES AUTOSOPORTADAS.....	51
1.6.5.1. CIMENTACIONES TIPO PARRILLA O GRILLA.....	51
1.6.5.2. ZAPATAS AISLADAS.....	53
1.6.5.3. LOSA DE CIMENTACIÓN.....	56

1.6.5.4.	TUBULARES O PILAS ACAMPANADAS.	57
1.6.5.5.	PILOTES.	58
1.6.5.6.	MICROPILOTES HELICOIDALES.	59
1.6.6.	DEFINICIONES DE VANO.	61
1.6.6.1.	VANO ADELANTE.	61
1.6.6.2.	VANO ATRÁS.	61
1.6.6.3.	VANO PESO.	61
1.6.6.4.	VANO VIENTO.	61
1.6.7.	FALLAS MECÁNICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.	62
1.6.8.	CASCADA DE LÍNEAS O MÚLTIPLES FALLAS DE SOPORTE.	62
1.6.9.	FALLOS DE CIMENTACIÓN.	68
CAPÍTULO II. MÈTODO.		71
2.1.	ENFOQUE.....	71
2.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	71
2.3.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.	71
2.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA.	72
2.4.1.	POBLACIÓN.	72
2.4.2.	MUESTRA.	73
2.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	73
2.6.	PROCEDIMIENTO.	74
2.7.	ASPECTOS ÉTICOS DE LA INVESTIGACIÓN.	76
2.8.	SISTEMA ESTRUCTURAL DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.	76
2.8.1.	SISTEMA DE CABLES.	76
2.8.2.	SISTEMA DE SOPORTE ESTRUCTURAL.	77
2.8.3.	DISEÑO ESTRUCTURAL DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.	78
2.8.3.1.	CARGAS.	78
2.8.3.1.1.	CARGAS RELACIONADAS CON EL CLIMA.	78
2.8.3.1.2.	CARGAS DE VIENTO, HIELO Y HIELO COMBINADO CON VIENTO.	80
2.8.3.1.3.	CATEGORÍAS DE EXPOSICIÓN.	85
2.8.3.1.4.	ECUACIONES PARA EL COEFICIENTE DE EXPOSICIÓN.	89
2.8.3.1.5.	FACTOR DE RESPUESTA A RÁFAGAS PARA LA ESTRUCTURA.	92
2.8.3.1.6.	COEFICIENTE DE FUERZA.	92
2.8.3.1.7.	CARGAS DE SISMO.	94
2.8.3.1.8.	CARGAS DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO.	95
2.8.4.	DISEÑO POR FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA.	95
2.8.4.1.	GRADOS DE CONSTRUCCIÓN.	97
2.8.4.2.	FACTORES DE CARGA O SOBRECARGA.	97
2.8.4.3.	FACTORES DE RESISTENCIA.....	98

2.8.5.	HIPÓTESIS O CASOS DE CARGA PARA TORRES DE TRANSMISIÓN.	99
2.8.5.1.	CARGAS NORMALES.	100
2.8.5.2.	CARGAS EXCEPCIONALES.	104
2.8.6.	ÁRBOLES DE CARGAS.	105
2.8.7.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y DISEÑO PARA TORRES DE TRANSMISIÓN.	106
2.8.8.	DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.	107
2.8.8.1.	TEORÍA DE LA CAPACIDAD DE CARGA DE TERZAGHI.	107
2.8.8.2.	FACTOR DE SEGURIDAD.	110
2.8.8.3.	ECUACIÓN GENERAL DE LA CAPACIDAD DE CARGA.	110
2.8.9.	CAPACIDAD DE ELEVACIÓN (UPLIFT) DE UNA CIMENTACIÓN, EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.	113
2.8.10.	MÉTODO DE MEYERHOF Y ADAMS.	113
2.8.10.1.	CIMENTACIONES CIRCULARES.	115
2.8.10.2.	CIMENTACIONES RECTANGULARES.	117
2.8.11.	MIEMBROS ESTRUCTURALES Y CONEXIONES UTILIZADAS EN CIMENTOS.	118
2.8.11.1.	ÁNGULOS STUB EN EL CONCRETO.	118
2.8.11.2.	DISEÑO DE ÁNGULOS STUBS EN CONCRETO.	119
2.8.11.3.	CONECTORES DE CORTE ANGULARES [VER FIG. 53 (B)].	120
2.9.	DESARROLLO DE TESIS.	121
2.9.1.	DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.	121
2.9.1.1.	CONDICIONES AMBIENTALES.	125
2.9.2.	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA.	125
2.9.3.	CARACTERÍSTICAS DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN.	126
2.9.4.	CRITERIOS DE DISEÑO MECÁNICO PARA LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.	127
2.9.4.1.	HIPÓTESIS DE CÁLCULO PARA EL CONDUCTOR.	127
2.9.4.2.	TENSADO DEL CONDUCTOR.	127
2.9.5.	TORRES PROYECTADAS EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.	128
2.9.6.	MODELO DE LA TORRE EN SAP2000.	130
2.9.7.	MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN DE TORRES DE TRANSMISIÓN.	130
2.9.8.	TAMAÑOS MÍNIMOS DE PERFILES PARA TORRES DE TRANSMISIÓN.	131
2.9.9.	ÍNDICES O RELACIONES DE ESBELTEZ.	132
2.9.10.	PROPIEDADES DE LAS SECCIONES.	132
2.9.11.	DISEÑO A COMPRESIÓN DE ELEMENTOS DE LA TORRE DE TRANSMISIÓN.	134
2.9.11.1.	LONGITUDES EFECTIVAS DE MIEMBROS ANGULARES.	135
2.9.12.	DISEÑO ELEMENTOS A TRACCIÓN EN LA TORRE DE TRANSMISIÓN.	139
2.9.12.1.	DISEÑO DE ESFUERZOS A TRACCIÓN.	139
2.9.12.2.	MIEMBROS TIPO ÁNGULO.	139
	CAPÍTULO III. RESULTADOS.	141

3.1. MODELAMIENTO DE TORRE METÁLICA RETICULADA, AUTO SOPORTADA, PARA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN ALTA TENSIÓN.....	141
3.1.1. GEOMETRÍA DE LA TORRE.	141
3.1.2. MATERIALES.	142
3.1.3. ÁRBOLES DE CARGA.	144
3.1.4. HIPÓTESIS DE CARGA.....	147
3.1.5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	157
3.1.6. VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DEL ACERO DE SAP2000.	160
3.1.6.1. COMBINACIONES PARA VERIFICACIÓN DEL DISEÑO EN ACERO.	161
3.1.6.2. RESULTADOS DE VERIFICACIÓN DE DISEÑO EN ACERO.	163
3.1.6.2.1. RATIO O RELACIÓN DE CARGA DE PERFILES.....	163
3.1.7. CÁLCULO DE REACCIONES EN APOYOS DE LA CIMENTACIÓN.....	164
3.1.8. DISEÑO DE STUB.....	168
3.1.8.1. CALCULO SE SECCIÓN DE PERFIL ANGULAR.	168
3.1.8.2. CÁLCULO DE CAPACIDAD DE CONECTORES DE CORTE (CLEAT).	171
3.1.8.2.1. CÁLCULO DE NÚMERO DE CONECTORES.	171
3.1.8.3. LONGITUD DE STUB EMBEBIDA EN EL CONCRETO.	172
3.1.8.4. PROFUNDIDAD MÍNIMA DE DESPLANTE DE CIMENTACIÓN.	173
3.2. CIMENTACIONES SUPERFICIALES PARA TORRES DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ALTA TENSIÓN.....	174
3.2.1. MATERIALES.	174
3.2.2. CARGAS DE DISEÑO.	175
3.2.3. CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO.	175
3.2.4. DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO ZAPATA AISLADA.	179
3.2.4.1. MODELO.....	179
3.2.4.2. REVISIÓN POR CAPACIDAD PORTANTE.....	181
3.2.4.3. DISEÑO ESTRUCTURAL.	184
3.2.4.4. CAPACIDAD DE ELEVACIÓN (UPLIFT).	186
3.2.4.5. COSTO DE CONSTRUCCIÓN.....	188
3.2.5. DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO ZAPATA CONECTADA.	189
3.2.5.1. MODELO.....	189
3.2.5.2. REVISIÓN POR CAPACIDAD PORTANTE.....	190
3.2.5.3. DISEÑO ESTRUCTURAL.	193
3.2.5.4. COSTO DE CONSTRUCCIÓN.....	197
3.2.6. DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO LOSA.	198
3.2.6.1. MODELO.....	198
3.2.6.2. REVISIÓN POR CAPACIDAD PORTANTE.....	200
3.2.6.3. DISEÑO ESTRUCTURAL.	202
3.2.6.4. REVISIÓN POR VOLTEO Y DESLIZAMIENTO.	205

3.2.6.5.	COSTO DE CONSTRUCCIÓN.....	208
3.2.7.	DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PATA DE ELEFANTE.	209
3.2.7.1.	MODELO.....	209
3.2.7.2.	REVISIÓN POR CAPACIDAD PORTANTE.....	210
3.2.7.3.	DISEÑO ESTRUCTURAL.	213
3.2.7.4.	CAPACIDAD DE ELEVACIÓN (UPLIFT).	215
3.2.7.5.	COSTO DE CONSTRUCCIÓN.....	216
3.2.8.	INCIDENCIA DE LAS CIMENTACIONES EN COSTO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.	218
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES		224
4.1.	DISCUSIÓN.....	224
4.2.	CONCLUSIONES.	228
4.3.	RECOMENDACIONES.....	231
REFERENCIAS		233

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 01.	81
VIENTO Y TEMPERATURA, PARA LAS ZONAS DE CARGA A, B Y C, SEGÚN LA TABLA 250-1.A, DEL CÓDIGO NACIONAL DE ELECTRICIDAD.	81
TABLA 02.	82
VIENTO, HIELO Y TEMPERATURA, PARA LAS ÁREAS DE CARGA 1, 2 Y 3, SEGÚN LA TABLA 250-1.B, DEL CÓDIGO NACIONAL DE ELECTRICIDAD.	82
TABLA 03.	90
EXPONENTE DE LA LEY DE POTENCIA, PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO DE RÁFAGA Y A LA ALTURA DEL GRADIENTE CORRESPONDIENTE	90
TABLA 04.	91
COEFICIENTE DE EXPOSICIÓN, Kz, PARA LA PRESIÓN DE VIENTO, POR ALTURA EFECTIVA.....	91
TABLA 05.	98
FACTORES DE SOBRECARGA, PARA ESTRUCTURAS, CRUCETAS Y, CIMENTACIONES, SEGÚN LA TABLA 253-1, DEL CÓDIGO NACIONAL DE ELECTRICIDAD.	98
TABLA 06.	99
FACTORES DE RESISTENCIA, PARA LAS ESTRUCTURAS, CRUCETAS, HERRAJES DE SOPORTE, RETENIDAS, CIMENTACIONES Y ANCLAJES (TABLA 261-1ª, DEL CNE), PARA SER UTILIZADOS CON FACTORES DE SOBRECARGA, DE LA TABLA 253-1, DEL CÓDIGO NACIONAL DE ELECTRICIDAD.	99
TABLA 07.	109
FACTORES DE CAPACIDAD DE CARGA, MODIFICADOS DE TERZAGHI.....	109
TABLA 08.	111
FACTORES DE CAPACIDAD DE CARGA, PARA LA TEORÍA DE MEYERHOF.	111
TABLA 09.	112
FACTORES DE FORMA, PROFUNDIDAD E INCLINACIÓN [DEBEER (1970); HANSEN (1970); MEYERHOF (1963); MEYERHOF Y HANNA (1981)].	112
TABLA 10.	116
PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA ECUACIÓN DE MEYERHOF Y ADAMS.	116
TABLA 11.	123
COORDENADAS DE LOS VÉRTICES DEL PROYECTO.	123
TABLA 12.	125
TABLA 13.	126
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA LT. 138kV, MAZUKO-PUERTO MALDONADO.....	126
TABLA 14.	145
CARGAS VERTICALES(V), TRASVERSALES (T)Y LONGITUDINALES (L), APLICADAS AL MODELO LAS TORRE EN SAP2000, PARA LAS DIFERENTES HIPÓTESIS DE CARGA.	145
TABLA 15.	146
CARGAS VERTICALES(V), TRASVERSALES (T)Y LONGITUDINALES (L), APLICADAS AL MODELO LAS TORRE EN SAP2000, PARA LAS	

DIFERENTES HIPÓTESIS DE CARGA.....	146
TABLA 16.	148
CARGAS VERTICALES(V), TRASVERSALES (T)Y LONGITUDINALES (L), APLICADAS AL MODELO LAS TORRE EN SAP2000, PARA LAS DIFERENTES HIPÓTESIS DE CARGA.....	148
TABLA 17.	169
REPORTE DE RECCIONES MÁXIMAS EN LAS PATAS DE LAS TORRES, PARA LAS DIFERENTES HIPÓTESIS CALCULADAS CON SAP2000.	169
TABLA 18.	170
CÁLCULO DE ÁREA DE PERFIL ANGULAR DEL STUB, PARA LAS DIFERENTES HIPÓTESIS DE DISEÑO.	170
TABLA 19.	187
FACTORES DE SEGURIDAD UPLIFT, PARA CARGAS DE LEVANTAMIENTO EN PATAS DE LA TORRE, CALCULADA CON SAP2000. .	187
TABLA 20.	188
PRESUPUESTO DE CIMENTACIÓN DE TORRES TIPO T O A, CON ZAPATAS AISLADAS.	188
TABLA 21.	197
PRESUPUESTO DE CIMENTACIÓN DE TORRES TIPO T, CON ZAPATAS CONECTADAS.....	197
TABLA 22.	206
FUERZAS Y MOMENTOS RESISTENTES.	206
TABLA 23.	207
FUERZAS MOMENTOS ACTUANTES, CALCULADAS DE LOS REPORTES DE SAP2000.....	207
TABLA 24.	207
FACTORES DE SEGURIDAD AL DESLIZAMIENTO Y AL VOLTEO.	207
TABLA 25.	208
PRESUPUESTO DE CIMENTACIÓN TIPO LOSA, EN TORRES TIPO T.....	208
TABLA 26.	216
FACTORES DE SEGURIDAD UPLIFT, PARA CARGAS DE LEVANTAMIENTO EN PATAS DE LA TORRE, CALCULADA CON SAP2000. .	216
TABLA 27.	217
PRESUPUESTO DE CIMENTACIÓN DE TORRES TIPO T, CON ZAPATAS TIPO PATA DE ELEFANTE.....	217
TABLA 28.	218
RESUMEN DEL PRESUPUESTO, DE LÍNEA DE TRASMISIÓN, EN EL PROYECTO, RENOVACIÓN DE LÍNEA DE TRASMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN, DE 138 kV, Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO MADRE DE DIOS.....	218
TABLA 29.	219
VARIACIÓN DEL PRESUPUESTO, DE LÍNEA DE TRASMISIÓN, EN EL PROYECTO, RENOVACIÓN DE LÍNEA DE TRASMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN, DE 138 kV, Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO MADRE DE DIOS. UTILIZANDO, UNA CIMENTACIÓN, CON ZAPATAS AISLADAS.....	219
TABLA 30.	220
VARIACIÓN DEL PRESUPUESTO, DE LÍNEA DE TRASMISIÓN, EN EL PROYECTO, RENOVACIÓN DE LÍNEA DE TRASMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN, DE 138 kV, Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO MADRE DE DIOS. UTILIZANDO, UNA CIMENTACIÓN, CON ZAPATAS CONECTADAS.	220

TABLA 31.	221
VARIACIÓN DEL PRESUPUESTO, DE LÍNEA DE TRASMISIÓN, EN EL PROYECTO, RENOVACIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN, DE 138 kV, Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO MADRE DE DIOS. UTILIZANDO, UNA CIMENTACIÓN, TIPO LOSA.....	
	221
TABLA 32.	222
VARIACIÓN DEL PRESUPUESTO, DE LÍNEA DE TRASMISIÓN, EN EL PROYECTO, RENOVACIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN, DE 138 kV, Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO MADRE DE DIOS. UTILIZANDO, UNA CIMENTACIÓN, TIPO PATA DE ELEFANTE.....	
	222
TABLA 33.	223
RESUMEN DE PRESUPUESTO, SALDO DE OBRA, AMPLIACIÓN DE LA SET CHAHUARES, LÍNEA DE TRANSMISIÓN, EN 60 kV, CHAHUARES – KITENI, Y SUBESTACIÓN KITENI, DEL DISTRITO DE ECHARATI, PROVINCIA DE LA CONVENCION, EN EL DEPARTAMENTO DE CUSCO”.....	
	223
TABLA 34.	225
CANTIDAD DE MATERIALES UTILIZADOS EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES.	
	225
TABLA 35.	226
RESUMEN DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EVALUADAS.	
	226
TABLA 36.	226
RESUMEN DE FACTORES DE SEGURIDAD AL VOLTEO (FSV) Y DESLIZAMIENTO (FSD, CIMENTACIÓN TIPO LOSA.	
	226
TABLA 37.	227
RESUMEN DE FACTORES DE SEGURIDAD AL LEVANTAMIENTO PARA ZAPATAS AISLADAS Y TIPO PATA DE ELEFANTE.	
	227
TABLA 38.	230
INCIDENCIA DE LAS CIMENTACIONES EN EL COSTO TOTAL DE UN PROYECTO.....	
	230
TABLA 39.	231
VARIACIÓN DE INCIDENCIA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CIMENTACIONES ANALIZADAS CON RESPECTO AL PRESUPUESTO ORIGINAL DEL PROYECTO, RENOVACIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN, DE 138 kV, Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DEL DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS.....	
	231

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	36
PRINCIPALES ELEMENTOS DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.	36
FIGURA 2	38
TORRE DE CELOSÍA, AUTOSOPORTADA, TIPO PIRAMIDAL.	38
FIGURA 3	39
TORRE DE CELOSÍA, AUTOSOPORTADA, TIPO DELTA.	39
FIGURA 4	40
TORRE DE CELOSÍA DE CIRCUITO ÚNICO.	40
FIGURA 5	41
PATAS DESNIVELADAS.	41
FIGURA 6.	42
COMPENSACIÓN DE LAS DIFERENCIAS DE ALTURA DEL TERRENO EN CASO DE CIMENTACIONES SEPARADAS:	42
FIGURA 7	43
TORRES DE SUSPENSIÓN.	43
FIGURA 8	44
TORRES DE ANGULO EN LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 220kV.	44
FIGURA 9	45
TORRE DE ANGULO EN LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 138kV.	45
FIGURA 10	46
TORRE DE ANGULO EN LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 60kV.	46
FIGURA 11	47
UBICACIÓN DE TORRES DE ÁNGULO.	47
FIGURA 12	48
TORRE DE REMATE.	48
FIGURA 13	49
TORRE DE REMATE.	49
FIGURA 14	50
TORRE PARA TRANSPOSICIÓN.....	50
FIGURA 15	50
DESCRIPCIÓN GRAFICA DE TRANSPOSICIÓN, DE CIRCUITO, EN SIMPLE TERNA, PARA UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	50
FIGURA 16.	52
CIMENTACIONES TIPO PARRILLA.	52
FIGURA 17.	53
CIMENTACIONES TIPO PARRILLA.	53
FIGURA 18.	54
CONFIGURACIONES TÍPICAS DE ZAPATAS AISLADAS.	54

FIGURA 19	54
ZAPATA PARA UNA TORRE AUTOSOPORTADA.....	54
FIGURA 20	55
ZAPATAS AISLADAS, EN SITUACIÓN DE ARRANCAMIENTO, Y HUNDIMIENTO.....	55
FIGURA 21	56
LOSA DE CIMENTACIÓN, PARA TORRE DE CELOSÍA, EN LÍNEA DE TRANSMISIÓN, DE 110kV.....	56
FIGURA 22	57
CONSTRUCCIÓN DE LOSA DE CIMENTACIÓN, PARA TORRE DE CELOSIA, EN LÍNEA DE TRANSMISIÓN, DE 330kV	57
FIGURA 23	58
CIMENTACIÓN, DE PILA ACAMPANADA.....	58
FIGURA 24	59
CIMENTACIÓN CON PILOTES.	59
FIGURA 25	60
CIMENTACIÓN CON MICROPILOTES.	60
FIGURA 26	60
PARTES DE UN PILOTE HELICOIDAL.	60
FIGURA 27	62
DESCRIPCIÓN GRAFICA DE VANOS.	62
FIGURA 28	63
FALLA EN CASCADA LONGITUDINAL, LÍNEA DE TRANSMISION EM 735 kV, EN CANADÁ DURANTE LA GRAN TORMENTA DE HIELO, DE ENERO DE 1998.	63
FIGURA 29	64
PRIMER PLANO DEL FALLO DE LA CIMA DE UNA TORRE EN UNA CASCADA LONGITUDINAL SOBRE 11 APOYOS DE UNA LÍNEA DE 500 kV EN OREGÓN (EE.UU.)	64
FIGURA 30	65
PRIMER PLANO DEL FALLO DE LA CIMA DE UNA TORRE, FALLA EM CASCADA DE UNA LÍNEA DE 220 kV	65
FIGURA 31	66
CASCADA TRANSVERSAL EN LA LÍNEA DE TRANSMISION DE 400 kV RUBÍ-VANDELLÓS-PIEROLA, EN ESPAÑA, DURANTE UNA TORMENTA DE VIENTO DE ALTA INTENSIDADE, EN 2008.....	66
FIGURA 32	67
CASCADA TRANSVERSAL DE CINCO TORRES DE 400 kV DEBIDO A UNA TORMENTA DE VIENTO DE ALTA INTENSIDADE, EN MAYO DE 2006 EN LA REPÚBLICA CHECA.....	67
FIGURA 33	69
FALLA DE CIMENTACION DE TORRE DE TRANSMISION DE 220kV, POR EFECTO UPLIFT.....	69
FIGURA 34	70
FALLA DE CIMENTACIÓN, EN TORRE DE TRANSMISIÓN DE 220kV, POR EFECTO DE CASCADA.	70
FIGURA 35	72
ESQUEMATIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	72
FIGURA 36	75

ESQUEMA PARA RECOLECCIÓN DE DATOS	75
FIGURA 37.	83
ZONAS DE CARGA EN EL PERÚ, PARA DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES DE VIENTO.	83
FIGURA 38.	84
MAPA EÓLICO DEL PERÚ.....	84
FIGURA 39.	86
TERRENO TÍPICO REPRESENTATIVO DE LA EXPOSICIÓN B.	86
FIGURA 40.	86
CONDICIONES DE LA SUPERFICIE REQUERIDAS PARA EL USO DE LA CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN B.	86
FIGURE 41.	88
TERRENO TÍPICO REPRESENTATIVO DE LA EXPOSICIÓN C.	88
FIGURA 42.	88
TERRENO TÍPICO REPRESENTATIVO DE LA EXPOSICIÓN D.	88
FIGURA 43.	89
SURFACE CONDITIONS REQUIRED FOR THE USE OF EXPOSURE CATEGORY D.	89
FIGURA 44.	92
FACTOR DE RESPUESTA A RÁFAGAS, EN LA ESTRUCTURA.	92
FIGURA 45.	93
FORCE COEFFICIENTS FOR (A) SQUARE.	93
FIGURA 46.	101
CARGA VERTICAL SOBRE CONDUCTORES.	101
FIGURA 47.	102
CARGA TRANSVERSAL SOBRE CONDUCTORES DEBIDO AL VIENTO.....	102
FIGURA 48.	103
CARGA TRANSVERSAL DEBIDO A LA TENSIÓN DE LA LÍNEA, CAUSADA POR EL ÁNGULO DE DEFLEXIÓN.	103
FIGURA 49.	105
REPRESENTACIÓN DE UN ÁRBOL DE CARGA EN UNA TORRE.....	105
FIGURA 50.	108
FALLA POR CAPACIDAD DE CARGA, EN UN SUELO BAJO UNA CIMENTACIÓN RÍGIDA CONTINUA (CORRIDA).	108
FIGURA 51.	115
MÉTODO DE MEYERHOF Y ADAMS (CIMENTACIÓN CIRCULAR).....	115
FIGURA 52.	118
CIMENTACIONES TÍPICAS.....	118
FIGURA 53.	119
ANGULOS STUBS.....	119
FIGURA 54.	122
FIGURA 55.	124

UBICACIÓN DE LA NUEVA TRANSMISIÓN, EN 138KV, MAZUKO – PUERTO MALDONADO.	124
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LA LT. 138kV, MAZUKO-MADRE DE DIOS.	125
FIGURA 56.	129
SILUETA DE TORRE DE PROYECTO A MODELAR.	129
FIGURA 57.	133
SECCIONES TRANSVERSALES Y EJES TÍPICOS.	133
FIGURA 58.	133
DETERMINACIÓN DE RELACIÓN W/T.....	133
FIGURA 59.	136
ÁNGULO DE PIERNA IGUAL CON ARRIOSTRAMIENTO ESCALONADO.....	136
FIGURA 60.	140
DETERMINACIÓN DE LA RUPTURA (CORTE DEL BLOQUE).....	140
FIGURA 61.	142
DIBUJO DE TORRE METÁLICA EN AUTOCAD 2D (A) Y 3D (B) Y MODELO EN SAP2000.....	142
FIGURA 62.	143
PROPIEDADES DEL ACERO ASTM A36 UTILIZADO EN EL MODELO DE LA TORRE EN SAP2000.....	143
FIGURA 63.	143
PERFILES METÁLICOS ANGULARES UTILIZADO EN EL MODELO DE LA TORRE EN SAP2000.	143
FIGURA 64.	144
ARBOLES DE CARGA UTILIZADO PARA EL MODELO DE LA TORRE EN SAP2000.....	144
FIGURA 65.	150
DEFINICIÓN DE PATRONES DE CARGA EN SAP2000.	150
FIGURA 66.	150
DEFINICIÓN DE PATRONES DE CARGA EN SAP2000.	150
FIGURA 67.	151
DEFINICIÓN DE COMBINACIONES DE CARGA EN SAP2000.....	151
FIGURA 68.	152
ASIGNACIÓN DE CARGAS EN EL MODELO DE SAP2000.	152
FIGURA 69.	153
DETERMINACIÓN DE FACTOR DE RÁFAGA.....	153
FIGURA 70.	154
VELOCIDAD Wx, SEGÚN DATOS DE ACSE 7-16 Y CNE-SUMINISTRO 2011, ASIGNADOS EN SAP2000.	154
FIGURA 71.	155
VELOCIDAD Wy, SEGÚN DATOS DE ACSE 7-16 Y CNE-SUMINISTRO 2011, ASIGNADOS EN SAP2000.	155
FIGURA 72.	156
CARGAS DE VIENTO MOSTRADAS Y ASIGNADAS AL MODELO EN SAP2000.	156
FIGURA 73.	157
UNIONES EN LOS PERFILES DE UNA TORRE.	157

FIGURA 74.	158
LIBERACIÓN DE MOMENTOS EN UNIONES EN SAP2000.	158
FIGURA 75.	159
OPCIÓN DE ANÁLISIS: SPACE FRAME.....	159
FIGURA 76.	161
PARÁMETROS PARA EL DISEÑO.....	161
FIGURA 77.	162
COMBINACIONES DE CARGA, PARA DISEÑO EN ACERO, SEGÚN ACSE 10-97.	162
FIGURA 78.	164
RELACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA, DE CADA ELEMENTO ESTRUCTURAL, SEGÚN ACSE 10-97.	164
FIGURA 79.	165
REACCIONES CALCULADAS EN LOS APOYOS DE LAS PATAS, PARA LA HIPÓTESIS 1.	165
FIGURA 80.	166
REACCIONES CALCULADAS EN LOS APOYOS DE LAS PATAS, PARA LA HIPÓTESIS 3.	166
FIGURA 81.	167
REACCIONES CALCULADAS EN LOS APOYOS DE LAS PATAS, PARA LA HIPÓTESIS 6.	167
FIGURA 82.	174
PROPIEDADES DEL CONCRETO, $F'c=210\text{KG}/\text{CM}^2$, UTILIZADO EN LAS CIMENTACIONES, PARA TORRES AUTOSOPORTADAS.	174
FIGURA 83.	175
PROPIEDADES DEL ACERO CORRUGADO GRADO 60, $F_y=4200\text{KG}/\text{CM}^2$, UTILIZADO EN LAS CIMENTACIONES, PARA TORRES AUTOSOPORTADAS.	175
FIGURA 84.	176
DETALLE GRAFICO DE ZAPATA PARA CÁLCULO DE CAPACIDAD PORTANTE.	176
FIGURA 85.	178
COEFICIENTE DE BALASTRO INGRESADO A SAFE, PARA MODELADO DE CIMENTACIÓN.	178
FIGURA 86.	179
MODELO DE CIMENTACIÓN TIPO ZAPATA AISLADA.....	179
FIGURA 87.	180
DEFINICIÓN DE PATRONES DE CARGA PARA MODELO EN SAFE 21.	180
FIGURA 88.	180
DEFINICIÓN DE COMBINACIONES PARA MODELO EN SAFE 21.	180
FIGURA 89.	181
CARGAS APLICADAS AL MODELO EN SAFE 21, PARA LA CARGA TRASVERSAL T4.	181
FIGURA 90.	182
CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO, PARA LA HIPÓTESIS 1.	182
FIGURA 91.	183
CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO, PARA LA HIPÓTESIS 6.	183
FIGURA 92.	184

ACERO DE ½" Ø, REQUERIDO A LO LARGO DEL EJE X, O STRIP A.	184
FIGURA 93.	185
ACERO DE ½" Ø, REQUERIDO A LO LARGO DEL EJE Y, O STRIP B.	185
FIGURA 94.	189
MODELO DE CIMENTACIÓN TIPO ZAPATA CONECTADA.	189
FIGURA 95.	190
CARGAS APLICADAS AL MODELO EN SAFE 21, PARA LA CARGA VERTICAL, V2.	190
FIGURA 96.	191
CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO, PARA LA HIPÓTESIS 1.	191
FIGURA 97.	192
CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO, PARA LA HIPÓTESIS 3.	192
FIGURA 98.	193
ACERO DE ½" Ø, REQUERIDO A LO LARGO DEL EJE X, O STRIP A.	193
FIGURA 99.	194
ACERO DE ½" Ø, REQUERIDO A LO LARGO DEL EJE Y, O STRIP B.	194
FIGURA 100.	195
ACERO REQUERIDO POR FLEXIÓN.	195
FIGURA 101.	196
ACERO REQUERIDO POR CORTE.	196
FIGURA 102.	198
MODELO DE CIMENTACIÓN TIPO ZAPATA TIPO LOSA.	198
FIGURA 103.	199
CARGAS APLICADAS AL MODELO EN SAFE 21, PARA LA CARGA VERTICAL V2.	199
FIGURA 104.	200
CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO, PARA LA HIPÓTESIS 4.	200
FIGURA 105.	201
CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO, PARA LA HIPÓTESIS 6.	201
FIGURA 106.	202
ACERO DE ½" Ø, REQUERIDO A LO LARGO DEL EJE X, O STRIP A.	202
FIGURA 107.	203
ACERO DE ½" Ø, REQUERIDO A LO LARGO DEL EJE Y, O STRIP B.	203
FIGURA 108.	204
ACERO REQUERIDO POR PUNZONAMIENTO.	204
FIGURA 109.	206
GEOMETRÍA DE LOSA PARA CÁLCULO DE FUERZAS Y MOMENTOS EQUIVALENTES.	206
FIGURA 110.	209
MODELO DE CIMENTACIÓN TIPO ZAPATA TIPO LOSA.	209

FIGURA 111.	210
CARGAS APLICADAS AL MODELO EN SAFE 21, PARA LA CARGA VERTICAL V2.....	210
FIGURA 112.	211
CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO, PARA LA HIPÓTESIS 4.	211
FIGURA 113.	212
CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO, PARA LA HIPÓTESIS 6.	212
FIGURA 114.	213
ACERO DE ½" Ø, REQUERIDO A LO LARGO DEL EJE X, O STRIP A.	213
FIGURA 115.	214
ACERO DE ½" Ø, REQUERIDO A LO LARGO DEL EJE Y, O STRIP B.	214

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se evalúa los diversos tipos de cimentaciones superficiales de concreto armado, para torres autosoportadas, analizando su efecto y comportamiento estructural, en la construcción de líneas de transmisión de energía eléctrica en alta tensión.

Su desarrollo es en base al análisis de en una Línea de Trasmisión en 138kV, ubicada en el Departamento de Madre de Dios, la que se ha tomado como muestra, debido a que opera entre $35 \text{ kV} < U \leq 230 \text{ kV}$, según lo establecido en el código nacional de electricidad y la norma IEC 60038. Se reviso diversos documentos como, tesis, libros, artículos, normas nacionales e internacionales, etc., para analizar, diseñar y modelar, en SAP2000, un tipo de los tipos de torres, de celosía, con la que fue proyectada la línea de transmisión. Luego se modelo y analizo, cuatro cimentaciones superficiales (zapatas aisladas cuadradas, losa de cimentación, zapatas conectadas y cimentación tipo pata de elefante), utilizando el software SAFE 21, procediendo en base a los resultados a determinar, el costo de cada cimentación y su influencia en la construcción de la línea de transmisión.

En análisis, se determinó que las cimentaciones superficiales tipo zapata aislada cuadrada, es la más económica en la construcción de una línea de transmisión. Así mismo, en el caso de cimentaciones circulares o pata de elefante, estas resultan ser muy costosas, comparadas con las zapatas aisladas cuadradas, debido al efecto de levantamiento (Uplift), que incrementa los volúmenes de concreto, para poder conseguir factores de seguridad adecuados, para estas cargas. De otro lado, Las cimentaciones con zapatas conectadas, son más costosas que las zapatas aisladas cuadradas y las de tipo pata de elefante, pero tienen costo del 98.90% de lo que representa la construcción de una cimentación tipo losa. Por otro lado, profundidad de desplante de las cimentaciones está determinada por longitud mínima

de empotrado del STUB, en el concreto. Es así, que, en el caso de cimentaciones tipo losa, las cuales se usarían en cimentaciones con suelos de baja capacidad portante ($\leq 1.0 \text{ kg/cm}^2$), estas estarían limitadas a un desplante de profundidad mínima de 1m. Finalmente, se determinó que el costo o influencia de las cimentaciones en las líneas de transmisión, es aproximadamente el 30% del costo directo de su presupuesto, pudiendo variar esta incidencia, según el tipo de cimentación utilizada, u optimizando su diseño.

Palabras clave: Cimentación superficial, torres autosoportadas, líneas de transmisión, alta tensión, self-supporting towers, superficial foundations, high tensión, Transmission lines.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática.

Las líneas de transmisión, son las vías o medios de transporte, de energía eléctrica, en los sistemas eléctricos de potencia, pues forman, la columna vertebral, de las redes eléctricas, siendo estas, las que transmiten energía, a largas distancias, las cuales, han extendido, a través de las fronteras nacionales, durante mucho tiempo (Kiessling, Nefzger, Nolasco y Kaintzyk, 2003). Es así, que, con la expansión de las regiones económicas, más allá de las fronteras nacionales, se establecieron las condiciones, para el transporte de energía eléctrica a larga distancia y, por lo tanto, la liberalización del mercado de energía eléctrica. Por consiguiente, las líneas de transmisión son activos de larga duración, que requieren una inversión a largo plazo, de gran cantidad de dinero, es decir, son los componentes más valiosos de la red, a menudo cuestan tanto, hasta más, que una subestación completa (Kiessling, Nefzger, Nolasco y Kaintzyk, 2003). Hoy en día, los sistemas de suministro de energía eléctrica han alcanzado, un estatus técnico sobresaliente, pues, en los países industrializados, han garantizado, el suministro de energía eléctrica, con una confiabilidad muy alta. Sin embargo, este no es el caso en todas las partes del mundo, ya que, en algunos países, muchos habitantes, no tienen acceso a energía eléctrica confiable, y es allí, donde se debe instalar y mejorar, las redes de suministro eléctrico, así como también, construir, nuevas redes eléctricas. Aumentar la calidad del suministro, requiere aumentar aún más, la confiabilidad de las líneas eléctricas, aéreas, las cuales, están diseñadas exclusivamente, para cada aplicación, Pues, línea, tiene un número diferente de torres, tipos de cimientos y problemas únicos, que deben resolverse (Kiessling, Nefzger, Nolasco y Kaintzyk, 2003).

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), tiene objetivo, generar y abastecer de energía eléctrica al país, mediante la construcción de presas hidroeléctricas,

plantas termoeléctricas, subestaciones de energía y líneas de transmisión, así mismo, supervisar y evaluar los proyectos, que, por medio de licitación pública, se designa, a la Iniciativa Privada (De la Cruz y Sánchez, 2010). Es así, que, dentro del abastecimiento de energía eléctrica, las líneas de transmisión, aéreas, juegan un papel importante, y son las que soportan los cables de alta tensión, medio por el cual, la energía, es llevada a los diferentes puntos, de la República Mexicana (De la Cruz y Sánchez, 2010). Por lo tanto, desde el punto de vista estructural, las torres de transmisión, de energía eléctrica, deben resistir, la acción de fenómenos naturales, tales como, hielo, sismo, pero principalmente, el empuje del viento, de tal manera, que la conducción de la energía eléctrica, se realice con seguridad, eficiencia y bajo costo, garantizando, la estabilidad, y el buen funcionamiento de las torres de transmisión, la cual, radica, en el diseño de su cimentación (De la Cruz y Sánchez, 2010).

En Brasil, la energía eléctrica generada, en su mayor parte, proviene de su potencial hidroeléctrico, que, con el fin, de reducir las pérdidas por transporte de energía, dado los muchos kilómetros de recorrido, de las líneas de transmisión, la generación de energía, pasa a través, de una subestación elevadora, elevando el voltaje, reduciendo así la corriente, lo que permite, reducir el diámetro de los cables y minimizando la pérdida por efecto Joule (Lavall, 2019). De otro lado, debido a las grandes distancias, que hay entre las hidroeléctricas, y los centros de consumo, se requiere de redes complejas, las cuales, tienen que ser eficientes, para el transporte de energía eléctrica. Estas redes, están compuestas, por cables instalados en estructuras metálicas de celosía, cuidadosamente distribuidos a lo largo de su recorrido, y cuya ubicación, está condicionada directamente a una serie de factores técnicos, como la topografía, tipo de estructura metálica, nivel de tensión, entre otros (Lavall, 2019). Por otro lado, debido a la alta probabilidad de variación de las características geotécnicas, a lo largo de las líneas de transmisión, y con el fin de simplificar, y optimizar el número de cimentaciones a construir, es común clasificar los suelos, en algunas categorías

que expresan parámetros geotécnicos, que cumplen a diversas situaciones encontradas en el campo (Lavall, 2019). Por lo tanto, existe, una amplia gama de soluciones, de cimentación, para ser utilizadas, en líneas de transmisión, según el tipo de suelo, que se encuentra, en el campo, tanto, para estructuras autoportantes, como atirantadas (Lavall, 2019). Por consiguiente, los tipos de cimentación, utilizados, van desde, cimentaciones, tipo, tubulares, zapatas aisladas, zapatas, anclajes de roca, bloques de pilotes, y hasta cimentaciones, poco conocidas, como la viga en L” (Lavall, 2019).

En Ecuador, en el transcurso del tiempo, se ha generalizado, el tipo de cimentaciones, utilizadas en los proyectos, de líneas de transmisión, lo cual, no ha permitido que se desarrolle la ingeniería, y que se logre invertir de una mejor manera, los recursos (Cañar, 2012). La resistencia del suelo, en los diferentes lugares de Ecuador, varía de acuerdo con el tipo de suelo encontrado, debido a sus características, lo cual incide directamente, en la manera de elegir, el tipo de cimentación, más adecuado, para las torres de energía eléctrica” (Cañar, 2012).

En el Perú, la transmisión de energía eléctrica, se efectúa, mediante el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), y los Sistemas Aislados (SS. AA.) (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2015). El Sistema de Transmisión, del SEIN, está integrado, por líneas del sistema garantizado, y complementario de transmisión, así como, líneas del sistema principal, y secundario de transmisión (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2015). Estas líneas, transportan energía eléctrica, tanto, para el norte, como, centro y sur del país, siendo las principales empresas concesionarias que desarrollan la actividad de transmisión eléctrica, Red de Energía del Perú S.A., Consorcio Transmantaro S.A., el Grupo Abengoa, Red Eléctrica del Sur. S.A., Eteselva S.R.L., Interconexión Eléctrica ISA Perú, Consorcio Energético Huancavelica S.A., Etenorte S.R.L., y Transmisora Eléctrica del Sur S.A. (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2015). Por lo que, transportar la energía

eléctrica, llega a ser un reto, ya que se requieren infraestructura, como centrales de generación, subestaciones eléctricas, postes y torres de transmisión eléctrica, donde la construcción de cimentaciones, en concreto armado, para torres y postes de transmisión, juegan un factor importante, para garantizar la estabilidad, seguridad y su buen funcionamiento, de las estructuras de soporte, principalmente por las condiciones que presenta el suelo (Álvarez, 2017). Por lo tanto, el diseño de las cimentaciones, tiene un papel esencial, y es donde se identifica el problema, para las empresas de suministro eléctrico de nuestro país, debido a que no se detalla un diseño específico, para este tipo estructuras, en el Reglamento Nacional de Edificaciones – 2012” (Álvarez, 2017).

El diseño de líneas transmisión aéreas, es una actividad, que involucra, contribuciones directas e indirectas, de muchas otras disciplinas, de la ingeniería, como de otras, especialidades, pues requiere de la participación, de ingenieros civiles (estructurales y geotécnicos), ingenieros eléctricos, topógrafos, dibujantes (CAD), y finalmente contratistas de construcción (Kalaga y Yenumula, 2017). Por lo que, un buen diseño, de una la línea de transmisión, es clave, para dar confiabilidad, al servicio eléctrico, ya que fallas de los componentes estructurales, originarían apagones a gran escala, debido a que esta infraestructura, transporta grandes volúmenes de energía, a grandes distancias (Kalaga y Yenumula, 2017). De otro lado, los componentes principales, de una línea de transmisión, son las torres o postes, las cuales, deben ser resistentes a las condiciones de servicio y carga, además que, deben tener estabilidad, la cual es otorgada por sus cimentaciones (Caycho, 2018). Por otro lado, las cimentaciones, tienen un porcentaje de incidencia aproximado, del 20%, en el costo total de un proyecto, además de ser, la principal fuente de apoyo, en toda la estructura, de la línea de transmisión” (Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas [CIGRE], 1991), donde, su diseño, depende de factores como, la posición y tipo de torre, el nivel de tensión, propiedades mecánicas de conductores, cable guarda, presión de viento,

cargas vivas, cargas excepcionales, entre otros factores (Chávez y Paz, 2018). Actualmente, en el Perú, las cimentaciones más usadas, son las cimentaciones superficiales, que son en su mayoría, de zapata aislada, tipo losa y zapatas acampanadas, esto debido, a su economía, y el rápido proceso constructivo en comparación, con las cimentaciones profundas, como son los pilotes (Caycho, 2018). Por lo expuesto, se afirma, que las cimentaciones superficiales tienen una influencia en la construcción de las líneas de transmisión, y se pretende evaluar técnica y económicamente, su efecto, así como profundizar, el conocimiento de este tipo de obra, en la ingeniería civil, poco conocida en el país.

En 1891, se inició la transmisión de energía, en corriente alterna, trifásica, y se dio, cuando se construyó una línea de, 175 km de longitud, para suministrar electricidad a una feria internacional de ingeniería eléctrica, celebrada en Frankfurt (Alemania), llevando energía, de una central hidroeléctrica, de 200kW, para alimentar un motor, de 75kW” (Kiessling, Nefzger, Nolasco y Kaintzyk, 2003). De otro lado, dado, que la energía eléctrica, no se puede almacenar, la generación en las centrales eléctricas, y el consumo, deben equilibrarse permanentemente, por lo que, se requiere de potentes sistemas de transmisión. Por otro lado, estos sistemas, se instalaron en muchas partes del mundo, en el siglo XX, utilizando voltajes, crecientes, paso a paso (Kiessling, Nefzger, Nolasco y Kaintzyk, 2003). Es así, que, en Alemania, en 1912, se utilizó la tensión de 110 kV, para luego, en 1929, se implemente líneas, de 220 kV. Así mismo, en 1952, se inició, la transmisión de energía eléctrica, en 400 kV, en Suecia. Posteriormente, en 1965, se construyó, la primera línea de 750 kV, en Canadá. Para luego, en 1985, tener la línea, de 1200 kV, en la ex Unión Soviética en 1985 (Kiessling, Nefzger, Nolasco y Kaintzyk, 2003).

En el Perú, la etapa de construcción de las líneas de transmisión, en alta tensión empieza, en 1938 (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2007). Antes de esa fecha, la transmisión eléctrica, en Lima, y en las demás ciudades del país, donde había electricidad,

era muy limitada, en sus características, como para definirla, como se conoce ahora. Es así que, con el ingreso, en 1938, de la nueva central, Juan Carosio, en Callahuanca, generando 36,750 kVA, fue necesario construir, una línea de transmisión, la tercera, con la que contó, la ciudad de Lima, para su abastecimiento (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2007). Esta línea, fue la primera línea de alta tensión, que se construyó en nuestro país, ya que las anteriores, sus estructuras de soporte, eran construidas, con postes de madera, que llevaban solamente una tensión de, 33,000 voltios, y se construyó, en dos ternas trifásicas, que operaban a la tensión de, 60,000 voltios, la cual, estaba constituida, con conductores de cobre, suspendidos, con cadenas de aisladores, sobre 218 torres metálicas, de acero colocadas, en un recorrido de, 52.5 kilómetros, desde la central, hasta el tablero de distribución de Santa Rosa (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2007). En nuestro país, el tendido de las redes de transmisión, fue una labor titánica, dada nuestra geografía, y desde un inicio, hubo una profunda diferencia, entre el tendido de líneas costeras, y las líneas de sierra y selva (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2007). Empezándose así, la construcción de una mayor cantidad de líneas de transmisión, y por consiguiente, la construcción de las torres de celosía, autosportadas, con cimentaciones superficiales, debido a su rápido proceso constructivo, en comparación con cimentaciones profundas, como pilotes, pilas de grava (Caycho, 2020). Antiguamente, hasta mediados de la década de los 70, se solían utilizar cimentaciones, tipo grilla, embebidas en asfalto, como recubrimiento para evitar la corrosión, las cuales eran enterradas en el suelo, a profundidades cercanas entre, los 3 y 4 metros (Chávez y Paz, 2020). Este tipo de fundaciones, estaban formadas, por perfiles (stubs), y accesorios, que comprenden el montante principal, como, pernos, tuercas, riostras y arandelas, donde la posición de los perfiles, era determinada por el proyectista, y dependían de cada tamaño y tipo de torre, que además, debían cumplir ciertos valores de tolerancia, para el posterior montaje de la estructura (Chávez y Paz, 2020).

Finalmente, su desuso, se debe a la desventaja, de tener menos resistencia a la agresividad, del terreno natural (Tojeira, 2010).

La construcción de proyectos, de líneas de transmisión, en el Perú, dependen del planeamiento de transmisión, en energía eléctrica, la cual, es realizado, por el Comité de Operación Económica del Sistema (COES, 2023), quien tiene, carácter vinculante para las decisiones de inversión, que se adopten durante su vigencia, y es aprobado por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), con la opinión previa, del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin) (COES, 2023). En el artículo 1º, de la Ley N° 28832 (Ley para asegurar el desarrollo eficiente de la Generación Eléctrica), se define, al Plan de Transmisión, como el estudio periódico, que identifica, mediante un análisis centralizado, los requerimientos de equipamiento de transmisión, necesarios para mantener o mejorar la calidad, fiabilidad, seguridad y economía del sistema, para un horizonte no mayor a diez años, precisando, que tal estudio, tiene como producto un plan recomendado, de obras de transmisión, que considera, los diversos escenarios de la expansión de la generación, y el crecimiento de la demanda futura, así como, el cronograma de ejecución, y la asignación de las compensaciones, para su remuneración (MINEM, 2006, p.2). Actualmente, se tiene aprobado, mediante Resolución Ministerial, N° 459-2022-MINEM/DM, el Plan de Transmisión, 2023 a 2032, el mismo que está vigente, desde el, 01 de enero 2022, hasta, el 31 de diciembre de 2024, la cual, involucra, la ejecución de proyectos, de líneas de transmisión, en 60kV, 138kV, 220kV y 500kV, que incluyen, nuevas líneas, ampliaciones y reforzamientos, de líneas existentes (MINEM, 2022, p.77).

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto y comportamiento estructural de las cimentaciones superficiales, en la construcción de líneas de transmisión de energía eléctrica, en alta tensión, Perú, 2023?

1.3. Antecedentes.

Ruiz (2018) en su tesis, publicada por la Universidad de El Salvador, “establece algunas soluciones para el diseño y construcción de cimentaciones de torres de transmisión eléctrica de alta tensión” (p. 2). En su estudio, “sostiene, que de los tres tipos de fundaciones analizadas (losa de cimentación, zapatas aisladas, zapatas acampanadas), las cimentaciones más económicas son las zapatas acampanadas lo cual se puede concluir a partir de sus volúmenes excavados y sus volúmenes de concreto necesarios para su construcción, lo que da como principal motivación reconocerla como la fundación más práctica para la construcción de líneas de transmisión” (p. 261).

Gilberto (2020) en su tesis, publicado por la Universidade do Sul de Santa Catarina, de Brasil, hizo un estudio comparativo entre cimentaciones para estructuras metálicas de líneas de transmisión con diferentes características geotécnicas para una línea de transmisión de 500kV, donde comparo una cimentación tipo de zapata aislada con una tubular o zapata acampanada, observando un consumo de 62 kg de acero y 1,78 m³ de concreto para la cimentación de la zapata aislada y para la cimentación tubular, los valores de acero y concreto consumidos fueron de 90 kg y 2,00 m³, demostrando un incremento en el consumo acero del 45% y de concreto de 12% de la zapata acampanada frente a la zapata aislada, pero sin embargo se aclara que es de la preferencia por parte de las constructoras de optar por la construcción tipo tubulares sobre otras cimentaciones ya que no necesita grandes volúmenes de excavación y relleno, así como el mínimo consumo de superficie de encofrado (p. 138).

Coca (2018) en su tesis publicada por la Universidad Peruana los Andes, de Huancayo, Perú, tuvo como objetivo, “establecer cómo es la calidad de la cimentación en la

construcción de torres de alta tensión de la línea de transmisión 138 kV (p. 23). Encontrando, “ que la capacidad y estabilidad de la estructura que soportan las líneas de alta tensión, están afectadas además por la resistencia del concreto, según se indica que cuando resistencia del concreto, $f'c$, baja a 175 kg/cm², el ϕVc , se reduce a un 8.70% para el punzonamiento y el Vc se reduce en un 8.73% para la cortante, debido a que estos parámetros están en función a la resistencia del concreto, $f'c$ ” (p. 146). Por otro lado, encontró que, “dicha capacidad y estabilidad también es afectada por una cuantía menor de acero y un menor grado de compactación que se generan en un inadecuado proceso constructivo de los cimientos en torres de alta tensión” (p. 146).

More & Taipicuri (2020), En su trabajo de investigación, publicado por la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, UPC, del Perú., tuvo como objetivo “presentar una metodología de cálculo para el predimensionamiento de la cimentación de una torre de alta tensión (115 kV) sobre macizo rocoso, mediante pernos de anclaje a partir del tipo de roca sobre el que se fundará” (p. 1). Encontrando que, “para la cimentaciones superficiales conformadas por zapatas aisladas ancladas con pernos, se puede definir el comportamiento del ancho de zapata se puede expresar en función de la RCS de las rocas, mediante la expresión $y = 2.6618x^{(-0.272)}$, ya que su curva ($x=RCS$; resistencia a la compresión simple de rocas, y =ancho de la zapata) posee un excelente nivel de representatividad. Este estudio define que sí es posible predimensionar las zapatas de una torre de alta tensión ancladas con pernos de roca a partir de un análisis paramétrico” (p. 15).

Caycho (2020), en su trabajo de tesis publicado por la Universidad Católica del Perú, modelo una torre metálica de alta tensión utilizando el software SAP2000, realizando el diseño geotécnico de las fundaciones de torres de transmisión (cimentaciones superficiales) verificando la estabilidad y resistencia frente a las cargas de la estructura principal, encontrando que; “el tamaño de las estructuras de la cimentación depende mucho de la

función de la torre en la Línea de Trasmisión (anclaje y suspensión), por la diferencia en la magnitud de las cargas que reciben, determinando además que el uso de losa de cimentación es recomendado en suelos malos o de baja capacidad admisible ($\leq 1.0 \text{ kg/cm}^2$), concluyendo además que el uso de zapatas aisladas resulta más económico que una losa de cimentación” (p. 88).

Chávez y Paz (2020) en su trabajo de tesis “Metodología del diseño geotécnico de las cimentaciones en líneas de transmisión”, publicado por la Universidad de Piura, “analizo el diseño de cimentaciones monolíticas bajo el Método de Diseño Sulzberger y cimentaciones aisladas, para líneas de transmisión” (p. 5). Obteniendo como resultados, “que la utilizando losas de cimentación, como cimientos, sería la opción menos económica a comparación, con las cimentaciones de patas aisladas, y solo sería necesario su uso, en los casos que determine baja capacidad portante del suelo” (p. 155). Por otro lado, determino, “que el método de Sulzberger, solo se puede utilizar para estructuras tales que posean una cimentación tipo mono bloque (postes o torres), y para estructuras que dispongan de cimientos aislados, es incorrecto analizarlas mediante este método, debido a que, bajo esta configuración estructural, los momentos generados por las cargas son traducidos en pares de fuerza, es decir, dos cimientos sometidos a tensión y otros dos sometidos a compresión” (p. 156).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General.

Analizar el efecto y comportamiento estructural de las cimentaciones superficiales en la construcción de líneas de transmisión de energía eléctrica en alta tensión en el Perú.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Describir los aspectos mecánicos de las estructuras de soporte que afectan, directamente el diseño de las cimentaciones.
- Modelar una torre metálica de alta tensión, mediante software, aplicando las combinaciones cargas, según hipótesis de trabajo u operación de la línea de transmisión.
- Realizar el diseño geotécnico de las cimentaciones superficiales, verificando la estabilidad y resistencia frente a las cargas de la estructura principal.
- Realizar el dimensionamiento y diseño estructural de las cimentaciones.
- Realizar cálculos numéricos con software de elementos finitos.
- Hacer un análisis comparativo de las diferentes cimentaciones superficiales calculadas.

1.5. Hipótesis.

1.5.1. Hipótesis general.

¿El tipo de cimentación superficial utilizada, afecta la construcción de líneas de transmisión de energía eléctrica en alta tensión, en el Perú?

1.5.2. Hipótesis específicas

- El comportamiento mecánico de las estructuras de soporte que afectan directamente el diseño de las cimentaciones.

- Las características geotécnicas del suelo influyen en el diseño de las cimentaciones y en la estabilidad de las torres de las líneas de transmisión.
- La elección de una cimentación superficial como soporte de una torre afecta los costos de construcción de las torres superficiales.

1.5.3. Justificación.

Es conveniente, porque crecimiento económico del Perú, ha reflejado en el incremento de demanda de energía eléctrica en todo el país. Por lo que, se requiere del reforzamiento de las redes eléctricas, en las cuales, muchas veces solo se cambian los conductores existentes, con cables de mayor diámetro, que son más pesados, los cuales, afectaran, directamente las cimentaciones. De otro lado, construir de nuevas líneas de transmisión, por sitios alejados de la población trae como reto, el ensamble de las torres de celosía y con ello la construcción de sus cimentaciones, las mismas que atraviesan por zonas inaccesibles con, por suelos de diferentes características, con una topografía montañosa. En ese sentido, es necesario, conocer a fondo el comportamiento de los diferentes tipos cimentaciones superficiales, a fin de evaluar el impacto en la construcción de obras vinculadas a la energía.

Las líneas de transmisión juegan un papel importante para el desarrollo del país. Las cuales, en caso de fallar, afectarían tanto al sector, industrial, comercial y poblacional, paralizando la economía, produciendo perjuicios económicos, debido a que estas, transportan grandes volúmenes de energía, en largas distancias. En consecuencia, esto hace, que los diseños de las cimentaciones requieran, grados de seguridad elevado, porque, en caso de fallar, no solo podrían afectar la línea de transmisión, sino también podrían atentar contra la vida y el ambiente.

Es importante, porque permitirá evaluar y conocer las características geotécnicas y

estructurales de las cimentaciones superficiales, que son fundamentales para la estabilidad de las torres y con ello se evite el colapso de las líneas de transmisión, ya que su funcionamiento u operatividad, es imprescindible para tener líneas confiables y garanticen la continuidad del sistema eléctrico.

Con esta investigación se difundirá, conocimiento sobre diseño de obras civiles en líneas de transmisión, con especial énfasis en las cimentaciones del tipo superficial que son las más usadas en el Perú y las más económicas comparadas con las cimentaciones profundas.

1.6. Bases Teóricas.

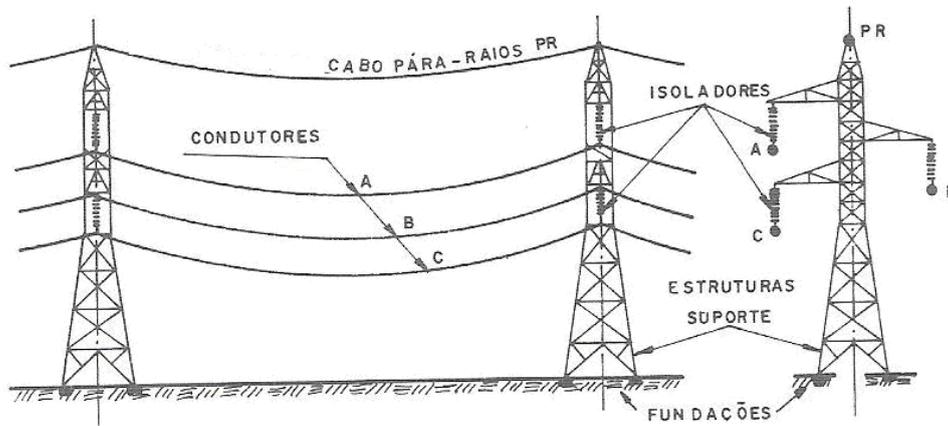
1.6.1. Línea de Transmisión.

Es una línea área, que transporta energía eléctrica, en alta tensión a grandes distancias, desde una unidad de generación, hasta una unidad de transformación y/o distribución. Según Labegalini, Fuchs y Almeida. (2005), una línea aérea de transmisión suele tener la siguiente composición (Figura 1):

- Cables de alimentación y accesorios;
- Estructuras aislantes - cadenas aislantes;
- Estructuras de soporte - torres;
- Fundaciones;
- Cables pararrayos;
- Puesta a tierra;
- Accesorios varios.

Figura 1

Principales elementos de las líneas de transmisión.



Nota. Tomado de *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão* (p.19), Labegalini, Fuchs y Almeida. (2005). Editora Edgard Blucher LTDA. Sao Paulo, Brasil.

1.6.1.1. Tensión.

La tensión o potencial eléctrico, “es la diferencia de voltaje, entre dos conductores cualquiera (fases), o entre un conductor y la tierra (fase – tierra), siendo su unidad de medida, es el voltio (V), que, en alta tensión, esta representa en kilovoltios, bajo el cual, opera, la línea de transmisión” (CNE, 2011).

1.6.1.1.1. Tensión Nominal del Sistema.

Es la magnitud, de Tensión de la red, operando en condiciones normales, la cual es medido fase a fase, entre conductores, en kilovoltios (kV). Así mismo, esta tensión, está determinada por las necesidades del sistema eléctrico nacional, de cada país. En este sentido, los valores de tensión nominal, empleados en el Perú, están definidos en el Código Nacional de Electricidad, Suministro 2001, los cuales se describen a continuación:

- **Baja Tensión** (abreviatura: B.T.): “Conjunto de niveles de tensión utilizados para la distribución de la electricidad. Su límite superior generalmente es $U \leq 1 \text{ kV}$, siendo U la Tensión Nominal” (CNE, 2011).

- **Media Tensión** (abreviatura: M.T.): “Cualquier conjunto de niveles de tensión comprendidos entre la alta tensión y la baja tensión. Los límites son $1 \text{ kV} < U \leq 35 \text{ kV}$, siendo U la Tensión Nominal” (CNE, 2011).

- **Alta Tensión** (abreviatura: A.T.):

“Conjunto de niveles de tensión superior utilizados en los sistemas eléctricos para la transmisión masiva de electricidad. Con límites comprendidos entre $35 \text{ kV} < U \leq 230 \text{ kV}$ ” (CNE, 2011).

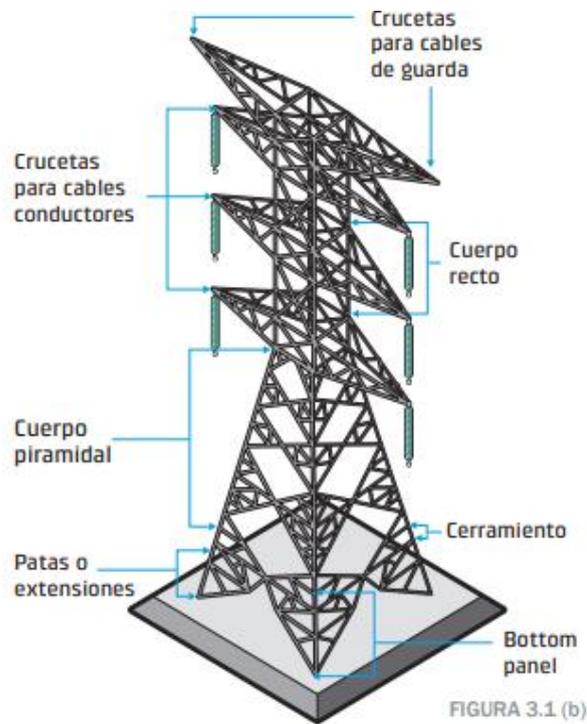
- **Muy Alta Tensión** (abreviatura: M.A.T.): “Niveles de tensión utilizados en los sistemas eléctricos de transmisión, superiores a 230 kV” (CNE, 2011).

1.6.2. Torres de celosía, autosoportadas.

Son estructuras formadas, por acero reticulado (celosía), que, por su forma geométrica, son capaces, de soportar su propio peso, así como, las fuerzas ejercidas por los conductores, y cables de guarda. Así mismo, debido a su aplicación, en cualquier tipo de terreno, “son los tipos de estructuras, más usadas, en las líneas de transmisión, aéreas, pudiéndose diseñar, para diversas configuraciones, con varios circuitos, o ternas, las que tienen diferentes disposiciones de fases, en el armado de la torre” (Ruiz, 2018). En la Figura 2 y 3, se detalla de manera gráfica los dos tipos de torres autosoportadas más usadas en alta tensión, indicando sus partes, las cuales son construidas con perfiles de acero galvanizado tipo L.

Figura 2

Torre de celosía, autoportada, tipo piramidal.



Nota: Tomado de Manual para el Diseño Electromecánico de Líneas de Transmisión Aéreas (p.37), CFE (2012), Comisión Federal de Electricidad, México.

Figura 3

Torre de celosía, autoportada, tipo Delta.

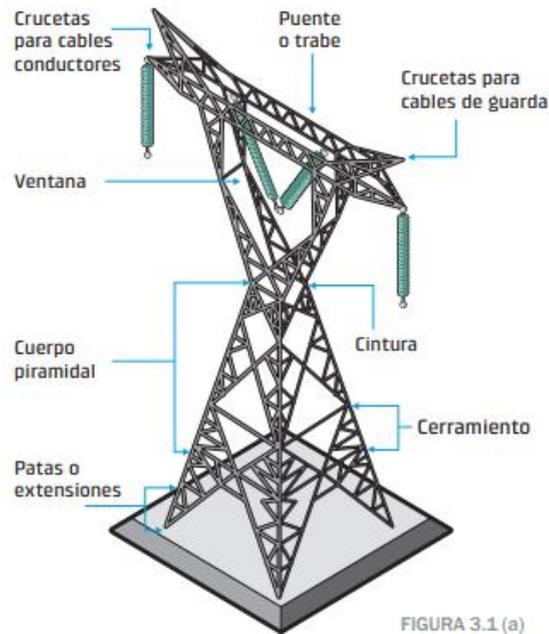


FIGURA 3.1 (a)

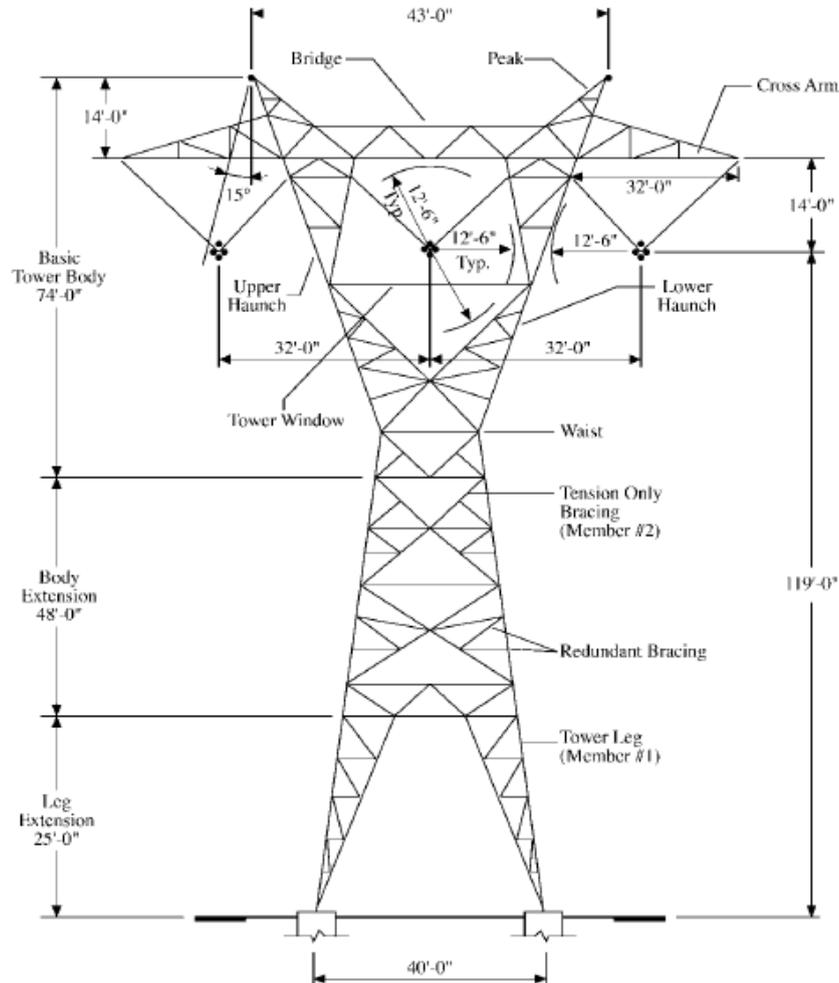
Nota: Tomado de Manual para el Diseño Electromecánico de Líneas de Transmisión Aéreas (p.37), CFE (2012), Comisión Federal de Electricidad, México.

Las torres de celosía están formadas por un cuerpo básico, una extensión de cuerpo y extensiones de patas. Se desarrollan diseños estándar, de estos componentes para un tipo de torre dado. El cuerpo básico se utiliza para todas las torres, independientemente de la altura. Así mismo, se agregan extensiones de cuerpo y pierna al cuerpo básico para lograr la altura de torre deseada. (Chen, 2001, p.1045).

La altura de la cúpula (peak) o cruceta, para cables de guarda, se basa en consideraciones de blindaje, para protección contra descargas atmosféricas. De otro lado, el ancho de la base de la torre depende de la pendiente de las patas de la torre, por debajo de la cintura (waist). Por otro lado, la altura total de la estructura se rige por la longitud del tramo de los conductores entre las estructuras.

Figura 4

Torre de celosía de circuito único.



Nota: Tomado de Handbook of Structural Engineering. (p.1045), Chen, W (1999), Editorial CRC press, LLC., Londres, Inglaterra.

Los miembros principales de una torre, son las patas y los componentes de refuerzo, que soportan las cargas verticales y horizontales, que se aplican a la torre y que las transfieren a los cimientos. Se utilizan elementos de arriostamiento secundarios o redundantes para proporcionar soporte intermedio a los miembros primarios para reducir su longitud sin arriostar y aumentar su capacidad de carga (Chen, 2001, p.1045).

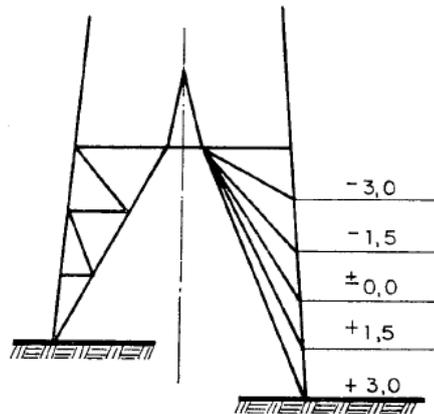
1.6.3. Determinación de las extensiones de las patas de las torres

Las extensiones, de las patas de las torres, son módulos, o componentes, que absorben, las diferencias de nivel del terreno natural, permitiendo mantener la torre, vertical, donde, para determinar su longitud, es necesario realizar el levantamiento topográfico, de perfiles transversales, al perfil de la línea (CFE, 2012, p.218):

En las figuras 5 y 6b se muestra una descripción grafica de las extensiones de las patas realizadas con perfiles estructurales. Así mismo, en la figura 6a, se muestra una compensación del desnivel del terreno, incrementando la longitud del pedestal de la cimentación, de tal manera que las longitudes de las 04 patas de la torre, permanezcan invariables.

Figura 5

Patas desniveladas.

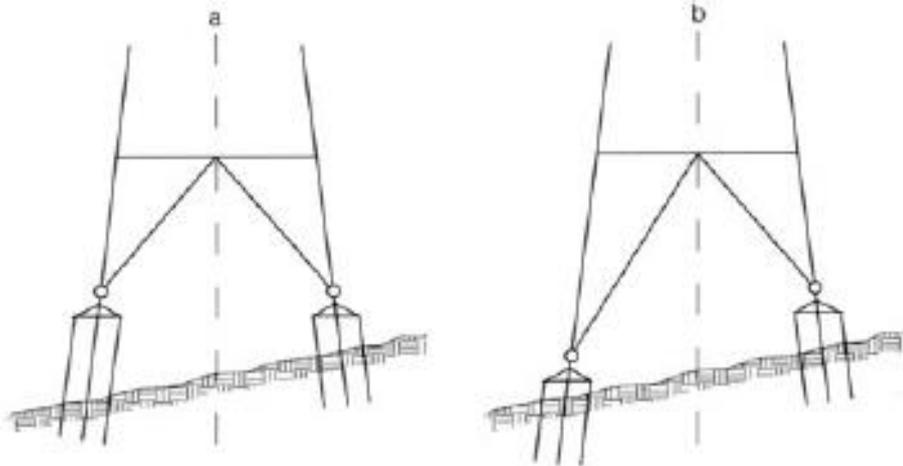


Nota. Tomado de *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão* (p.323), Labegalini, Fuchs y Almeida. (2005). Editora Edgard Blucher LTDA. Sao Paulo, Brasil.

Figura 6.

Compensación de las diferencias de altura del terreno en caso de cimentaciones separadas:

(a) *Extensión de pedestal de cimentación.* (b) *Extensión de patas de torre.*



Nota. Tomado de Overhead Power Line, Planning, Design, Construction (p.385), Kiessling, E & Nefzger, P & Nolasco, J & Kaintzyk, U (2003). Editorial Springer. Berlín, Alemania

1.6.4. Tipos de torre autoportada por su función.**1.6.4.1. Torre de suspensión.**

Son aquellas que se utilizan para soportar el peso de los conductores, en alineamiento o tramos rectos, o en casos que se tenga, ángulos de deflexión muy pequeños (menores a 3°), con respecto al cambio de dirección, de la trayectoria de la línea de transmisión. De otro lado, las estructuras de suspensión constituyen entre el 80, y 90%, del total de las estructuras consideradas en el diseño, de una línea de transmisión. De otro lado, durante condiciones normales de operación, las tensiones en los cables, no transfieren esfuerzos adicionales a estas estructuras (CFE, 2012). Por lo tanto, estas estructuras, son diseñadas, solo para soportar cargas verticales, y las fuerzas ejercidas por la presión del viento, actuando perpendicularmente, a la dirección de la trayectoria, de la línea de transmisión (CFE, 2012).

Figura 7

Torres de Suspensión.



Nota. Estas torres corresponden a la Línea de Transmisión en 220kV, Mantaro– Cotaruse-Socabaya.

1.6.4.2. Torre de Angulo.

Su uso, se da, cuando la línea de transmisión, tiene un cambio fuerte, de dirección. Este tipo de torres, se instalan, en los puntos de intersección, o inflexión, tales, que el eje transversal de la cruceta, biseca (divide) el ángulo formado por el conductor, igualando las tensiones longitudinales en los conductores, en los vanos adyacentes. En este sentido, las estructuras de ángulo, soportan las fuerzas ejercidas por la tensión de los cables, cuando la trayectoria de la línea, cambia de dirección. Por consiguiente, los ángulos de deflexión que

se recomiendan, para el diseño de este tipo de estructuras, oscilan entre los 5°, y 60°, dependiendo de las características, de la línea de transmisión (CFE, 2012).

Figura 8

Torres de Angulo en Línea de Transmisión de 220kV.



Nota. Estas torres corresponden a la Línea de Transmisión, Piura – Talara, en 220kV.

Figura 9

Torre de Angulo en Línea de Transmisión de 138kV.



Nota. Esta torre corresponde a la Línea de Transmisión, Aguaytía – Pucallpa, en 138kV.

Figura 10

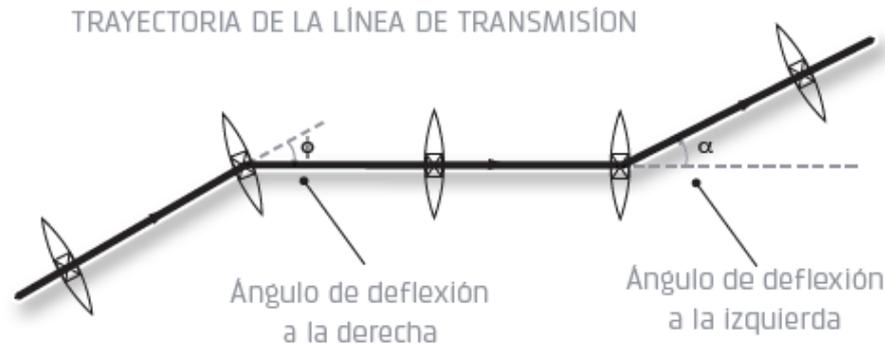
Torre de Angulo en Línea de Transmisión de 60kV.



Nota. Esta torre corresponde a la Línea de Transmisión, Caclic – Moyobamba, en 220kV.

Figura 11

Ubicación de torres de ángulo.



Nota: Tomado de Manual para el Diseño Electromecánico, de Líneas de Transmisión Aéreas (p.44), CFE (2012), Comisión Federal de Electricidad, México.

1.6.4.3. Estructuras de remate.

Estas estructuras, son diseñadas, para resistir la tensión permanente, del tendido de los conductores, en un solo lado. Generalmente, se colocan, al inicio y final de la línea de transmisión, con ángulos desde 0° , hasta 90° . De otro lado, se instalan, en tramos rectos, con longitudes muy grandes, ya que, no es recomendable, utilizar solamente, estructuras de suspensión, pues, en el caso de presentarse, una eventual rotura de cable, podría presentarse, la falla mecánica de todas las estructuras de suspensión (falla en cascada), por lo que, para evitar este evento indeseable, se instala estas estructuras intercaladas, con estructuras de suspensión, denominándose a estas por su ubicación, rompe-tramos (CFE, 2012).

Figura 12

Torre de Remate.



Nota. Esta torre corresponde a la Línea de Transmisión Tarapoto – Pongo del Caynarachi, en 60kV.

Figura 13

Torre de Remate.



Nota. Esta torre corresponde a la Línea de Transmisión Chilca – Marcona – Montalvo, en 500kV.

1.6.4.4. Torres para transposición.

Estas estructuras, sirven, para cambiar de la posición física, de las fases de un circuito específico (Ver figuras 14 y 15). Este tipo de estructuras, son consideradas, especiales, pues el diseño de las crucetas, es diferente, al de una estructura convencional (CFE, 2012).

Figura 14

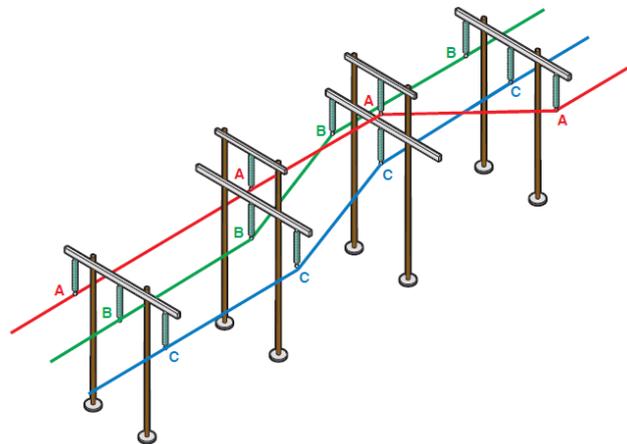
Torre para transposición



Nota. Esta torre corresponde a la Línea de Transmisión Moquegua – Puno, en 220kV.

Figura 15

Descripción grafica de transposición, de circuito, en simple terna, para una línea de transmisión.



Nota: Tomado de Manual para el Diseño Electromecánico de Líneas de Transmisión Aéreas (p.45), CFE (2012), Comisión Federal de Electricidad, México.

1.6.5. Cimentaciones para torres autoportadas.

“Las cimentaciones, son capaces, de transmitir las cargas, desde la estructura superior, hacia el suelo, donde, para su diseño, es necesario un estudio geotécnico, el que permitirá determinar, los parámetros característicos del suelo, como la presión admisible, nivel freático, ángulo de fricción, entre otros” (Chávez y Paz, 2020). De otro lado, “el tipo de cimentación más adecuado para las torres de una determinada Línea de transmisión, desde el punto de vista técnico y económico, no se puede fijar a priori, ya que depende de un análisis que involucre la magnitud de las cargas, así como, de las condiciones del suelo, como la logística para su implementación, es decir, depende de la mano de obra, materiales y el equipo necesario, para su ejecución” (Simonetti,2012).

Los tipos de cimentación más utilizados en torres metálicas de celosía autoportantes son:

- Parrillas o Grilla.
- Zapata aisladas.
- Losa de Cimentación.
- Tubulares o Pilas Acampanadas.

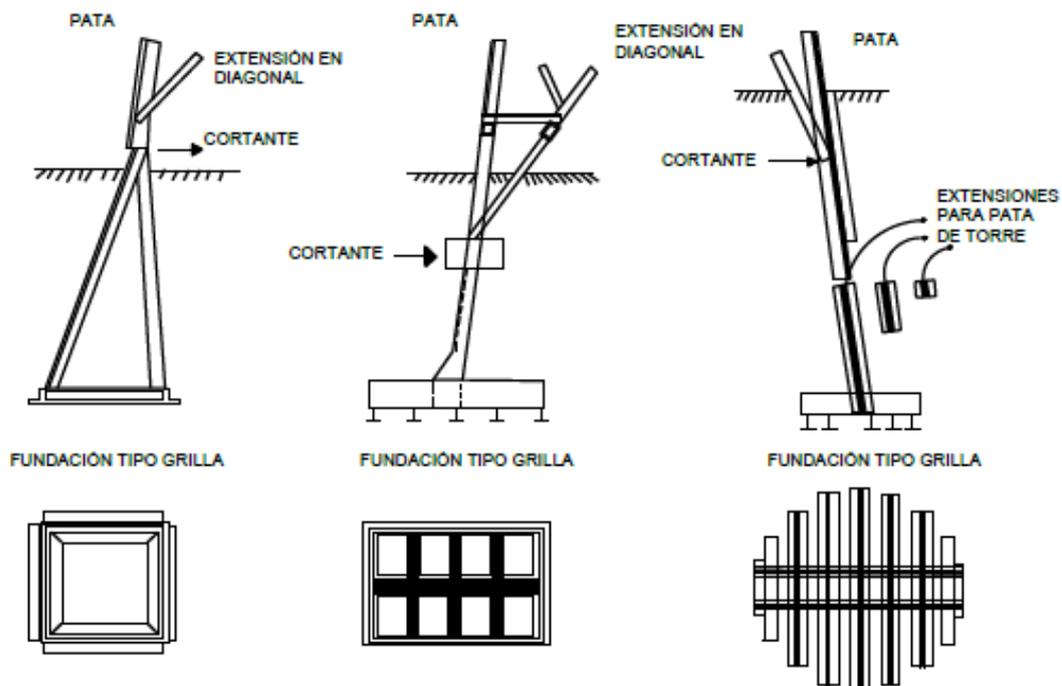
1.6.5.1. Cimentaciones tipo parrilla o grilla.

Las cimentaciones tipo grilla, más conocidas, son de tres tipos. En la Figura 16, muestra, una configuración tipo piramidal, en la que el stub principal, está conectado, con cuatro stubs, más pequeños, los cuales, a su vez, están conectados a la parrilla, de la base (IEEE Std 691, 2001). Las principales ventajas, de este tipo de cimentación, son, su bajo costo de fabricación, y la facilidad de instalación, pues la torre, puede ser montada, inmediatamente, se termine la construcción del cimiento (IEEE Std 691, 2001). Otra ventaja mencionada por Labegalini (2005), es que se compran junto con la estructura de la torre.

Por otro lado, una desventaja importante, es que tiene menos resistencia a la agresividad del terreno natural. Por lo tanto, se deben tomar medidas de protección adicionales, además del galvanizado de piezas metálicas, especialmente en lugares con suelos agresivos (VELOSO, 2010).

Figura 16.

Cimentaciones tipo parrilla.



Nota. Tomado de Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing (p.24), IEEE Std 691 (2001). The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Figura 17.

Cimentaciones tipo parrilla.



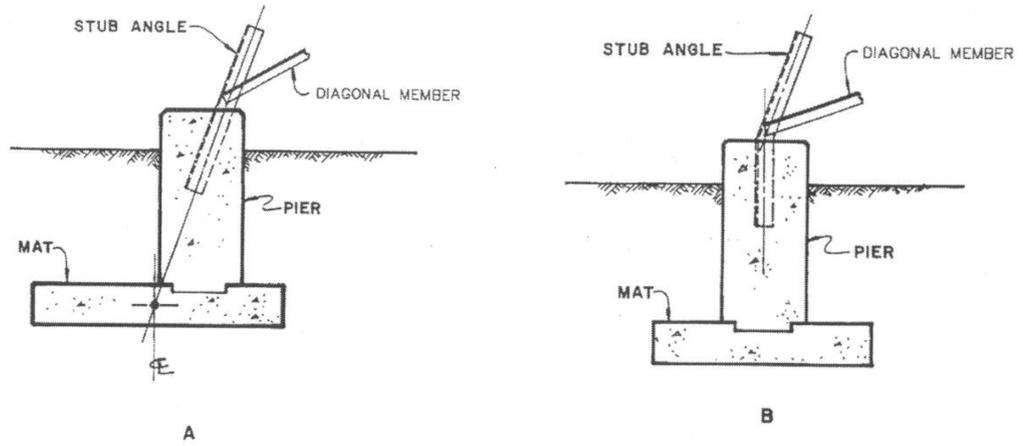
Nota. Cimentaciones tipo parrilla, en almacén de obra, del proyecto, línea de transmisión Tocache Bellavista, en 138kV, San Martín, Perú.

1.6.5.2. Zapatas aisladas.

Esta cimentación, consiste en losa y un pedestal, construido, a base de concreto armado (Chávez & Paz, 2020). Así mismo, se tienen dos configuraciones típicas, que dependen del ángulo del stub. En el primer caso, el stub, es doblado, de manera, que el pedestal, y la base, estén centrados, como se muestra, en la Figura 18 B. En el otro caso, se ubica el pedestal, de tal manera que la proyección del stub, se intercepte, con el centroide de la base, como se indica, en la Figura 18A (Chávez & Paz, 2020).

Figura 18.

Configuraciones típicas de zapatas aisladas.



Nota. Tomado de Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing (p.27), IEEE Std 691 (2001). The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Figura 19.

Zapata para una torre autosportada.

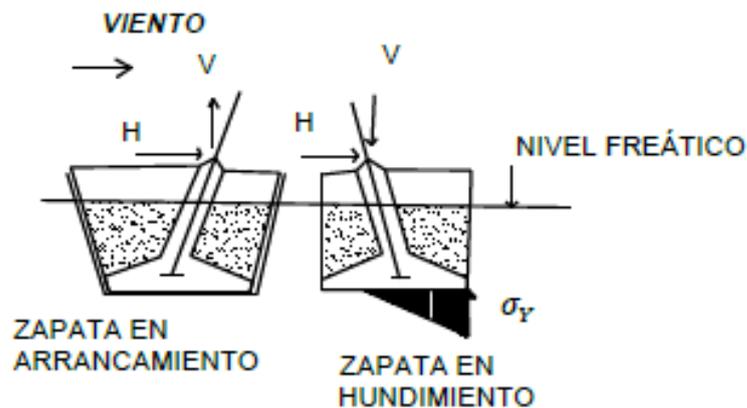


Nota. Tomado de Fundações Superficiais de Linhas de Transmissão Submetidas a Esforços de Tração (p.21). Garrido (2009), Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul.

Estas zapatas están ubicadas en correspondencia, con las patas de la torre, y están sometidos preponderantemente, a acciones verticales alternativas: al arranque y al hundimiento, según la dirección del viento (Ruiz, 2018). El concepto de “arrancamiento” o extracción del cimiento, atrae la atención por tratarse de un caso especial y atípico en el diseño de fundaciones, ya que el suelo, que rodea a la zapata por encima de la cota de fundación, debe colaborar con su peso y su resistencia, para evitar la extracción del cimiento (Ruiz, 2018).

Figura 20.

Zapatas aisladas, en situación de arrancamiento, y hundimiento.



Nota. Tomado de Soluciones Para el Diseño y Construcción de Cimentaciones en Torres de Transmisión Eléctrica, de Alta Tensión (p.41). Ruiz (2018), Universidad del Salvador.

1.6.5.3. Losa de cimentación.

En esta cimentación, las patas de la torre, autosportada, están sobre una losa de cimentación, de concreto armado. Este tipo de cimentación, se emplean, cuando la capacidad portante del suelo es muy baja, dado que, el uso de zapatas aisladas, resultarían, demasiado grandes, y juntas (Ruiz, 2018).

Figura 21.

Losa de cimentación, para torre de celosía, en línea de transmisión, de 110kV.



Nota. Tomado de Overhead Lines, CIGRE Green Books (p.967), Konstanting, P (2017), CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.

Figura 22.

Construcción de Losa de Cimentación, para torre de celosía, en línea de transmisión, de 330kV



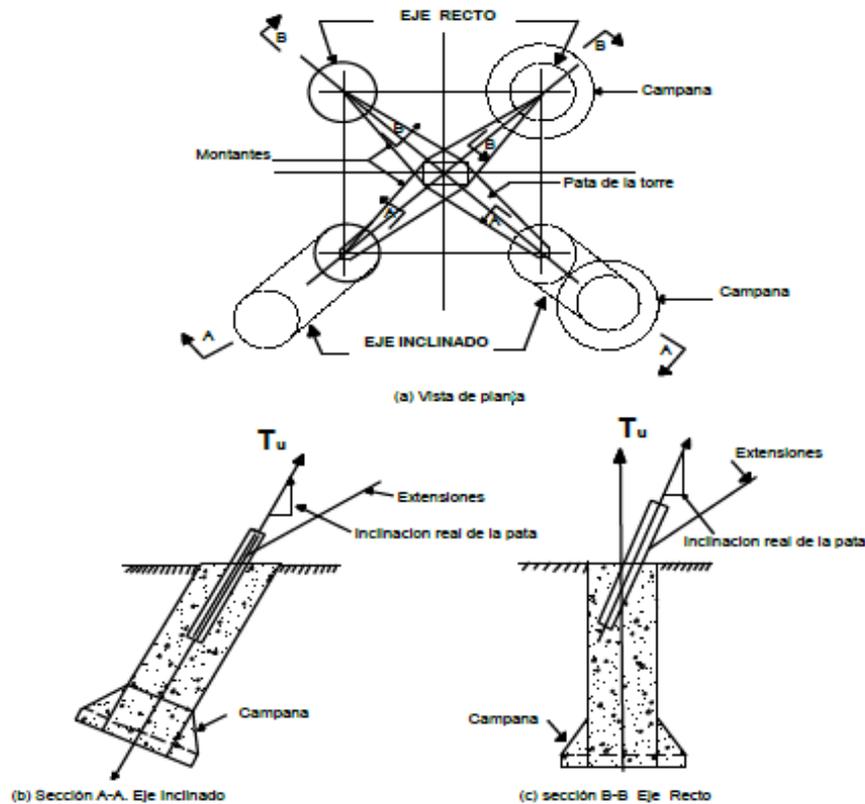
Nota. Tomado de Overhead Lines, CIGRE Green Books (p.935), Konstanting, P (2017), CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.

1.6.5.4. Tubulares o pilas acampanadas.

Las cimentaciones de pilas acampanadas, son también conocidas como, “patas de elefante”, resultan ser convenientes, cuando, las torres de transmisión, que presentan grandes momentos de vuelco. De otro las, tienen la capacidad, de trasladar las cargas, a estratos, medianamente profundos (Ruiz, 2018). De otro lado, este tipo de cimentación, puede ser instalada, verticalmente, o simulando la dirección de la pata (Ruiz, 2018).

Figura 23.

Cimentación, de pila acampanada.



Nota. Tomado de Soluciones para el diseño y construcción de cimentaciones, en torres de transmisión eléctrica, de alta tensión (p.44), Ruiz (2018), Universidad de El Salvador.

1.6.5.5. Pilotes.

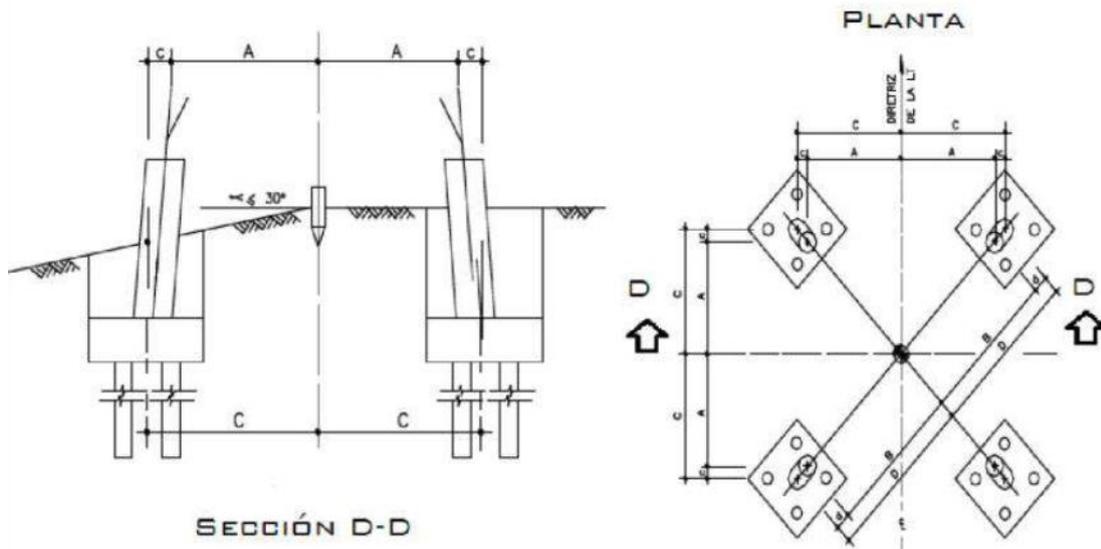
Son cimentaciones profundas que se utilizan cuando el suelo tiene poca resistencia a pequeñas profundidades y / o el nivel del agua hace que no sea práctico utilizar otro tipo de cimentación.

Las cimentaciones de pilotes (figura 24) generalmente están formadas por pilotes verticales e inclinados empotrados en un bloque, que realiza la transición de esfuerzos entre la estructura de la torre y los pilotes. Los pilotes inclinados están diseñados para absorber tensiones horizontales. Los tipos más utilizados en las líneas de transmisión son: hormigón

armado prefabricado y metálico (Simonetti,2012).

Figura 24.

Cimentación con pilotes.



Nota. Tomado de Metodología del diseño geotécnico de las cimentaciones, en líneas de transmisión (p.40), Chávez & Paz (2020), PIRHUA.

1.6.5.6. Micropilotes helicoidales.

son un sistema de fundación profunda, constituida por piezas metálicas, son usados para apoyar o resistir cualquier carga u aplicación. Este tipo de micropilotes, esta básicamente compuesto, por un eje central de acero macizo o hueco de sección cuadrada o circular, el cual a lo largo de su desarrollo, está compuesto por uno o más platos helicoidales, también llamados hélices o anclas, los cuales van soldados a la sección y tienen la misión de transferir las cargas de la estructura al estrato firme del suelo (Portalino, 2022).

Figura 25.

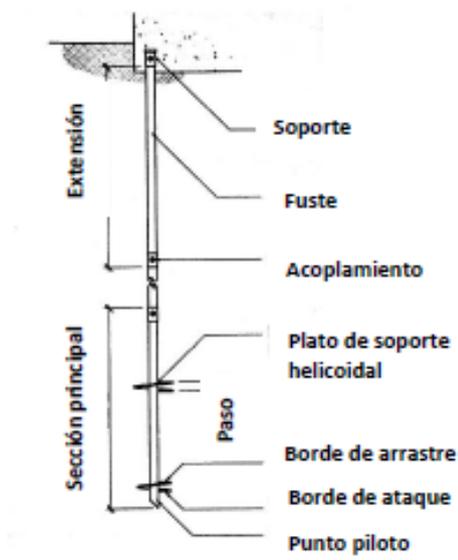
Cimentación con micropilotes.



Nota. Tomado de, Alternativa de fundación con micropilotes helicoidales para torres de telecomunicación en suelos granulares (p.48), Portalino (2022), UPC.

Figura 26.

Partes de un pilote helicoidal.



Nota. Tomado de, Diseño de pilotes helicoidales para el soporte de la cimentación de una torre de alta tensión (p.2), Anfossini (2020), PUCP.

1.6.6. Definiciones de Vano.

Es la distancia entre dos estructuras adyacentes, la cual esta medida horizontalmente (ASCE N° 74, 2020).

1.6.6.1. Vano Adelante.

El vano adelante, es la distancia hacia adelante de una estructura (en la dirección de aumento de la numeración de estructura ascendente). En la figura 27, el tramo 2, es el vano hacia adelante de la Estructura 11.

1.6.6.2. Vano atrás.

El vano atrás, es la distancia hacia atrás de una estructura (en la dirección de disminución de la numeración de estructura descendente). En la figura 27, el tramo 1 es el atrás de la Estructura 11.

1.6.6.3. Vano peso.

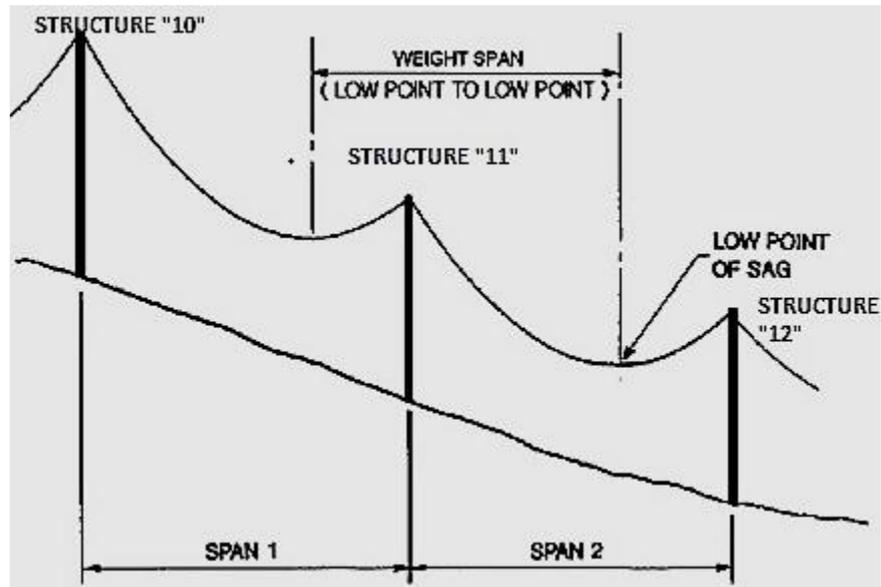
El vano peso, es la distancia horizontal, entre los puntos bajos de la catenaria, que se dan, en dos vanos adyacentes. Se utiliza, para calcular la carga vertical, que el conductor impone a la estructura de soporte (Figura 27).

1.6.6.4. Vano Viento.

Es el promedio matemático del vano atrás y el vano adelante. Se utiliza para calcular, la carga de viento, que el conductor impone a la estructura de soporte.

Figura 27.

Descripción grafica de vanos.



Nota: Tomado de Manual ACSE Engineering Practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.117), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

1.6.7. Fallas mecánicas en líneas de transmisión.

1.6.8. Cascada de líneas o múltiples fallas de soporte

Las cascadas de soportes de líneas eléctricas son (desafortunadamente) ejemplos clásicos de fallas por colapso progresivo, y las Figuras 28, 29, 30, 31 y 32, ilustran accidentes recientes (Konstanting, 2017).

Figura 28.

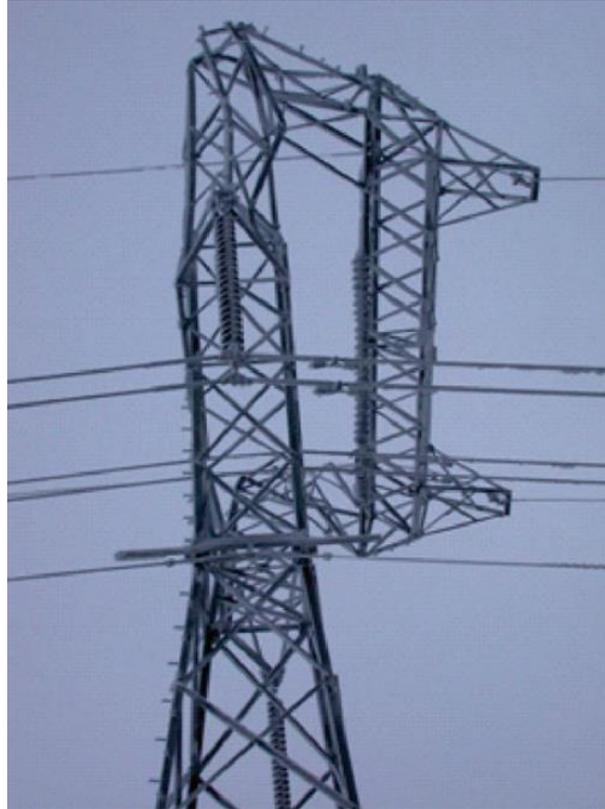
Falla en cascada longitudinal, línea de transmisión em 735 kV, en Canadá durante la Gran Tormenta de Hielo, de enero de 1998.



Nota. Tomado de Overhead Lines, CIGRE Green Books (p.256), Konstanting, P (2017), CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.

Figura 29.

Primer plano del fallo de la cima de una torre en una cascada longitudinal sobre 11 apoyos de una línea de 500 kV en Oregón (EE.UU.)



Nota. Tomado de Overhead Lines, CIGRE Green Books (p.256), Konstanting, P (2017), CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.

Figura 30.

Primer plano del fallo de la cima de una torre, falla en cascada de una línea de 220 kV .



Nota. Tomado de Overhead Lines, CIGRE Green Books (p.1116), Konstanting, P (2017), CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.

Figura 31.

Cascada transversal en la línea de transmisión de 400 kV Rubí-Vandellós-Pierola, en España, durante una tormenta de viento de alta intensidad, en 2008.



Nota. Tomado de Overhead Lines, CIGRE Green Books (p.257), Konstanting, P (2017), CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.

Figura 32.

Cascada transversal de cinco torres de 400 kV debido a una tormenta de viento de alta intensidad, en mayo de 2006 en la República Checa.



Nota. Tomado de Overhead Lines, CIGRE Green Books (p.257), Konstanting, P (2017), CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.

Es de destacar que el estudio del colapso progresivo de estructuras ha surgido como un dominio de investigación específico en ingeniería estructural sólo en la última década (Konstanting, 2017). Si bien las sucesivas fallas de varias torres no siempre son el resultado de un efecto dominó, a menudo lo son. Aquí se adopta la definición de cascadas utilizada en la norma internacional IEC 60826 (p.109); "... progresión incontrolada de fallas (cascadas) que de otro modo podrían extenderse mucho más allá de la sección fallida, cualquiera que sea la extensión de la falla inicial". Es útil distinguir entre cascadas desencadenadas por efectos verticales y longitudinales (Figuras 28, 29 y 30) y efectos transversales (Figuras 31 y 32) para comprender cómo ocurren, mientras que la mitigación en cascada debe abarcarlos

a todos (Konstanting, 2017).

las características más destacadas de las fallas en cascada, más importantes de la historia de las líneas aéreas, con más énfasis en las más catastróficas cascadas de líneas que ocurrieron en los últimos 20 años. Dados por eventos desencadenantes (rotura de accesorios de conductores, alambres y conductores de blindaje, y fallas de soporte) que ocurren sistemáticamente durante condiciones climáticas extremas, como tormentas de viento de alta intensidad (ráfagas y tornados), huracanes, vientos sinópticos extremos a gran escala y formación de hielo (Konstanting, 2017).

En países como, Australia, Brasil, Japón, Sudáfrica, se prescriben algunos criterios de carga de diseño, para prevenir o mitigar los efectos de las fallas en cascada, de las torres de líneas áreas, en alta tensión. También es práctica habitual en aquellos países con condiciones severas de formación de hielo, instalar estructuras de tope de refuerzo o soportes anti-cascada con un intervalo promedio de 10 vanos (4 a 5 km) (Konstanting, 2017, p.262).

1.6.9. Fallos de cimentación

Las fallas en los cimientos de la estructura de transmisión pueden ocurrir como resultado de un diseño deficiente o una instalación incorrecta (Konstanting, 2017, p.1115).

Las causas típicas de tales fallas incluyen:

- Errores en los cálculos de diseño.
- Parámetros de resistencia del suelo recopilados o asumidos incorrectamente.
- Materiales defectuosos utilizados.
- Relleno inadecuado.
- Refuerzo o pilotes insuficientes.

Además, pueden ocurrir fallas en la base de la transmisión debido a la falla de otros componentes de la línea, como un aislador suspensión o una cadena de anclaje. En este

sentido, la falla catastrófica de una sola cimentación puede provocar fallas en cascada de varias estructuras, especialmente si una línea de transmisión no tiene disposiciones para estructuras anti-cascada o de tipo “parada” (Konstanting, 2017, p.1116), como se muestra en las siguientes figuras.

- Los siguientes son dos ejemplos de fallas de cimientos.
- Falla de cimentación en torre de 220kV, que involucra efecto de falla de torres en cascada.

Figura 33.

Falla de cimentación de torre de transmisión de 220kV, por efecto Uplift



Nota. Tomado de Overhead Lines, CIGRE Green Books (p.1115), Konstanting, P (2017), CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.

Figura 34.

Falla de cimentación, en torre de transmisión de 220kV, por efecto de cascada.



. Nota. Tomado de Overhead Lines, CIGRE Green Books (p.1116), Konstanting, P (2017), CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France.

CAPÍTULO II. MÉTODO

2.1. Enfoque.

El enfoque considerado para esta investigación, es el cuantitativo, el cual según Hernández (2014), “se utiliza la recolección de datos, para probar una hipótesis, con base en la medición numérica, y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento, y probar teorías” (p.4). Por lo tanto, esta investigación, tiene este enfoque, por que utiliza, la recolección de datos, con medición numérica, para corroborar una hipótesis, siguiendo patrones predecibles y estructurados, que intenta generalizar los resultados encontrados, de una muestra, a una colectividad mayor (universo o población), pretendiendo confirmar y predecir, los fenómenos investigados, buscando regularidades, y relaciones causales entre elementos.

2.2. Tipo de investigación.

De acuerdo al propósito de investigación, es aplicada, porque se utiliza conocimientos difundidos, aplicándolas a un ambiente delimitado y específico.

2.3. Diseño de la Investigación.

La investigación es no experimental, el cual según Hernández (2014), dice, que, “que una investigación no experimental, son estudios, que se realizan sin la manipulación deliberada de variables, y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural, para analizarlos” (p.152). Por lo tanto, esta investigación, es descriptiva, porque, se observan situaciones ya existentes, no provocadas intencionalmente en la investigación, por quien la realiza. Además, solo se contemplará los fenómenos en su estado natural, para luego poder analizarlos. De otro lado, la investigación también es de, diseño transversal, ya que, para la recolección de datos necesarios, y poder describir y analizar la variable, se realizará a través

de un mismo tiempo (Hernández, 2014, p.154). Así mismo, es una investigación descriptiva, ya que se indagan, la incidencia de las modalidades, categorías, o niveles de una o más variables en una población, es decir, son estudios puramente descriptivos (Hernández, 2014, p.155).

Figura 35.

Esquemización del diseño de la investigación.



Nota: Esquema de investigación.

2.4. Población y Muestra.

2.4.1. Población

En la presente investigación, se considera como población, las líneas de transmisión de energía del Perú que operan en alta tensión.

Para determinar la población, se establecieron los siguientes criterios de inclusión e exclusión.

- a. **Criterio de inclusión:** Líneas de transmisión, con torres autosportadas, que operan con tensiones de 60kV, 138kV y 220kV, las cuales están, dentro los límites comprendidos entre, $35 \text{ kV} < U \leq 230 \text{ kV}$, establecidos, en el código nacional de electricidad, suministro 2011, para alta tensión y que son las tensiones recomendadas para la construcción de nuevos proyectos.

- b. Criterio de exclusión:** Líneas que operan a voltajes mayores a 230kV, ya que es considerada muy alta tensión (CNE, 2011). Por otro lado, se excluye, líneas de transmisión, las cuales, sus estructuras de soportes están conformada por postes, torres atirantadas y o torres autoportadas que posean, cimentaciones profundas.

2.4.2. Muestra

Según Hernández (2010), “menciona que la muestra, es un subgrupo de la población de interés, sobre el cual se recolectan datos y que tiene que definirse o determinarse de ante mano con precisión” (p. 154). Es así, que, con la finalidad de poder determinar la muestra, emplearemos el método no probabilístico, que consiste en seleccionar a los individuos que convienen al investigador, la cual será una línea de transmisión en 138 kV, ubicada en el departamento de Madre de Dios, que representará a todas las líneas de transmisión, en 138kV, construidas para nuestra amazonia, en selva baja.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.

2.5.1. Técnicas.

Se utilizo, la técnica de la revisión documental, para la recolección de datos, ya que se revisó estudios de suelos y los planos, de una línea de transmisión, para poder, en base a estos datos diseñar los diferentes tipos de cimentaciones superficiales. Además, se recolecto información del reglamento nacional de construcción, normas internacionales ACSE y normas IEEE.

2.5.2. Instrumentos

Para la recolección de información, se utilizó hojas en Excel, que permitieron registrar los resultados de los cálculos manuales y numéricos realizados, con softwares, que

trabajan con el método del elemento finito, para así poder hacer evaluaciones, de las variables, en la presente investigación.

2.5.3. Validez y confiabilidad de los instrumentos

Para determinar la validez, y confiabilidad de los instrumentos, se utilizó, la opinión y el visto bueno, de expertos en el tema, en la especialidad, de ingeniería civil, de nuestra casa superior de estudios, sede Trujillo.

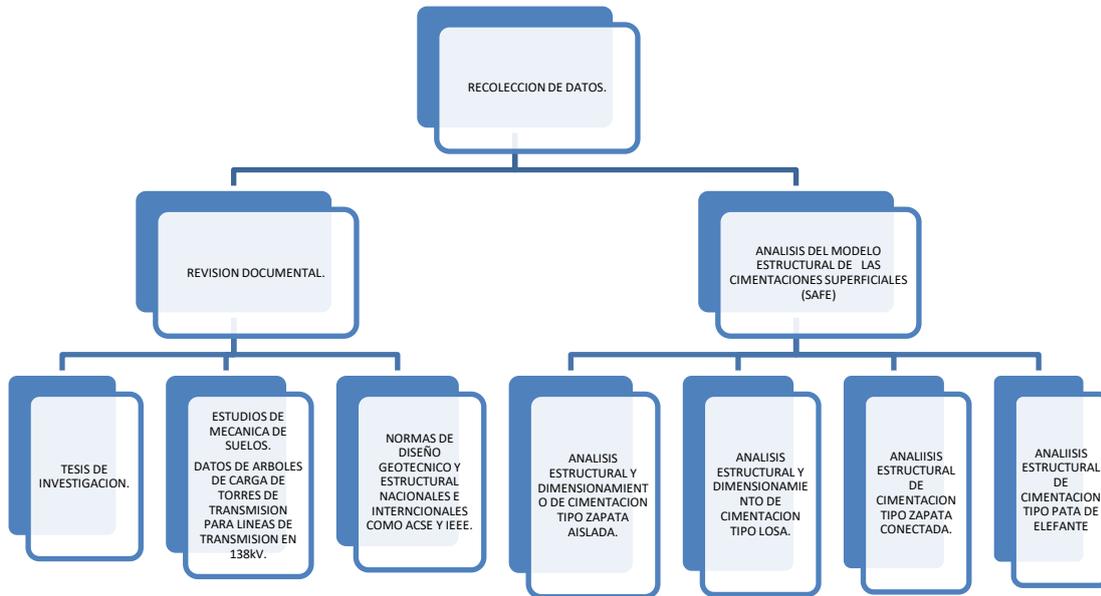
2.6. Procedimiento.

2.6.1. Para recolectar la información.

El procedimiento aplicado para recolectar datos para este estudio, respeta el esquema elaborado por el investigador; en ese aspecto, se procedió, a recolectar información como tesis de investigación, normas de diseño y construcción, estudios de suelos y cargas diseño, para la línea de transmisión en 138kV, tomada como muestra. Por otro lado, se realizó un modelamiento estructural, de cuatro cimentaciones superficiales como, son de zapatas aisladas, losa de cimentación, zapatas conectadas y cimentación tipo pata de elefante, para así, obtener su dimensionado, para posteriormente evaluar el costo e influencia, en la construcción, de la línea de transmisión, estudiada (ver figura 36).

Figura 36.

Esquema para recolección de datos



Nota: Detalle para recolección de datos, el presente trabajo de investigación.

2.6.2. Para analizar la información.

Los instrumentos, para analizar la información de los datos obtenidos en la investigación, son los gráficos que se usan, para representar las cargas, momentos flectores de las cimentaciones. Así mismo, esos valores se registrarán en tablas hechas en Excel, para posteriormente ingresara esos datos a software de cálculos numéricos el elemento finito como SAP2000, SAFE, cuyos resultados se registran en la misma tabla, lo cual permitirá hacer evaluaciones de las diferentes variables, procediendo a redactar, el informe usando office 2019.

2.7. Aspectos éticos de la investigación.

Se cito, a todas las fuentes que han sido consultadas, y consideradas en esta investigación, como son, las normas, estudios de suelos, planos y software para modelamiento de estructuras, los cuales, se utilizaron solo, con fines académicos, basándonos en el método científico. Todos los resultados, se presentan sin alterar datos reales. Además, el desarrollo de esta investigación, no causará un impacto severo al medio ambiente por manejo inadecuado de residuos u otros agentes contaminantes, ya que, por tratarse de una investigación descriptiva, ofrece el menor riesgo de uso de elementos, perjudiciales para el ambiente, y daños a las personas.

2.8. Sistema estructural de una línea de transmisión

Una línea de transmisión, consta, de dos sistemas estructurales distintos; el sistema de soporte estructural, y el sistema de cables. El sistema de soporte estructural y los sistemas de cables a menudo, se consideran por separado, aunque están unidos y responden a la carga como un solo sistema (ASCE N° 74, 2020, p.2).

2.8.1. Sistema de cables.

El sistema de cables consta de conductores y cables aéreos de tierra / blindados e incluye todos los componentes, como aisladores y otros accesorios utilizados para unir los cables a las estructuras de soporte. La mayor parte de la carga, en las estructuras de las líneas de transmisión se atribuye, al sistema de cables bajo la gravedad, y cargas ambientales (es decir, viento y hielo y viento combinados). Además, gran parte del comportamiento inusual y los desafíos de carga que enfrenta el diseñador de la línea son generados por el sistema de cables (es decir, tensiones desequilibradas, vibración del cable, galope e impactos de cables rotos). Por lo tanto, es fundamental tener un conocimiento profundo del sistema de cableado

para comprender la carga y la respuesta del sistema de línea de transmisión en general. Las cargas aplicadas a las estructuras de soporte, se describen típicamente en relación con la alineación, de la línea de transmisión. Las cargas longitudinales, se aplican a la estructura en paralelo a la línea de transmisión, y son causadas por tensiones desiguales de los cables en los tramos adyacentes, terminaciones de cables o fallas de cables / torres. Las cargas transversales, se aplican normalmente a la línea de transmisión y son el resultado del viento, en el sistema de cables (cables desnudos o cubiertos de hielo), más la tensión del cable resultante de un ángulo de línea (si existe). Las cargas verticales, se deben al peso propio de los cables y accesorios, el componente vertical de la tensión del cable y el hielo acumulado (ASCE N° 74, 2020, p.2).

2.8.2. Sistema de soporte estructural

El sistema de soporte estructural consta de las torres y cimientos, que soportan la carga de los cables, aisladores, y accesorios de cables. También resiste el viento y las cargas combinadas, de hielo y viento, en el sistema de cables, así como las cargas de viento y hielo, en los componentes estructurales. El sistema de soporte estructural, o estructura, es un elemento esencial de una línea de transmisión. Cada estructura generalmente se evalúa por separado, aunque están unidas por cables, que pueden transferir carga y hacer que actúen como un solo sistema. Se puede considerar evaluar la estructura como parte de un sistema y considerar los efectos de resistencia de los cables que los unen (ASCE N° 74, 2020, p.3).

2.8.3. Diseño estructural de líneas de transmisión.

2.8.3.1. Cargas.

2.8.3.1.1. Cargas relacionadas con el clima.

Las cargas relacionadas con el clima en las estructuras y los cables de las líneas de transmisión están asociadas con el viento, el hielo y la temperatura o una combinación de esas cargas. La presión atmosférica, y la topografía local, pueden influir en las características, de las cargas relacionadas con el clima. Estas influencias, deben ser consideradas, cuando sea apropiado, con base en el juicio de ingeniería, la opinión de expertos y la experiencia práctica anterior (ASCE N° 74, 2020, p.10).

La carga transversal en las estructuras, y equipo, deberán ser calculadas, aplicando, la adecuada presión de viento horizontal, en ángulos rectos, hacia la dirección de la línea, según, la Regla 250, del código nacional de electricidad CNE (2011).

Las cargas de viento horizontales o presiones debidas al viento, deberán aplicarse a las áreas proyectadas de los alambres, que están siendo sostenidos y a las estructuras de soporte y aisladores. Se deberá utilizar la siguiente fórmula, para calcular las cargas de viento, en las áreas proyectadas CNE (2011).

$$P_v = K * V^2 * S_f * A$$

Donde:

P_v : Carga, en Newtons

K : Constante de presión

K : 0,613, para las elevaciones hasta 3 000 m.s.n.m.

K : 0,455, para las elevaciones mayores de 3 000 m.s.n.m.

V : Velocidad del viento, en m/s

S_f : Factor de forma (véase las Reglas 251.A.2 y 252.B.2, del CNE)

A : Área proyectada, en m²

Esta carga deberá ser calculada, sin cobertura de hielo. (CNE,2011).

Según ASCE/SEI 7-16, 2017, La fuerza del viento que actúa, sobre la superficie de los componentes, de la línea de transmisión, también se puede determinar, utilizando la expresión, de la fuerza del viento, que se muestra, en la siguiente ecuación:

$$F = Q * K_z * K_{zt} * V^2 * G_t * C_f * A$$

Dónde:

F : Fuerza del viento, en lb o N.

G_t : Factor de respuesta a ráfagas, para conductores, cables de tierra y estructuras.

C_f : Coeficiente de fuerza.

A : Área proyectada, en el plano normal a la dirección del viento, en ft² o m²;

Q : Coeficiente de densidad del aire = 0,00256 mph (0,613 m/s) (ASCE N° 74,2020, p.21).

K_z : Coeficiente de exposición a la presión del viento, que modifica la presión del viento de referencia, para varias alturas sobre el suelo, en función, de las diferentes categorías de exposición.

K_{zt} : Factor topográfico.

V : Velocidad de ráfagas de viento de referencia de 3 segundos [mph (m / s)], a 33 pies (10 m) sobre el suelo en terreno abierto, para periodos de retorno (MRI) de 10, 25, 50, 100, 300, 700, 1700 y 3000 años, las cuales se tomarán del CNE y/o RNC (NORMA E.020,2006).

Según la Norma E.020 (2016); La velocidad de diseño, para viento, hasta una altura, de 10 m, será la velocidad máxima, adecuada, a la zona de ubicación de la estructura, pero no menor de, 75 Km/h. La velocidad del viento se obtendrá, con la siguiente expresión:

$$V_h = V (h/10)^{0.22}$$

Dónde:

- V_h : Velocidad de diseño, en la altura h, en km/h.
V : Velocidad de diseño, hasta 10m de altura h, en km/h.
h : Altura del terreno, en metros.

Así mismo, las torres de transmisión estarían clasificadas, dentro de las edificaciones, tipo 3, donde, para este tipo de estructuras, las presiones de diseño se determinarán, a partir de procedimientos analíticos, reconocidos, en la ingeniería (NORMA E0.20, 2016, p.20).

2.8.3.1.2. Cargas de viento, hielo y hielo combinado con viento.

Según, el CNE (2011), se reconocen, tres zonas de carga generales, denominadas:

- Zona A, zona ligera,
- Zona B, zona regular
- Zona C, zona fuerte

De otro lado, existen, cuatro áreas de carga, dependientes de la altitud, superpuestas en estas zonas, denominadas como:

- Área 0, para alturas, menores de, 3 000 m.s.n.m.,
- Área 1, para alturas entre, 3 000 a 4 000 m.s.n.m.,
- Área 2, para alturas entre, 4 001 a 4 500 m.s.n.m.,

- Área 3 , para alturas que sobrepasen, los 4 500 m.s.n.m.,

Las zonas de carga, A, B y C, incluyen cargas de viento, y las áreas de carga 1, 2 y 3, incluyen las cargas de viento, incrementadas, con las cargas de hielo. En la Figura 37, se aprecia las ubicaciones donde, se aplican estas cargas.

Las Tablas 250-1.A y 250-1.B, del CNE, muestran la presión del viento, y el grosor radial del hielo, que se utilizarán para calcular las cargas. Se supone que el hielo tiene una densidad de, 913 kg/m³.

Tabla 01.

Viento y temperatura, para las zonas de carga A, B y C, según la Tabla 250-1.A, del código nacional de electricidad.

Zona de Carga	A Ligera	B Regular	C Fuerte
Velocidad horizontal del viento	19,5 m/s (70 km/h)	22,2 m/s (80 km/h)	25 m/s (90 km/h)
Temperatura	20 °C	15 °C	10 °C

Nota: Tomado de Código nacional de electricidad suministro 2011, CNE (2011, p.212), MEM.

Tabla 02.

Viento, hielo y temperatura, para las áreas de carga 1, 2 y 3, según la Tabla 250-1.B, del código nacional de electricidad.

Tabla 250-1-B
Viento, hielo y temperatura para las áreas de carga 1, 2 y 3
(Para ser utilizado con la Regla 250.B)

Zona de carga	Área 0 elevación menor de 3 000 m.s.n.m.	Área 1 elevación 3 000-4 000 m.s.n.m.	Área 2 elevación 4 001-4 500 m.s.n.m.	Área 3 elevación a partir de 4 500 m.s.n.m.
Caso de sólo viento				
Velocidad horizontal del viento	26 m/s (94 km/h)	29 m/s (104 km/h)	31,5 m/s (113 km/h)	33,5 m/s (120 km/h)
Temperatura °C	10 °C	5 °C	0 °C	-5 °C
Caso de sólo hielo				
Grosor radial del hielo mm	No hay	6 mm	25 mm	50 mm
Temperatura	0 °C	0 °C	-5 °C	-10 °C
Caso combinado de hielo y viento				
Grosor radial del hielo	No hay	3 mm	12 mm	25 mm
Velocidad horizontal del viento	14 m/s (50 km/h)	14,5 m/s (52 km/h)	15,5 m/s (56 km/h)	17 m/s (61 km/h)
Temperatura	5 °C	0 °C	-5 °C	-10 °C

Nota: Tomado de Código nacional de electricidad suministro 2011, CNE (2011, p.212), MEM.

Figura 37.

Zonas de carga en el Perú, para determinación de velocidades de viento.

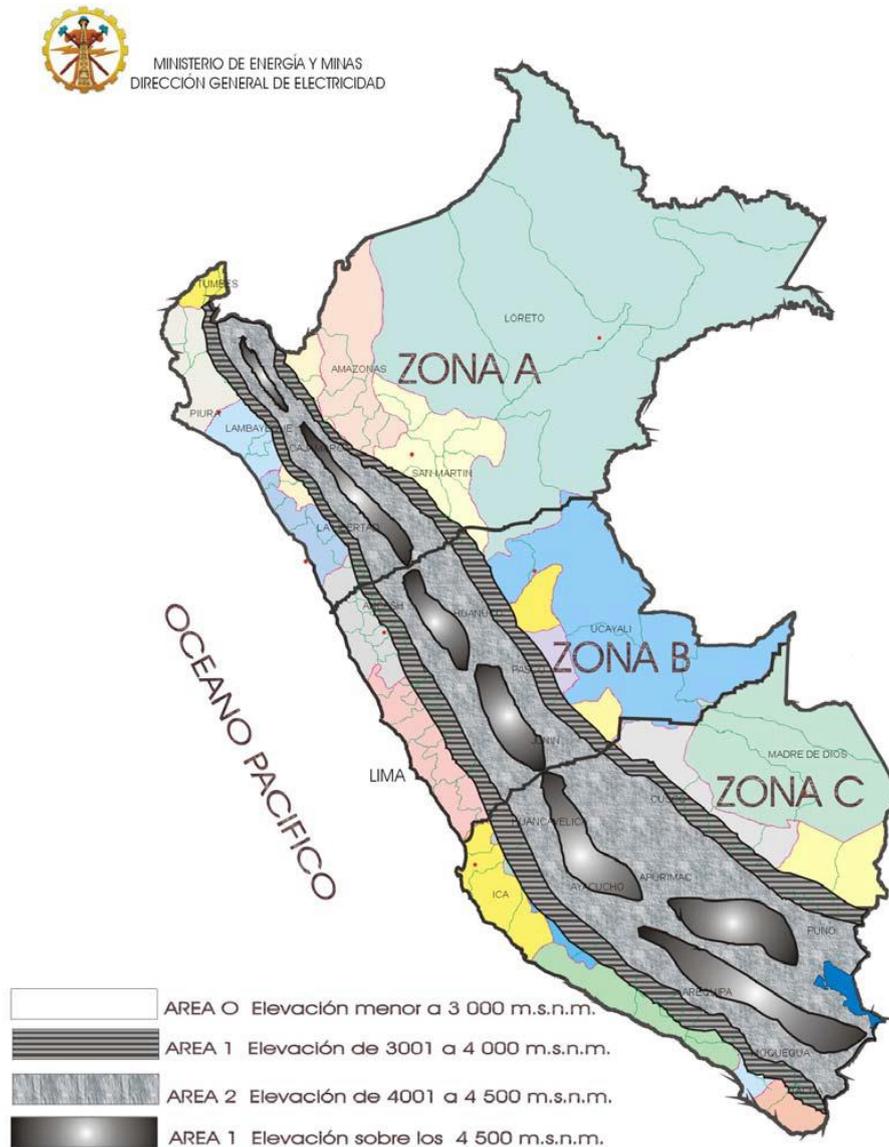
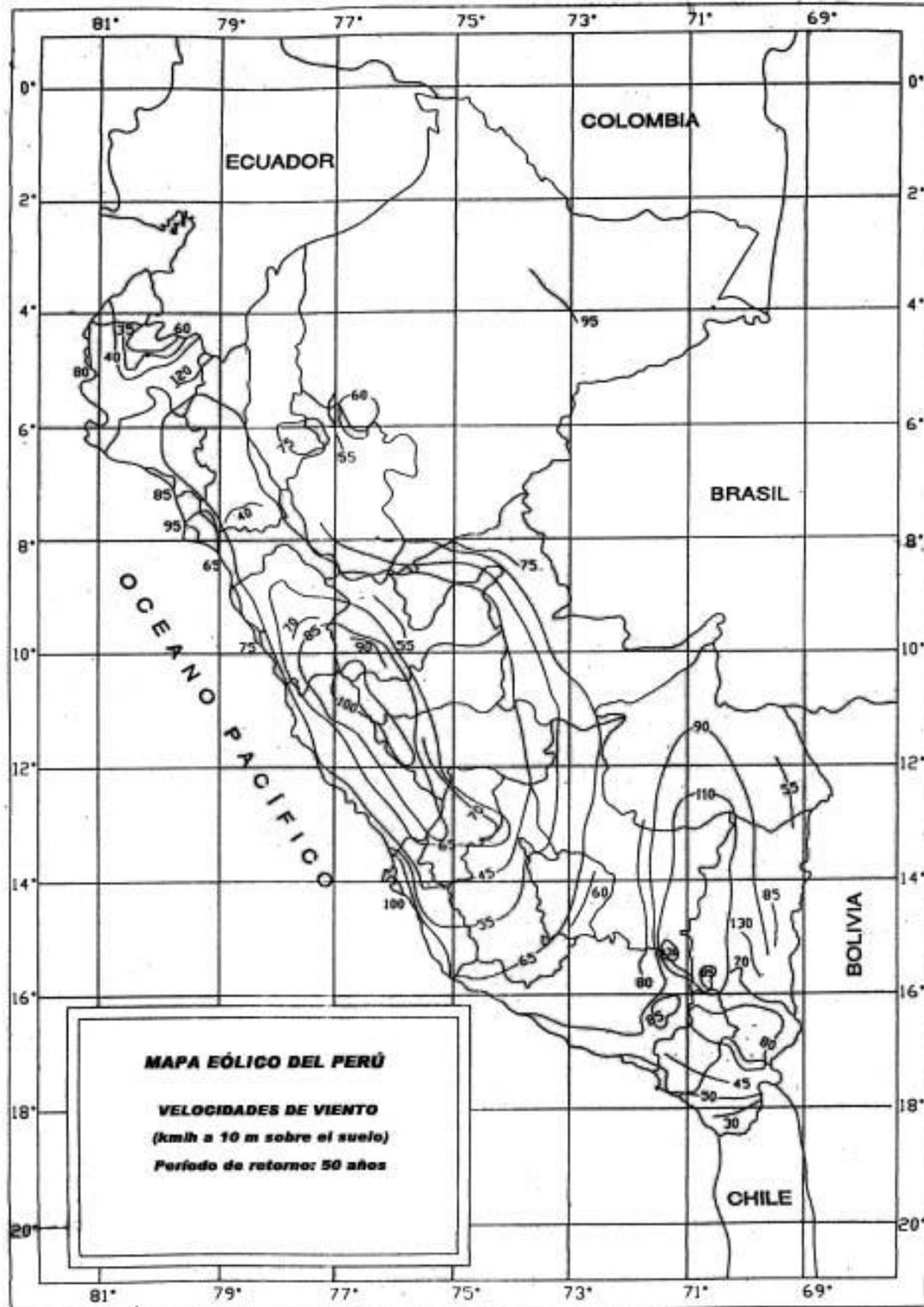


Figura 250-1
Ubicación de las zonas de carga en el Perú

Nota: Tomado del Código Nacional de Electricidad, Suministro 2011 (p.212), CNE (2011), Ministerio de Energía y Minas, Perú.

Figura 38.

Mapa eólico del Perú.



Nota: Tomado de la Norma técnica, Estructuras, Cargas, Norma E.020 (2006), Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Perú.

2.8.3.1.3. Categorías de exposición.

ASCE 7-16 (2017), especifica las categorías de exposición o rugosidad del terreno. La categoría de exposición recomendada para las líneas de transmisión es la exposición C, a menos que se puedan cumplir los criterios de las exposiciones B o D y exista una expectativa razonable de que la categoría de exposición no cambiará, durante la vida útil de la línea de transmisión (ASCE N° 74, 2020, p.25).

Exposición B.

Esta exposición, se clasifica como terreno urbano y suburbano, a áreas densamente boscosas, o terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas, que tienen el tamaño de viviendas unifamiliares, o más grandes. En la Figura 39, se muestra una vista típica del terreno representativo, para la Exposición B. El uso de la exposición B, se limitará a las direcciones del viento, en las que el terreno representativo, se extienda ya sea 792 m (2600 pies) o 20 veces la altura de la estructura, o la que sea mayor (ASCE N° 74, 2020, p.25).

Figura 39.

Terreno típico representativo de la exposición B.

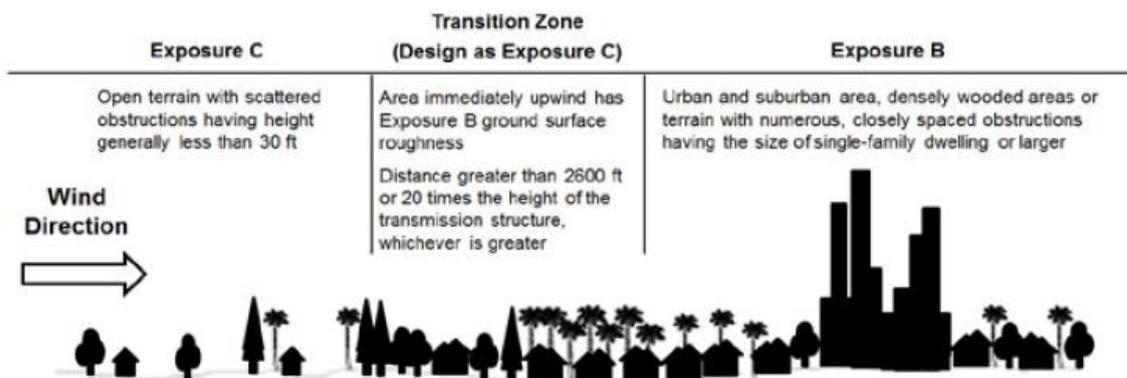


Nota: Tomado de Manual ACSE, engineering practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.25), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

Las condiciones de la superficie requeridas para el uso de la Categoría de exposición B se ilustran en la Figura 40.

Figura 40.

Condiciones de la superficie requeridas para el uso de la Categoría de exposición B.



Nota: Tomado de Manual ACSE, engineering practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.26), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

Exposición C

Esta exposición se define como, terreno abierto con obstrucciones dispersas, con alturas inferiores, a 30 pies (9.1 m). Esta categoría incluye, terrenos planos, abiertos, granjas y pastizales. La Figura 41, muestra una vista típica de terreno representativo, para la Exposición C. Esta categoría de exposición, debe usarse siempre, que el terreno no se ajuste, a las descripciones de las otras categorías de exposición. También debe tenerse en cuenta, que esta exposición, es representativa en terrenos de aeropuerto, donde se registran, la mayoría de las mediciones, de velocidad del viento (ASCE N° 74, 2020, p.26).

Exposición D

Esta exposición se define como, áreas planas, y sin obstrucciones, directamente expuestos al viento, que fluye sobre aguas abiertas, a una distancia de al menos, 5000 pies (1524 m), o 20 veces la altura de la estructura, o la que sea mayor. La Figura 42, muestra una vista típica del terreno representativo, para la Exposición D. Las líneas costeras, para las que también se aplica la Exposición D, incluyen las vías navegables interiores. La Categoría de exposición D, se aplica, solo a estructuras, directamente expuestas, a cuerpos de agua, y playas costeras. Las condiciones de la superficie requeridas para el uso de la Categoría de exposición D, se ilustran en la Figura 30. (ASCE N° 74, 2020, p.26).

Figure 41.

Terreno típico representativo de la exposición C.



Fuente: Tomado de Manual ACSE, engineering practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.27), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

Figura 42.

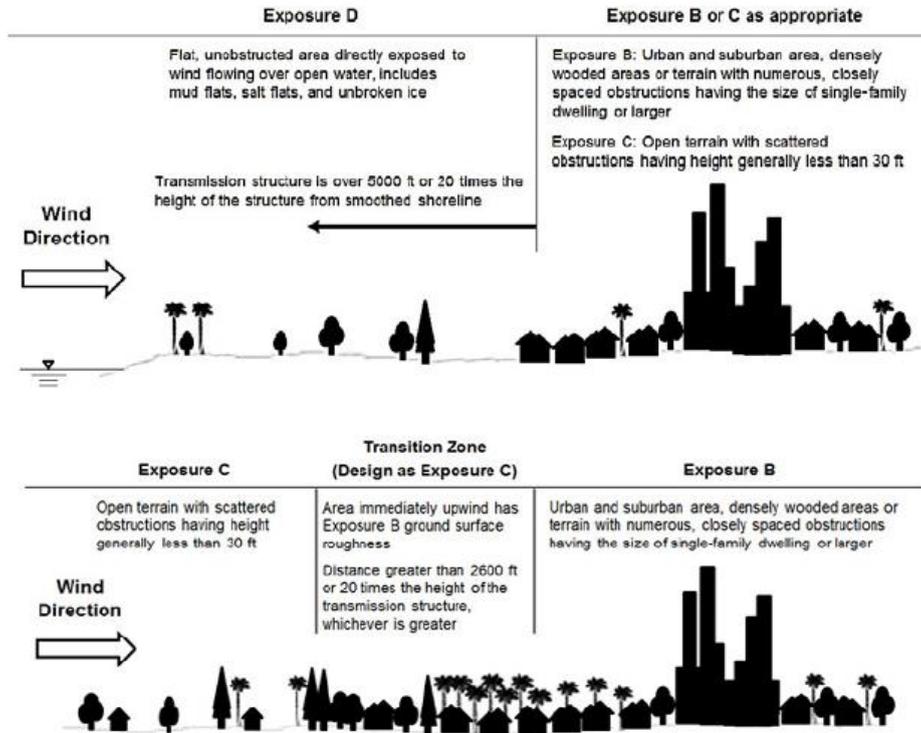
Terreno típico representativo de la exposición D.



Nota: Tomado de Manual ACSE, engineering practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.27), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

Figura 43.

Surface conditions required for the use of Exposure Category D.



Nota: Tomado de Manual ACSE, engineering practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.28), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

2.8.3.1.4. Ecuaciones para el coeficiente de exposición.

Los valores del coeficiente de exposición, a la presión del viento, K_z , se calculan mediante la siguiente ecuación para, $33 \text{ pies} \leq z_h \leq z_g$ (ASCE N° 74, 2020, p.28).

$$K_z = 2.01 \left(\frac{z_h}{z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}}$$

Dónde

- α : Coeficiente de la ley de potencia para ráfagas de viento (ver Tabla 03);
- z_h : altura efectiva; y
- z_g : Altura del gradiente (consulte la Tabla 03).

La altura efectiva, z_h , es teóricamente, la altura desde el nivel del suelo, hasta el centro de presión de la carga de viento, se utiliza para la selección de un coeficiente de exposición, a la presión del viento, K_z . El gradiente altura, z_g , define, el grosor de la capa límite atmosférica. Por encima de esta elevación, se supone, que la velocidad del viento, es constante. El exponente de la ley de potencia, α , representa, la forma del perfil de velocidad del viento, con respecto a la altura. Los valores del exponente de la ley de potencias, y las alturas de gradiente correspondientes, se enumeran en la Tabla 03, dado, para cada categoría de exposición. La Tabla 04, se puede utilizar para determinar K_z , para alturas de hasta 200 pies (60 m) sobre el suelo (ASCE N° 74, 2020, p.28).

Tabla 03.

Exponente de la ley de potencia, para la velocidad del viento de ráfaga y a la altura del gradiente correspondiente

Exposure Category	α	z_g (ft)
B	7.0	1200
C	9.5	900
D	11.5	700

Nota: Tomado de Manual ACSE engineering practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.29), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

Tabla 04.

Coefficiente de exposición, K_z , para la presión de viento, por altura efectiva.

Effective Height, z_h (ft)	Wind Pressure Exposure Coefficient, K_z		
	Exposure B	Exposure C	Exposure D
0-33	0.72	1.00	1.18
40	0.76	1.04	1.22
50	0.81	1.09	1.27
60	0.85	1.14	1.31
70	0.89	1.17	1.35
80	0.93	1.21	1.38
90	0.96	1.24	1.41
100	0.99	1.27	1.43
120	1.04	1.32	1.48
140	1.09	1.36	1.52
160	1.13	1.40	1.55
180	1.17	1.43	1.59
200	1.20	1.46	1.62

Nota: Tomado de Manual ACSE engineering practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.29), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

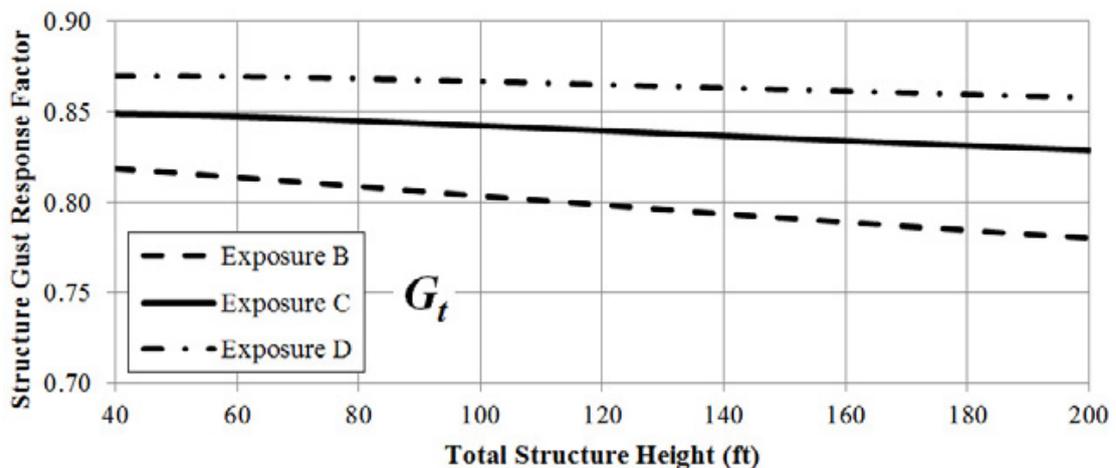
La altura efectiva, z_h , es teóricamente, la altura desde el nivel del suelo, hasta el centro de presión de la carga de viento. La altura efectiva de un conductor, y un cable de tierra, sometidos al viento, y al hielo, con viento concurrente, está influenciada por la oscilación, de los cables, y aisladores. En este sentido, para propósitos de diseño estructural, las alturas efectivas de todos los conductores, se pueden aproximar como, la altura promedio sobre el suelo, en todos los puntos de conexión, de los cables, a la estructura (ASCE N° 74, 2020, p.30).

2.8.3.1.5. Factor de respuesta a ráfagas para la estructura.

El factor de respuesta a ráfagas en la estructura, G_t , se utiliza, para calcular las cargas de viento, que actúan sobre las estructuras de transmisión. Así mismo, G_t , es una función de la categoría de exposición y la altura efectiva, z_h . De otro lado, la relación de G_t , en función de la altura total de la estructura, se representa en la Figura 44, para cada exposición. En esta figura, la altura efectiva de la torre se toma, como 2/3 de la altura total de la estructura. (ASCE N° 74, 2020, p.33).

Figura 44.

Factor de respuesta a ráfagas, en la estructura.



Nota: Tomado de Manual ACSE engineering practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.33), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

2.8.3.1.6. Coeficiente de fuerza

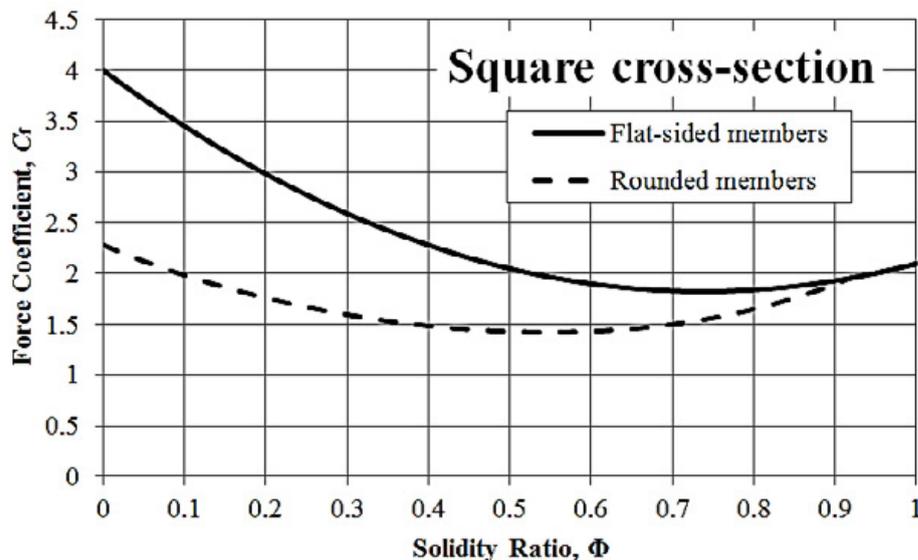
El coeficiente de fuerza, C_f , dado en la ecuación de la fuerza del viento, tiene en cuenta, los efectos de las características de la estructura (forma, tamaño, solidez, blindaje, orientación con respecto al viento, y la rugosidad de la superficie), en el cálculo de la fuerza resultante. El coeficiente de fuerza, es la relación, entre la fuerza resultante por unidad de

área, en la dirección del viento, y la presión del viento aplicada. También puede denominarse, coeficiente de arrastre, coeficiente de presión o, factor de forma. (ASCE N° 74, 2020, p.34).

Los coeficientes de fuerza relevantes se muestran en la Figura 32, (ASCE N° 74, 2020, p.39).

Figura 45.

Force coefficients for (a) square.



Nota: Tomado de Manual ACSE engineering practice No. 74, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (p.39), ACSE N° 74 (2020), American Society of Civil Engineers.

Relación de solidez.

La relación de solidez, es un parámetro importante, que influye, en el coeficiente de fuerza, para las estructuras de celosía. De otro lado, el coeficiente de fuerza, para la estructura total, depende de la resistencia al flujo de aire de los miembros individuales y de los patrones de flujo de aire, alrededor de los miembros (ASCE N° 74, 2020, p.36).

Los coeficientes de fuerza, son una función de la relación de solidez, Φ , que se define como;

$$\Phi = \frac{A_m}{A_o}$$

Donde;

A_m : Es el área, de todos los miembros, en la cara de barlovento, de la estructura (área neta).

A_o : Es el área del contorno, de la cara de barlovento, de la estructura de celosía (área bruta).

2.8.3.1.7. Cargas de sismo.

Por lo general, las estructuras, de líneas de transmisión, no necesitan ser diseñadas, para vibraciones inducidas por el suelo, que son causadas por el movimiento de un terremoto. Históricamente, las estructuras, de líneas de transmisión, se han desempeñado bien en eventos sísmicos, como se documenta en publicaciones de la industria, como los informes de reconocimiento del Consejo Técnico de ASCE, sobre ingeniería de terremotos, y el Instituto de investigación de ingeniería de terremotos (EERI). Décadas de experiencia con líneas de todas las configuraciones respaldan el hecho de que se observan pocas, si acaso, fallas por cargas inerciales en las estructuras de transmisión después de un terremoto. El modelado por computadora de torres reticuladas y estructuras tubulares de acero ha demostrado que las cargas de la estructura causadas por viento extremo, hielo y cargas de tensión de alambre desequilibradas exceden las cargas causadas por eventos sísmicos. Las líneas de transmisión son un sistema complejo de estructuras, cables aéreos y aislantes. Los diferentes tipos y alturas de estructuras, y las longitudes de los tramos de los cables y los pandeos, interconectados con aisladores flexibles a lo largo de la línea, dan como resultado frecuencias naturales más bajas significativamente diferentes entre las estructuras y los cables. La ventaja de este sistema es la baja masa relativa de las estructuras y la capacidad

del sistema de cables para disipar la energía dinámica. Las fallas estructurales durante un evento sísmico han sido causadas por efectos geotécnicos, como deslizamientos de tierra, licuefacción y propagación lateral.

Por lo tanto, la inclusión de cargas inerciales sísmicas normalmente no controlará el diseño de una estructura de transmisión. Las cargas extremas tradicionales, son adecuadas para obtener la capacidad estructural, para mitigar los efectos de las cargas inerciales, sísmicas. (ACSE Manual No 74, 2020, p.86).

2.8.3.1.8. Cargas de construcción y mantenimiento.

Las cargas de construcción son cargas que la estructura debe resistir durante el ensamblaje, el montaje y durante la instalación de alambres de protección, aisladores, conductores y accesorios de línea.

Las cargas de mantenimiento las experimenta la estructura, como resultado de la inspección, el reemplazo de los componentes de la estructura o la alteración de las instalaciones soportadas. Las cargas de mantenimiento de la estructura, consideran los efectos de los trabajadores en la estructura, así como, los efectos de la carga en las estructuras adyacentes, debido a modificaciones temporales, como el refuerzo para reparar o reemplazar una estructura. (ACSE Manual No 74, 2020, p.15).

2.8.4. Diseño por factores de carga y resistencia.

El concepto de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD), se presenta para proporcionar contexto, para las cargas recomendadas. La relación de carga y factores de carga, se presenta en relación con varios estados límite, que pueden necesitar verificarse, en el diseño o análisis, de una línea de transmisión. La metodología de diseño, con factores de carga y resistencia, es un enfoque simplificado del diseño basado en la confiabilidad, que

utiliza factores que tienen en cuenta, la incertidumbre en la carga y la resistencia (u otra condición limitante). Mediante este método, se utiliza una resistencia nominal y su correspondiente factor de reducción de resistencia (ϕ , a veces igual a 1.0), para estimar la probabilidad estadística de falla, y determinar una capacidad de diseño nominal para el componente. Por el contrario, las cargas y los efectos de la carga se incrementan por factores de carga (γ), que dan cuenta de la incertidumbre y la variabilidad estadística, de la carga, y se utilizan para establecer el diseño. Los factores de carga suelen ser superiores a 1, con excepciones ocasionales. Cada componente (es decir, carga muerta, carga de viento, carga de construcción) de una carga aplicada puede tener un factor de carga diferente que representa la variabilidad de esa carga en particular. Por ejemplo, el factor de carga, para cargas muertas, es típicamente mucho menor, que el factor de carga, para cargas de viento, debido a los niveles relativos de incertidumbre, asociados con cada tipo de carga. (ACSE Manual No 74, 2020, p.7). Matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$\phi * R_n = \sum \gamma_i * c \text{ arg } a_i$$

Dónde:

ϕ : Factor de reducción de resistencia.

R_n : Resistencia nominal del componente.

Carga : La combinación adecuada de cargas muertas, tensiones de cables, y cargas inducidas por el clima, construcción y mantenimiento (C&M), contención de fallas y cargas legisladas.

γ : Factor de carga, que es único para cada carga.

2.8.4.1. Grados de construcción.

El, CNE (2011), define, tres grados de construcción, a saber, los grados B, C y N. El grado B es el más alto o el tipo de construcción con estrictos estándares de resistencia, mientras que N es el grado más bajo, y se eligen, tomando como base, los requerimientos de resistencia mecánica, para la seguridad. Para el caso de estructuras, en el mismo código, se estipula utilizar los estándares de grado B (p.209).

2.8.4.2. Factores de carga o sobrecarga.

Las torres de transmisión, así como sus componentes estructurales, deben ser diseñados, para el grado de construcción B, con los factores de carga, apropiados que se muestran en la Tabla 253-1, del código nacional de electricidad (CNE, 2011).

Tabla 05.

Factores de sobrecarga, para estructuras, crucetas y, cimentaciones, según la Tabla 253-1, del código nacional de electricidad.

Factores de sobrecarga		
	Grado B	Grado C
Cargas de la Regla 250.B cargas verticales ³	1,50	1,90 ⁶
Cargas transversales		
Viento	2,50	2,20 ⁴
Tensión del alambre	1,65 ²	1,30 ⁵
Cargas longitudinales		
En los cruces		
En general	1,10	Ningún requerimiento
En los amarres (anclajes)	1,65 ²	1,30 ⁵
En cualquier lugar		
En general	1,00	Ningún requerimiento
En los amarres	1,65 ²	1,30 ⁵
Cargas, Regla 250.C	1,00	1,00

Nota: Tomado de Código nacional de electricidad suministro 2011, CNE (2011, p.220), MEM.

2.8.4.3. Factores de resistencia.

Las estructuras, deberán ser diseñadas para soportar cargas apropiadas, multiplicadas por los factores de sobrecarga, sin exceder de su resistencia multiplicadas, por los factores de resistencia, de la Tabla 261-1^a, establecidos en el código nacional de electricidad (CNE, 2011).

Tabla 06.

Factores de resistencia, para las estructuras, crucetas, herrajes de soporte, retenidas, cimentaciones y anclajes (Tabla 261-1ª, del CNE), para ser utilizados con factores de sobrecarga, de la Tabla 253-1, del código nacional de electricidad.

	Grado B	Grado C
Factores de resistencia para ser utilizados con cargas de la Regla 250.B		
Estructuras de metal y concreto pretensado ⁶	1,0	1,0
Estructuras de madera y concreto armado ^{2,4}	0,65	0,85
Herrajes de soporte	1,0	1,0
Alambre de retenida ^{5, 6}	0,9	0,9
Anclaje y cimentaciones de retenida	1,0	1,0
Factores de resistencia para ser utilizados con cargas de la Regla 250.C		
Estructuras de metal y concreto pretensado ⁶	1,0	1,0
Estructuras de madera y concreto armado ^{3,4}	0,75	0,75
Herrajes de soporte	1,0	1,0
Alambre de retenida ^{5, 6}	0,9	0,9
Anclaje y cimentaciones de retenida	1,0	1,0

Nota: Tomado de Código nacional de electricidad suministro 2011, CNE (2011, p.233), MEM.

Las siguientes normas pueden usarse, para tomar factores de resistencia, para el diseño estructuras en líneas de transmisión:

- ASCE 10-15, Diseño de estructuras de transmisión de acero reticulado.
- ACI 318-19, Requisitos del código de construcción para hormigón estructural.
- AISC 360-20, Especificación para edificios de acero estructural.

2.8.5. Hipótesis o casos de carga para torres de transmisión.

Las cargas se calculan en las estructuras en tres direcciones: vertical, transversal y longitudinal. La carga transversal es perpendicular a la línea y las cargas longitudinales actúan paralelas a la línea. Según la norma DGE (ETS-LT, 2003), Para el diseño y cálculo de las torres, se consideran dos tipos de carga:

- Cargas normales.

- Cargas excepcionales, que corresponden a la rotura de un conductor, o rotura de un cable de guarda.

2.8.5.1. Cargas normales.

En condiciones de carga normales, se admitirá que la torre está sujeta, a la acción simultánea de las siguientes fuerzas:

a. Cargas verticales.

La carga vertical sobre las estructuras de soporte consiste, en el peso de la estructura, más el peso superpuesto, que incluye, todos los cables, recubiertos de hielo, donde se especifique.

La carga vertical del cable, sobre la estructura, viene dada por las siguientes ecuaciones:

$$V_w = \gamma * (W_w + (d + I) * I * W_{hielo}) * V_p$$

Dónde

d : diámetro del conductor (cm)

I : espesor del hielo (cm)

γ : factor de sobrecarga.

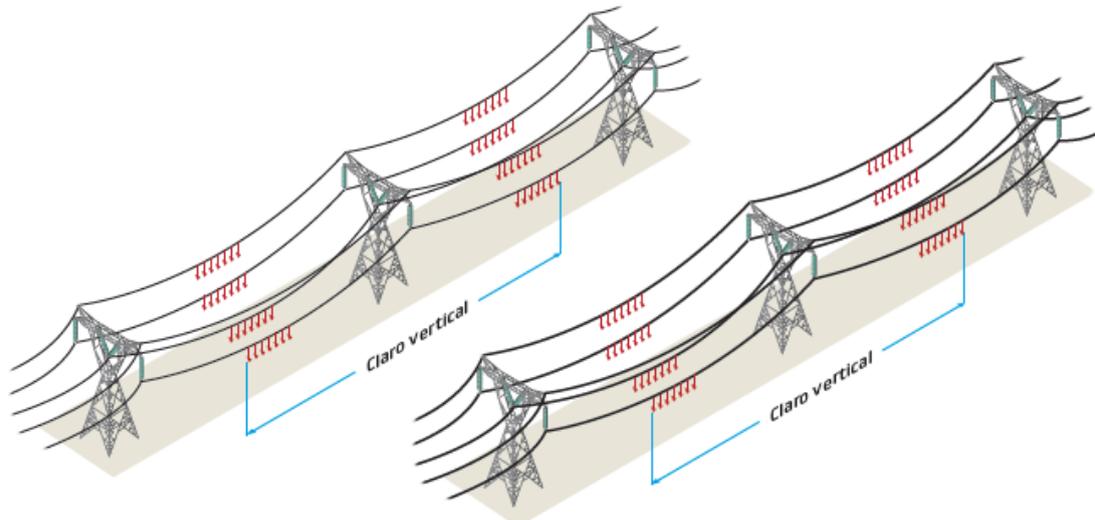
W_w : peso del cable en (N/m)

W_{hielo} : peso específico del hielo (N/cm³)

V_p : Vano peso o claro vertical (m).

Figura 46.

Carga vertical sobre conductores.



Nota: Tomado de Manual para el Diseño Electromecánico, de Líneas de Transmisión Aéreas (p.193), CFE (2012), Comisión Federal de Electricidad, México.

b. Cargas transversales horizontales.

Estas cargas, que actúan en las estructuras, son causadas principalmente, por fenómenos meteorológicos, como el viento (CFE, 2012). En este sentido, los efectos, de estas cargas, inciden en los conductores y cables de guarda, que pueden estar cubiertos con hielo, o nieve, según las regiones donde se localiza la línea de transmisión (CFE, 2012). Así mismo, estas cargas, tienen características no predecibles, respecto a su velocidad, dirección y frecuencia. Por lo que, sus efectos, generan esfuerzos mecánicos, muy grandes en las estructuras, que a su vez transmite a las cimentaciones.

La carga transversal debida al viento, en el cable, viene dada por las siguientes ecuaciones:

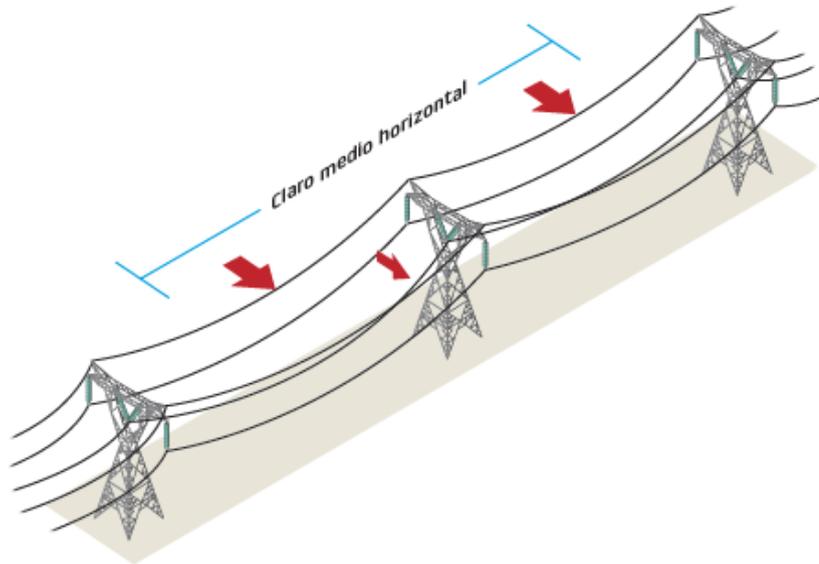
$$V_h = \gamma * (K * V^2 * S_f * (d + I)) * V_v$$

Donde:

- d : Diámetro del conductor (cm)
- I : Espesor del hielo (cm)
- γ : Factor de sobrecarga.
- V_v : Vano viento o claro medio horizontal (m).
- K : Constante de presión, 0,613 para las elevaciones hasta 3 000 m.s.n.m., y 0,455 para las elevaciones mayores de 3 000 m.s.n.m.
- V : Velocidad del viento, en m/s
- S_f : Factor de forma, (véase las Reglas 251.A.2 y 252.B.2 del CNE)

Figura 47.

Carga transversal sobre conductores debido al viento.



Nota: Tomado de Manual para el Diseño Electromecánico, de Líneas de Transmisión Aéreas (p.194), CFE (2012), Comisión Federal de Electricidad, México.

La componente transversal, de la tensión de la línea, en la estructura, viene dada por la siguiente ecuación:

$$H = 2T \sin(\alpha / 2)$$

dónde

H : carga transversal debido a la tensión del cable.

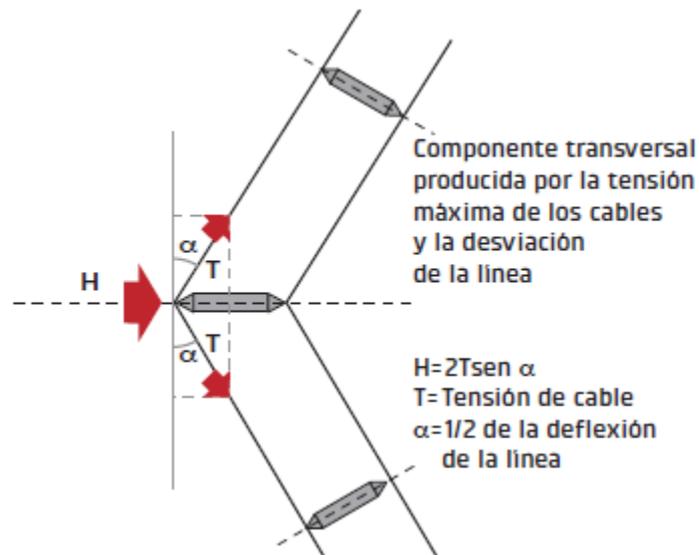
T : tensión del alambre.

α : Ángulo de línea, en grados.

La componente transversal, de la tensión mecánica, puede tener una magnitud significativa, especialmente, para estructuras con grandes ángulos de deflexión.

Figura 48.

Carga transversal debido a la tensión de la línea, causada por el ángulo de deflexión.



Nota: Tomado de Manual para el Diseño Electromecánico, de Líneas de Transmisión Aéreas (p.195), CFE (2012), Comisión Federal de Electricidad, México.

c. Cargas longitudinales**Para la torre de retención:**

Producida por la fuerza longitudinal, desbalanceada en los conductores y el cable de guarda, debido a la diferencia de vanos equivalentes, adyacentes a la torre.

Para la torre de anclaje y terminal:

Producida por la componente horizontal longitudinal, de la máxima tensión de trabajo del conductor, y del cable de guarda.

d. Cargas de construcción (montaje) y mantenimiento.

Son las fuerzas que afectan, a la torre durante su montaje y mantenimiento. Las crucetas de todas las torres, serán calculadas, para una carga vertical mínima, igual al doble de la carga indicada en el punto (a), en ningún caso, será menor al valor indicado en el punto (a) más 4500 N, que es el peso estimado de personal, que incluye equipos de maniobra (ETS-LT, 2003).

2.8.5.2. Cargas excepcionales.

En condiciones de carga excepcional, se admitirá que la torre estará sujeta, además de sus cargas normales, a una fuerza longitudinal, correspondiente, a la rotura de un conductor o rotura de un cable de guarda. Esta fuerza, tendrá el siguiente valor:

a. Para torres de suspensión.

Se considera, el 50% de la máxima tensión del conductor, o el 100% de la máxima tensión del cable de guarda.

b. Para torres de anclaje y terminales.

Se considera, el 100 % de la máxima tensión del conductor, o 100% de la tensión del cable de guarda. Esta fuerza, será aplicada en sus componentes longitudinal, y transversal, según el correspondiente ángulo de desvío. Para la condición de carga excepcional, las cargas correspondientes, al peso propio y al viento sobre el conductor supuesto roto, serán

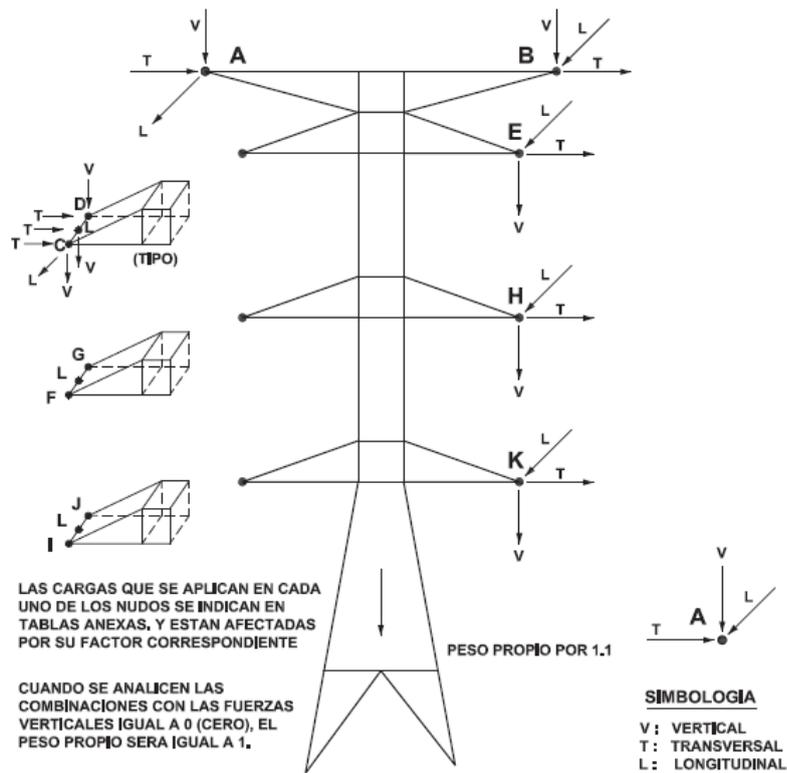
consideradas, actuando sobre la mitad del vano correspondiente.

2.8.6. Árboles de cargas

Es una representación gráfica de las cargas asociadas a las torres, que fueron descritas en los ítems anteriores, con la cual, se realizara el análisis estructural de la torre, para las diferentes condiciones o hipótesis de carga.

Figura 49.

Representación de un árbol de carga en una torre.



Nota: Tomado de Manual para el Diseño Electromecánico, de Líneas de Transmisión Aéreas (p.199), CFE (2012), Comisión Federal de Electricidad, México.

2.8.7. Metodología de análisis y diseño para torres de transmisión.

La Guía de ASCE, para el diseño de torres de transmisión, es el documento de la industria, que rige el análisis y diseño de torres de celosía. Es así, que una torre de celosía se analiza como una armadura espacial, y se asume que cada miembro de la torre está conectado con pasadores, en sus uniones, llevando solo carga axial y ningún momento. En el modelo analítico, la geometría de la torre se divide en un número discreto de juntas (nodos) y miembros (elementos). Las cargas aplicadas en la torre son cargas máximas, que incluyen los factores de capacidad de sobrecarga, donde los miembros de la torre se diseñan de acuerdo con el límite elástico o la resistencia al pandeo del miembro, estos miembros generalmente constan de secciones angulares de acero, lo que permite una fácil conexión, utilizándose generalmente secciones de ángulo simple y doble. Los miembros de la torre están diseñados para soportar fuerzas de tracción y compresión axiales. La tensión permisible en compresión generalmente se rige por el pandeo, lo que hace que el miembro falle con una tensión muy por debajo del límite elástico del material. El pandeo de un miembro ocurre alrededor de su eje más débil, que para una sección de un solo ángulo está inclinado con respecto a los ejes geométricos. Pues, a medida que aumenta la longitud libre del miembro, se reduce la tensión permisible por pandeo (Chen, 2001, p.1045).

La tensión permisible, en un miembro, es la tensión de fluencia total, del material y no depende de la longitud del miembro. Esta tensión, es resistida por una sección transversal neta, cuya área es el área bruta menos el área de los orificios de los pernos, en una sección determinada. La capacidad de tensión, de un elemento angular, puede verse afectada por el tipo de conexión final. Por ejemplo, cuando se conecta un lado del ángulo, la capacidad de tensión se reduce en un 10%, pues se produce una reducción adicional, cuando solo se conecta el tramo corto de un ángulo desigual (Chen, 2001, p.1046).

2.8.8. Diseño de cimentaciones para líneas de transmisión.

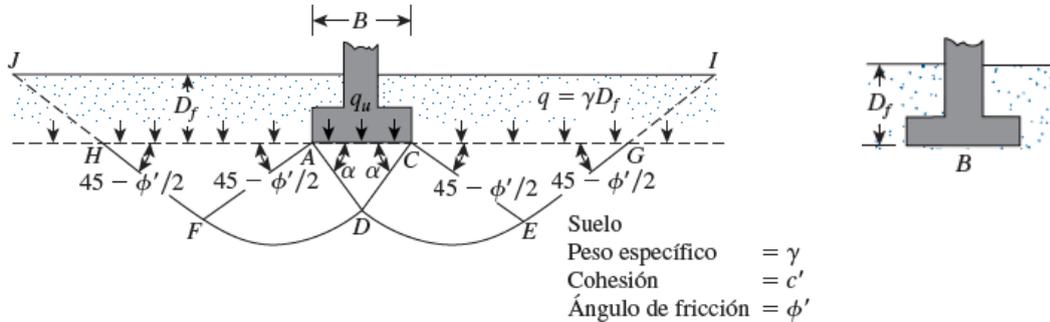
2.8.8.1. Teoría de la capacidad de carga de Terzaghi.

Terzaghi (1943), fue el primero en presentar una teoría completa, para evaluar la capacidad de carga última, de cimentaciones, aproximadamente superficiales. De acuerdo con su teoría, una cimentación, es superficial si su profundidad, D_f (figura 50), es menor que o igual a su ancho. Sin embargo, investigadores posteriores sugirieron, que las cimentaciones con D_f igual a tres o cuatro veces su ancho, se podían definir como cimentaciones superficiales. Terzaghi sugirió, que para una cimentación continua o corrida (es decir, cuando su relación ancha a longitud tiende a cero), la superficie de falla en el suelo, ante carga última, se puede suponer similar a la que se muestra en la figura 50. El efecto del suelo, arriba del fondo de la cimentación, también se puede suponer, que se reemplaza por una sobrecarga equivalente, $q = \gamma * D_f$ (donde γ , es el peso específico del suelo) (Braja, 2012, p.136). La zona de falla, bajo la cimentación se puede separar en tres partes (ver la figura 50):

1. La zona triangular, ACD, inmediatamente abajo de la cimentación.
2. Las zonas de radiales de corte, ADF y CDE, con las curvas, DE y DF, como arcos de una espiral logarítmica.
3. Dos zonas triangulares pasivas de Rankine, FH y CEG.

Figura 50.

Falla por capacidad de carga, en un suelo bajo una cimentación rígida continua (corrida).



Nota: Tomado de Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones (p.137), Braja (2012), Cengage Learning, México.

Los ángulos, CAD y ACD, se suponen iguales al ángulo de fricción del suelo, ϕ' . Observe, que con el reemplazo del suelo arriba del fondo de la cimentación, por una sobrecarga equivalente q , se ignoró, la resistencia cortante del suelo, a lo largo de las superficies de falla, GI y HJ (Braja, 2012, p.138).

Aplicando un análisis de equilibrio, Terzaghi, expresó la capacidad de carga última en la forma;

$$q_u = c' N_c + q N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (\text{cimentación continua o corrida})$$

Donde;

c' : cohesión del suelo.

γ : peso específico del suelo.

q : $\gamma \cdot D_f$.

N_c, N_q, N_γ : factores de capacidad de carga, que son adimensionales y funciones, sólo del ángulo de fricción del suelo, ϕ' .

Para cimentaciones que presentan el modo de falla local, por corte en suelos, Terzaghi, sugirió las siguientes modificaciones en las ecuaciones:

$$q_u = \frac{2}{3} c' N_c' + q N_q' + \frac{1}{2} \gamma B N_q' \quad (\text{cimentación continua})$$

$$q_u = 0.867 c' N_c' + q N_q' + 0.4 \gamma B N_q' \quad (\text{cimentación cuadrada})$$

$$q_u = 0.867 c' N_c' + q N_q' + 0.3 \gamma B N_q' \quad (\text{cimentación circular})$$

Tabla 07.

Factores de capacidad de carga, modificados de Terzaghi.

ϕ'	N_c'	N_q'	N_γ'	ϕ'	N_c'	N_q'	N_γ'
0	5.70	1.00	0.00	26	15.53	6.05	2.59
1	5.90	1.07	0.005	27	16.30	6.54	2.88
2	6.10	1.14	0.02	28	17.13	7.07	3.29
3	6.30	1.22	0.04	29	18.03	7.66	3.76
4	6.51	1.30	0.055	30	18.99	8.31	4.39
5	6.74	1.39	0.074	31	20.03	9.03	4.83
6	6.97	1.49	0.10	32	21.16	9.82	5.51
7	7.22	1.59	0.128	33	22.39	10.69	6.32
8	7.47	1.70	0.16	34	23.72	11.67	7.22
9	7.74	1.82	0.20	35	25.18	12.75	8.35
10	8.02	1.94	0.24	36	26.77	13.97	9.41
11	8.32	2.08	0.30	37	28.51	15.32	10.90
12	8.63	2.22	0.35	38	30.43	16.85	12.75
13	8.96	2.38	0.42	39	32.53	18.56	14.71
14	9.31	2.55	0.48	40	34.87	20.50	17.22
15	9.67	2.73	0.57	41	37.45	22.70	19.75
16	10.06	2.92	0.67	42	40.33	25.21	22.50
17	10.47	3.13	0.76	43	43.54	28.06	26.25
18	10.90	3.36	0.88	44	47.13	31.34	30.40
19	11.36	3.61	1.03	45	51.17	35.11	36.00
20	11.85	3.88	1.12	46	55.73	39.48	41.70
21	12.37	4.17	1.35	47	60.91	44.45	49.30
22	12.92	4.48	1.55	48	66.80	50.46	59.25
23	13.51	4.82	1.74	49	73.55	57.41	71.45
24	14.14	5.20	1.97	50	81.31	65.60	85.75
25	14.80	5.60	2.25				

Nota: Tomado de Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Braja (2012, p.140), Cengage Learning.

2.8.8.2. Factor de seguridad.

El cálculo de la capacidad de carga permisible bruta, de cimentaciones superficiales, requiere aplicar un factor de seguridad, FS, a la capacidad de carga última bruta, expresándose la capacidad permisible como;

$$q_{perm} = \frac{q_u}{FS}$$

2.8.8.3. Ecuación general de la capacidad de carga.

Las ecuaciones, de la capacidad de carga última, están dadas, sólo para cimentaciones continuas, cuadradas y circulares, no abordan el caso de cimentaciones rectangulares ($0 < B/L < 1$). Además, estas ecuaciones, no toman en cuenta la resistencia cortante, a lo largo de la superficie de falla en el suelo, arriba del fondo de la cimentación (la parte de la superficie de falla, marcada como, GI y HJ, en la figura 37). Además, la carga sobre la cimentación puede darse, en forma inclinada. Por consiguiente, para tomar en cuenta todos estos factores, Meyerhof (1963), sugirió la forma siguiente, para la ecuación general de la capacidad de carga (Braja, 2012, p.143).

$$q_u = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

Donde:

- c' : Cohesión.
- q : Esfuerzo efectivo, al nivel del fondo de la cimentación.
- γ : Peso específico del suelo.
- B : Ancho de la cimentación (5 diámetro para una cimentación circular).
- $F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$: Factores de forma.

F_{cd}, F_{qd}, F_{yd} : Factores de profundidad.

F_{ci}, F_{qi}, F_{yi} : Factores de inclinación de la carga.

N_c, N_q, N_γ : Factores de capacidad de carga.

Los factores, de capacidad de carga, se dan en la tabla 08, y los factores de forma, profundidad e inclinación de uso común se dan en la tabla 09.

Tabla 08.

Factores de capacidad de carga, para la teoría de Meyerhof.

Tabla 3.3 Factores de capacidad de carga para la teoría de Meyerhof.]

ϕ'	N_c	N_q	N_γ	ϕ'	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1.00	0.00	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.20	14.47
2	5.63	1.20	0.15	28	25.80	14.72	16.72
3	5.90	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.40	22.40
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.99
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.64	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.86	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.30	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.80	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	55.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.20	109.41
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.90	130.22
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.55
17	12.34	4.77	3.53	43	105.11	99.02	186.54
18	13.10	5.26	4.07	44	118.37	115.31	224.64
19	13.93	5.80	4.68	45	133.88	134.88	271.76
20	14.83	6.40	5.39	46	152.10	158.51	330.35
21	15.82	7.07	6.20	47	173.64	187.21	403.67
22	16.88	7.82	7.13	48	199.26	222.31	496.01
23	18.05	8.66	8.20	49	229.93	265.51	613.16
24	19.32	9.60	9.44	50	266.89	319.07	762.89
25	20.72	10.66	10.88				

Nota: Tomado de Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Braja (2012, p.144), Cengage Learnig.

Tabla 09.

Factores de forma, profundidad e inclinación [DeBeer (1970); Hansen (1970); Meyerhof (1963); Meyerhof y Hanna (1981)].

Factor	Relación	Fuente
Forma	$F_{cs} = 1 + \frac{B N_q}{L N_c}$ $F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi'$ $F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$ <p>donde L = longitud de la cimentación ($L > B$)</p>	De Beer (1970)
Profundidad	$\frac{D_f}{B} \leq 1$ <p>Para $\phi = 0$:</p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \left(\frac{D_f}{B} \right)$ $F_{qd} = 1$ $F_{\gamma d} = 1$ <p>Para $\phi' > 0$:</p> $F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \text{sen } \phi')^2 \left(\frac{D_f}{B} \right)$ $F_{\gamma d} = 1$ $\frac{D_f}{B} > 1$ <p>Para $\phi = 0$:</p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \underbrace{\tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right)}_{\text{radianes}}$ $F_{qd} = 1$ $F_{\gamma d} = 1$	Hansen (1970)

(continúa)

Factor	Relación	Fuente
	Para $\phi' > 0$:	
	$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'}$	
	$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \underbrace{\tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)}_{\text{radianes}}$	
	$F_{\gamma d} = 1$	
Inclinación	$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ}\right)^2$	Meyerhof (1963), Hanna y Meyerhof (1981)
	$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi'}\right)^2$	
	donde β = inclinación de la carga sobre la cimentación respecto a la vertical	

Nota: Tomado de Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Braja (2012, p.145), Cengage Learnig.

2.8.9. Capacidad de elevación (Uplift) de una cimentación, en una línea de transmisión.

La capacidad de elevación, en una cimentación, es a menudo la condición de diseño geotécnico, que controla, las estructuras de la línea de transmisión. Cuando se aplica cargas de levantamiento, una cimentación extendida, puede fallar en modos claramente diferentes, que están determinados principalmente, por el procedimiento de construcción, la profundidad de la cimentación, las propiedades del suelo y la tensión del suelo in situ (IEEE Std 691, 2001, p.49).

2.8.10. Método de Meyerhof y Adams.

Meyerhof y Adams, desarrollaron un método semi empírico más general, comparado con los métodos tradicionales, como el cono del cono y el método de fricción, para estimar, la capacidad de levantamiento, para una cimentación continua o en tiras sujeta a carga

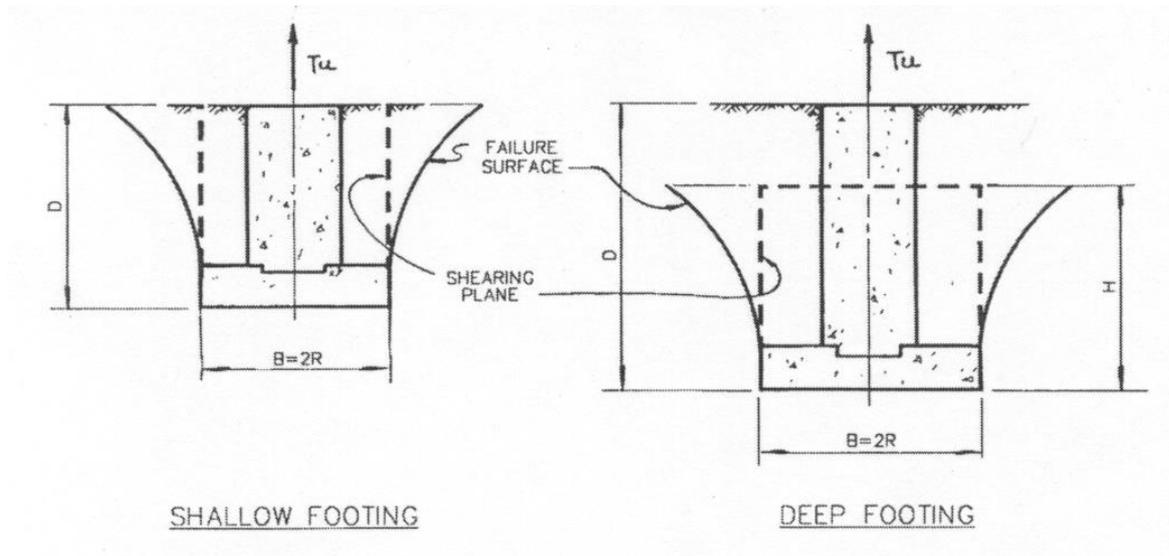
vertical solamente y luego lo modificaron para considerar cimentaciones rectangulares o circulares. Como resultado de las observaciones y los datos obtenidos de las pruebas, en modelos realizados, tanto en arenas como en arcillas, Meyerhof y Adams, concluyeron que, para cimientos poco profundos, la capacidad de levantamiento aumenta con el aumento de la profundidad y que se produce una superficie de deslizamiento distinta en arenas densas que se extiende en un arco poco profundo desde, el borde de la cimentación, hasta la superficie del suelo (IEEE Std 691, 2001, p.69).

En las arcillas, se observó un sistema complejo de grietas por tensión junto con presiones de agua significativas negativas por encima y por debajo de los cimientos. Para cimentaciones profundas, la superficie de falla es menos distinta tanto para arena como para arcilla y la capacidad de levantamiento alcanza un valor límite al aumentar la profundidad.

Debido a la forma compleja de las superficies de falla, se hicieron suposiciones simplificadoras en el desarrollo de expresiones, para la capacidad de levantamiento de las cimentaciones extendidas. Meyerhof y Adams, ignoraron la zona de extracción más grande observada en las pruebas, asumiendo una superficie de ruptura vertical, como se muestra en la Figura 51. La influencia de la resistencia al corte a lo largo de la superficie de falla, observada, real y el peso adicional, del suelo contenido dentro de la ruptura superficie, se consideraron asumiendo que el suelo en los lados del plano de corte (Figura 51), está en un estado de equilibrio plástico. La resistencia a la fricción en el plano de corte, se calculó como una función de la presión de tierra pasiva, ejercida sobre el plano asumiendo las superficies de falla, curvas utilizadas por Caquot y Kerisel (IEEE Std 691, 2001, p.70).

Figura 51.

Método de Meyerhof y Adams (cimentación circular).



Nota. Tomado de Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing (p.70), IEEE Std 691 (2001). The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Meyerhof y Adams, desarrollaron expresiones separadas para cimentaciones superficiales y profundas. Se consideraron cimientos circulares y rectangulares tanto en suelos cohesivos como sin cohesión.

2.8.10.1. Cimentaciones circulares.

Como se muestra en la figura 51, el modo de falla está, determinado por la profundidad de la base. Para cimentaciones poco profundas ($D < H$), la profundidad de la cimentación, D , es menor que el límite vertical de la superficie de falla H . Cuando D es mayor que el valor límite de, H , la superficie de falla, no alcanza la superficie del suelo, y la cimentación se considera profunda. La Tabla 10, proporciona valores límite de la relación H / B , para varios ángulos de fricción interna ϕ , donde B es el diámetro de la base.

Tabla 10.

Parámetros fundamentales para la ecuación de Meyerhof y Adams.

ϕ (degrees)	20	25	30	35	40	45	48
Limiting $\frac{H}{B}$	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0	9.0	11.0
Max. Value of s_f	1.12	1.3	1.6	2.25	3.45	5.50	7.60
M	0.05	0.1	0.15	0.25	0.35	0.5	0.6
K_u	0.85	0.89	0.91	0.94	0.96	0.98	1.00

Nota: Tomado de Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing, IEEE Std 691 (2001, p.70). The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Para cimentaciones circulares poco profundas, la capacidad de levantamiento última (T_u), puede expresarse como la suma de la cohesión y la fricción pasiva de presión de tierra, desarrollada en el cilindro que se extiende verticalmente sobre la base de la cimentación, el peso de la cimentación (W_f) y el peso del suelo (W_s), dentro del cilindro (IEEE Std 691, 2001, p.71). La máxima capacidad de elevación, viene dada por:

$$T_u = W_s + W_f + \pi BcD + s_f (\pi / 2) B\gamma D^2 K_u \tan \phi$$

Dónde:

- c : Cohesión del suelo,
- s_f : Factor de forma que gobierna la presión de tierra pasiva, en el lado de un cilindro,
- K_u : Según la definición de Meyerhof y Adams, es el coeficiente de elevación nominal de la presión del suelo, sobre la superficie de ruptura vertical y puede aproximarse como:

$$K_u = 0.49\phi^{0.18}$$

Donde,

ϕ está en grados.

El factor de forma, s_f , se determina a partir de la siguiente expresión:

$$s_f = 1 + \frac{MD}{B} \leq 1 + \frac{H}{B} M$$

2.8.10.2. Cimentaciones rectangulares

Para cimentaciones rectangulares en arena, la capacidad máxima al levantamiento de cimentaciones, poco profundas, se puede expresar como (IEEE Std 691, 2001, p.72):

$$T_u = W_s + W_f + 2cD(B + L) + \gamma D^2(2s_f B + L - B)K_u \tan \phi$$

Dónde

B : Ancho de la cimentación,

L : Longitud, y se supone que la presión del suelo en los dos extremos, se rige por el factor de forma (s_f), calculado por la ecuación, indicada líneas arriba.

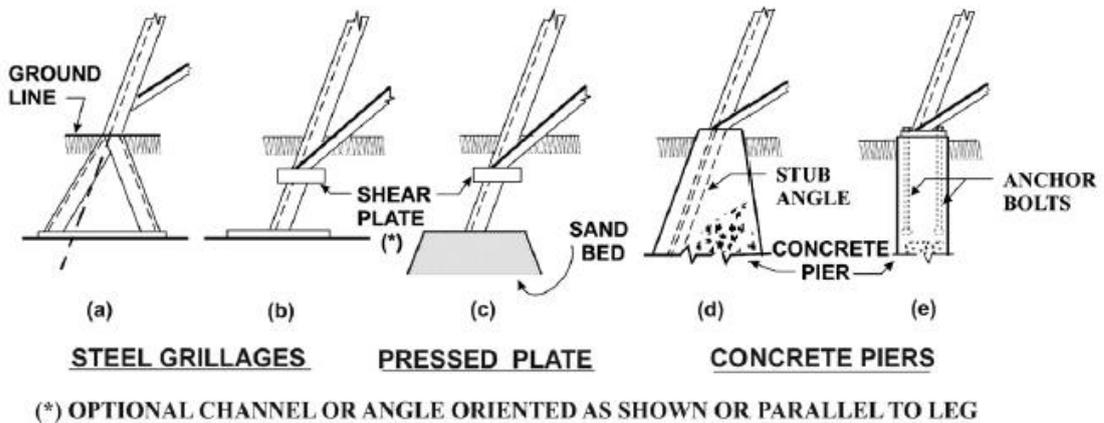
2.8.11. Miembros estructurales y conexiones utilizadas en cimientos.

2.8.11.1. Ángulos Stub en el concreto.

Las cargas de tracción y compresión en la punta del stub, Fig. 52 (d), se transferirán al concreto por la placa inferior o los conectores de corte que se muestran en la Fig. 53. La carga cortante se transferirá al hormigón mediante la presión de soporte lateral.

Figura 52.

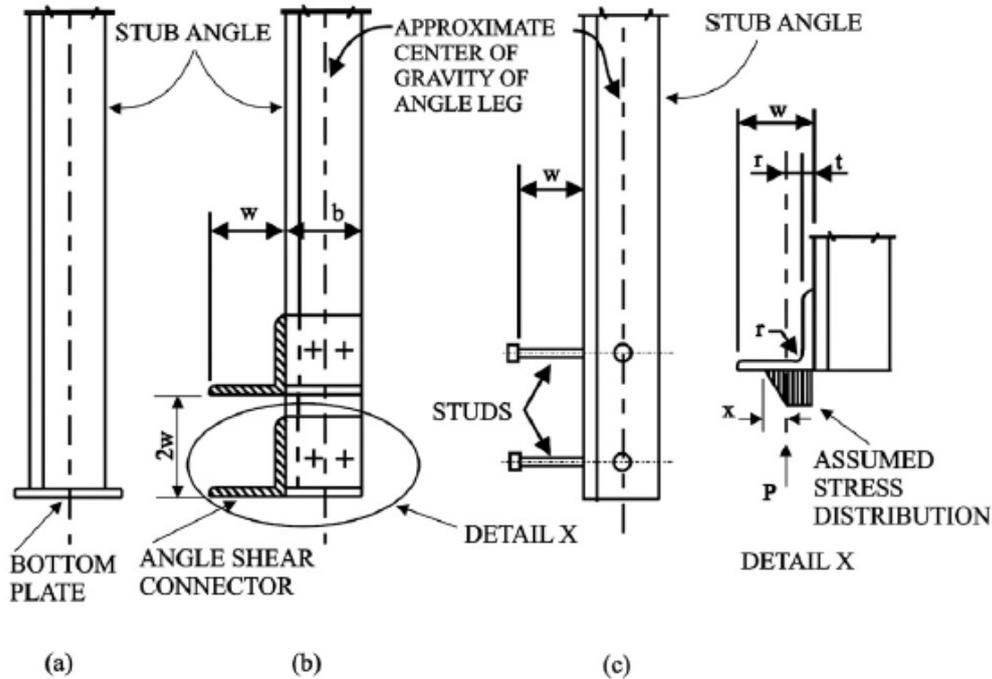
Cimentaciones típicas.



Nota: Tomado de Manual ACSE/SEI 10-15, Design of Latticed Steel Transmission Structures (p.22), ACSE/SEI 10-15 (2015), American Society of Civil Engineers.

Figura 53.

Angulos Stubs.



Nota: Tomado de Manual ACSE/SEI 10-15, Design of Latticed Steel Transmission Structures (p.23), ACSE/SEI 10-15 (2015), American Society of Civil Engineers.

2.8.11.2. Diseño de ángulos Stubs en concreto.

En el diseño del Stub, debe comprobarse, el área adecuada del perfil, para una combinación, de tensión, más cortante, y compresión, más cortante, según se indica, en la siguiente ecuación:

$$A_a = \frac{P}{F_y} + \frac{V}{0.75F_y}$$

Dónde

- A_a : Área bruta o neta, del ángulo, del Stub.
- P : Carga de tracción, o compresión, en la pata de la torre.
- V : Carga cortante, en la pata de la torre.
- F_y : Límite elástico mínimo, del material del Stub.

2.8.11.3. Conectores de corte angulares [Ver Fig. 53 (b)].

La capacidad, P , de los conectores de corte, angulares, se determinará, mediante la siguiente relación;

$$P = 1.19 f'_c b (t + r + x / 2), \text{ y}$$

$$x = t \left[\frac{F_y}{1.19 f'_c} \right]^{1/2} \leq w - r - t$$

Dónde

- f_c : Resistencia a la compresión, del concreto;
- b : Longitud del conector de corte, angular.
- t : Espesor del conector de corte, angular.
- r : Radio del filete;
- F_y : Límite elástico mínimo, especificado del acero.
- w : Ancho del perfil, usado como conector de corte.

El conector de corte angular se ubicará con su longitud simétrica, con respecto al centro de gravedad del Stub.

2.9. Desarrollo de tesis.

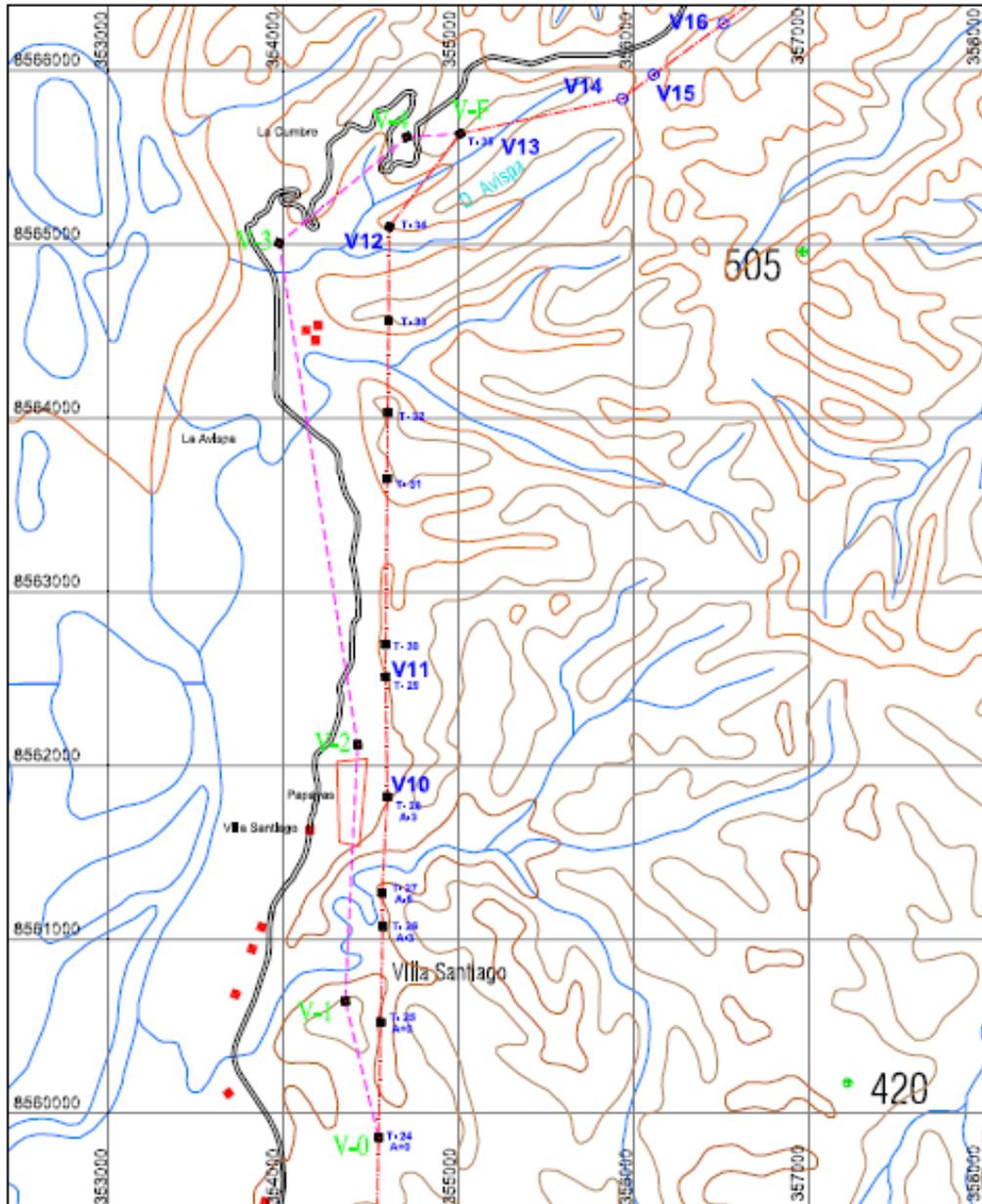
2.9.1. Descripción de la Línea de Transmisión.

El proyecto desarrollado, en el presente trabajo, es el análisis de cimentaciones de torres de celosía, en una Línea de Trasmisión en 138kV, en el Departamento de, Madre de Dios, con información tomada del expediente técnico, “RENOVACION DE LINEA DE TRANSMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN, EN 138 KV, Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS”, cuyo proyecto, tiene como objetivo, mejorar la confiabilidad del sistema, ante la problemática de deslizamiento de terreno en la base de las torres de celosía de esta línea, con el objeto de mejorar la confiabilidad de su Sistema de Transmisión 138 kV existente, para dotar de suministro de energía eléctrica en forma, satisfactoria y confiable, de acuerdo a las Normas Técnicas, de Calidad de los Servicios Eléctricos. LP-SM-6-2021-ELSE-1. (SEACE 3, 2021).

Esta línea de transmisión de transmisión es una variante, del trazo de la línea de transmisión, existente que va de Mazuko, a Puerto Maldonado, debido a que las estructuras existentes que van desde las torres T-25 al T-27, presentan inicios de erosión en sus bases por estar ubicadas en laderas de los cerros adyacentes. Es así, que la construcción de la nueva variante, sale de la estructura existente, T-24, y finaliza en la estructura existente, T-35, siguiendo el recorrido, que se muestra en la figura 54, donde el trazo, mostrando su recorrido y cambios de dirección están dador por lo vértices V-1, V-2, V-3, V-4 y VF, cuyas coordenadas en el sistema WGS84, se muestran en la Tabla N° 11.

Figura 54.

Recorrido de la Línea de Transmisión, en 138KV, Mazuko-Puerto Maldonado.



Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

Tabla 11.

Coordenadas de los Vértices del Proyecto.

VETICE	ESTE (m)	NORTE (m)	Progresiva (m)
V-0	354542	8559863	0
V-1	354352	8560646	805.9
V-2	354422	8562120	2281.9
V-3	353975	8565005	5200.9
V-4	354707	8565618	6155.7
V-F	355009	8565636	6458.2

Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

La Línea de Transmisión 138 kV, MAZUKO – PUERTO - MALDONADO, se encuentra ubicada, en el departamento de Madre de Dios, en la región selva, en la provincia de Tambopata, en Madre de Dios, donde las principales vías de acceso, con las que cuenta el área del proyecto, son las siguientes;

Transporte Vía Terrestre.

Ruta Lima - Cusco – Mazuko - Puerto Maldonado: Esta ruta, es asfaltada, hasta el Cusco, en adelante, es una carretera afirmada, por donde circulan camiones hasta de, 25 TN, los puentes en la zona, son de especificación de 18 TN.

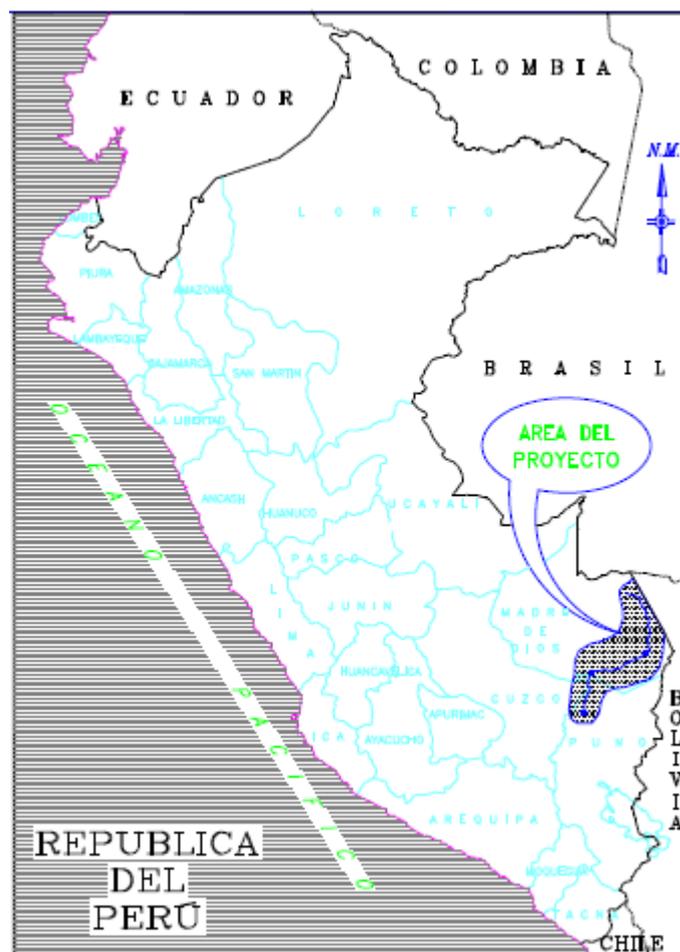
Ruta Lima – Arequipa – Juliaca – Ayaviri - San Gabán – Mazuko - Puerto Maldonado: Esta ruta, es asfaltada, hasta Ayaviri, en adelante, es una carretera afirmada, por donde circulan, camiones hasta de, 25 TN.

Transporte Vía Aérea.

Para acceder a la zona, por vía aérea, se cuenta con el aeropuerto, de Puerto Maldonado, con vuelos diarios, Lima-Cusco-Puerto Maldonado.

Figura 55.

Ubicación de la Nueva Transmisión, en 138KV, Mazuko – Puerto Maldonado.



Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

2.9.1.1. Condiciones ambientales.

La zona del, proyecto, tiene las siguientes características, climatológicas:

- ✓ Altitud (mínima / máxima): 377(S.E. Mazuko) y 206(S.E. Puerto Maldonado)
- ✓ Temperatura mínima / máxima: 20°C / 35°C.
- ✓ Velocidad máxima de viento: 94 km/h (Según CNE, Suministro 2011).

2.9.2. Características del Sistema

La línea de transmisión, presenta, las siguientes características en el sistema eléctrico:

Tabla 12.

Características eléctricas de la LT. 138kV, Mazuko-Madre de Dios.

Tensión Nominal, kV	138
Tensión máxima del sistema, en kV	145
Frecuencia nominal, en Hz	60
Numero de ternas	1
Tensión soportada, normalizada a los impulsos, tipo Rayo (BIL), en kV pico	650
Tensión soportada, normalizada de corta duración a frecuencia industrial, kV eficaz	275
Distancia de fuga mínima, mm/kV	31
Puesta a tierra del sistema	Neutro Rígido
Identificación de fases	R,S,T

Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

2.9.3. Características de línea de transmisión

La Línea de transmisión Mazuko – Puerto Maldonado, tiene las siguientes características:

Tabla 13.

Características técnicas de la LT. 138kV, Mazuko-Puerto Maldonado.

Tensión	: 138 kV
Nº de Ternas	: 1
Altitud	: 377(S.E. Mazuko) y 206(S.E. Puerto Maldonado)
Conductor de fase	: AAAC de 185 mm ² de sección
Cable de Guarda	: 50 mm ² Acero EHS
Estructuras a instalar	: Torres metálicas A° G° de celosía tipos S, A y T
Disposición de conductores.	: Triangular, Vertical
Aisladores	: Porcelana

Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

2.9.4. criterios de diseño mecánico para la línea de transmisión.

2.9.4.1. Hipótesis de cálculo para el conductor

Los cálculos para la línea de transmisión se realizaron, con las siguientes hipótesis de carga SEACE 3 (2021):

Hipótesis N° 1	:	E.D.S.
- Temperatura media	:	25 °C
- Velocidad del viento	:	nula
Hipótesis N° 2	:	Esfuerzo Máx. (Viento máximo)
- Temperatura	:	10 °C
- Velocidad del viento	:	94 km/h
Hipótesis N° 3	:	Flecha Máxima
- Temperatura	:	65 °C
- Velocidad del viento	:	nula
Hipótesis N° 4	:	Flecha mínima
- Temperatura	:	10 °C
- Velocidad del viento	:	nula
Hipótesis N° 5	:	Oscilación de cadena
- Temperatura	:	10 °C
- Velocidad del viento	:	47 km/h

2.9.4.2. Tensado del Conductor

En la selección del esfuerzo del E.D.S. (Tensión de cada día) del conductor activo, se tomaron las siguientes consideraciones:

- En las condiciones de carga media anual (Tensión de cada día E.D.S.), el esfuerzo tangencial máximo no debe sobrepasar, el 18% en condiciones iniciales y del 15% en condición final.
- La condición inicial, es aplicada para el cálculo de estructuras, y la condición final, es aplicada, en la distribución de estructuras.
- El esfuerzo E.D.S. debe ser tal que, en la hipótesis de máxima sobrecarga, el esfuerzo

tangencial máximo no sobrepase, el 60%, del esfuerzo de rotura del conductor activo.

2.9.5. Torres proyectadas en la línea de transmisión.

En el proyecto; “RENOVACION DE LINEA DE TRANSMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN EN 138 KV Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS”, se utilizarán estructuras metálicas de celosía, de tipo S, A y T, construidas, con perfiles angulares, de acero galvanizado en caliente, cuyas torres, tendrán, cuatro patas y extensiones variables, con disposición triangular y vertical, con una terna y preparadas para llevar un cable de guarda, cuya características, estarán definidas, en los planos de fabricación. De acuerdo, con el trazo de la ruta de la línea de transmisión, se definen las estructuras, como:

S Alineamiento (Suspensión)

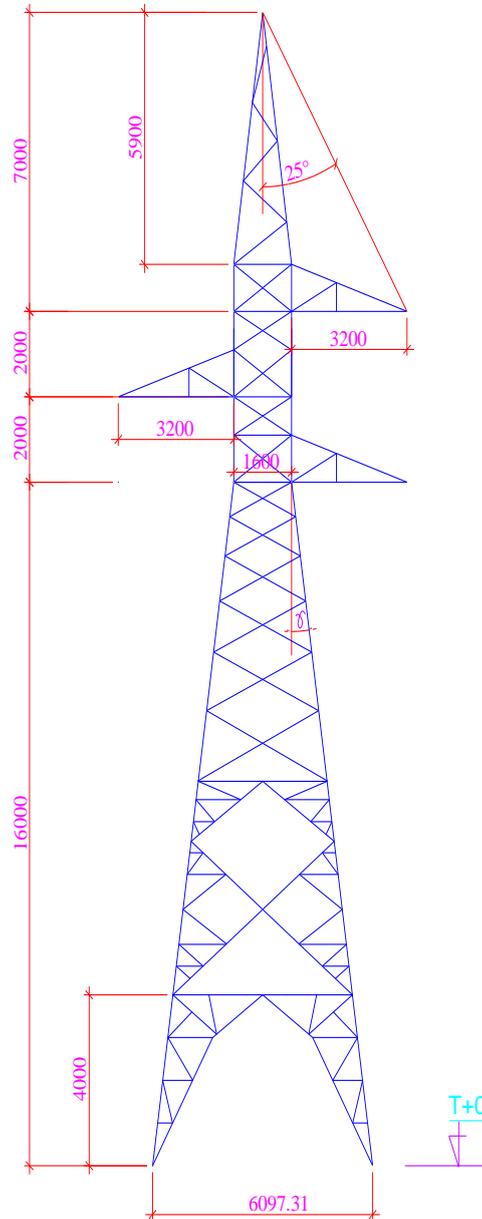
A Angular / Retención (Anclaje)

T Angular / Terminal / Retención (Anclaje)

Por lo que, en la presente investigación se tomará, como muestra, una torre angular, cuya silueta, donde se muestra su dimensionado, en base a los estudios eléctricos, con los que se definió su altura, distancias verticales y horizontales de los conductores, y cable de guarda a la torre y al suelo, como se muestra, a continuación.

Figura 56.

Silueta de torre de proyecto a modelar.



Fuente: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

2.9.6. Modelo de la torre en SAP2000.

La modelación de la estructura, se realizó en el programa SAP2000, mediante un modelo tridimensional de la estructura, y considerando un análisis lineal, por el método del elemento finito.

2.9.7. Materiales para construcción de torres de transmisión.

Las torres de transmisión de energía eléctrica, usaran para su construcción, el material que cumpla, con las siguientes especificaciones:

- ✓ ASTM A36, para acero estructural.
- ✓ ASTM A242, para acero estructural, de baja aleación y de alta resistencia.
- ✓ ASTM A529, para acero estructural, con un punto de fluencia, mínimo de, 42.000 psi.
- ✓ ASTM A572, para aceros de columbio-vanadio, estructurales, de baja aleación, y de alta resistencia estructural.
- ✓ ASTM A588, para acero estructural, de baja aleación, de alta resistencia, con un punto de fluencia mínimo de, 50,000 psi.
- ✓ ASTM A606, acero, láminas y tiras, laminado en caliente y en frío, de alta resistencia, de baja aleación, con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica.

Esta lista de aceros adecuados no excluye el uso de otros aceros que se ajusten a las propiedades químicas y mecánicas de una de las especificaciones enumeradas u otras especificaciones, publicadas que establecen las propiedades e idoneidad del material (ASCE/SEI 10-15, 2015, p.5). Así mismo según la norma DGE-2013, indica que, los materiales que se utilizarán, en la fabricación de las torres, serán perfiles angulares, de lados iguales, con placas de acero estructural, o acero de alta resistencia, conforme a la norma ASTM A-36, para el acero estructural, o la norma ASTM A572 Grado 50, para el acero de alta resistencia. Podrán utilizarse normas de aceros equivalentes, siempre que sean sometidas a la aprobación del Propietario (ETS-LT, 2013, p.10)

2.9.8. Tamaños mínimos de perfiles para torres de transmisión.

Según la norma ACSE, para el diseño de torres de transmisión, los espesores mínimos serán de, 1/8 pulg. (3 mm), para miembros, y de 3/16 pulg. (5 mm), para placas de conexión. (ASCE/SEI 10-15, 2015, p.5). Así mismo, también se indica, que el acero, será, galvanizado, o protegido de otra forma, y deberá tener, un espesor mínimo, de 3/16 pulg. (4.8 mm), cuando se expone a la corrosión, a nivel del suelo, o debajo de este (ASCE/SEI 10-15, 2015, p.21). Por otro lado, la norma DGE (ETS-LT, 2013, p.11), indica que los tamaños mínimos de perfiles, serán los siguientes:

- ✓ Montantes y crucetas: 60 x 60 x 6 mm.
- ✓ Otros elementos: 40 x 40x 4 mm.
- ✓ Los diámetros mínimos de pernos serán.
- ✓ Montantes y crucetas: 16 mm.
- ✓ Otros elementos: 12 mm.
- ✓ El espesor mínimo de placas: 6 mm.

Indicando, que todos los elementos de las estructuras de las torres, incluidos los stubs y parrillas, serán galvanizados, en conformidad con él, ASTM A-123 y ASTM A-153, aplicándose el proceso de inmersión en caliente. Donde todos los elementos componentes de las estructuras, serán sometidos al proceso de galvanización, después que hayan sido maquinados, y no se aplicará proceso alguno, de mecanización después de la galvanización (ETS-LT, 2013, p.13).

2.9.9. Índices o relaciones de esbeltez.

Las relaciones de esbeltez limitantes, para elementos, que soportan esfuerzos de compresión, serán las siguientes;

- ✓ Para elementos de patas, $L / r \leq 150$,
- ✓ Para otros miembros, $KL / r \leq 200$.

La relación de esbeltez, KL / r , para miembros redundantes, no deberá exceder de, 250. La relación de esbeltez, KL / r , para miembros, solo en tracción, será mayor que 300, pero menor o igual a 500 (ASCE/SEI 10-15, 2015, p.5).

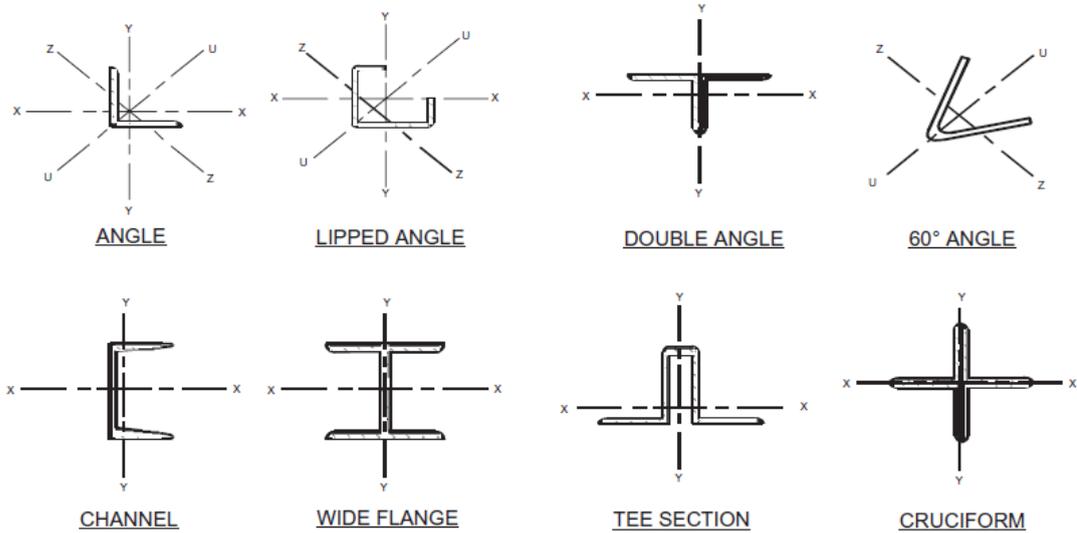
2.9.10. Propiedades de las secciones.

Las propiedades de las secciones, como área, momento de inercia, radio de giro, módulo de la sección, y similares, se basarán, en la sección transversal bruta, excepto, cuando se especifique una sección transversal reducida, o una sección transversal neta (ASCE/SEI 10-15, 2015, p.5). De otro lado, si todos los elementos, son completamente efectivos, la sección transversal reducida y la sección transversal bruta, son idénticas.

Las secciones transversales típicas, se muestran en la figura 57, donde los ejes x e y , son ejes principales, para todas las secciones transversales mostradas excepto, el ángulo, para el cual los ejes principales son, u y z , siendo u , el eje de simetría para ángulos. La figura 58 (a), muestra, el método para determinar, w / t , que es, la relación entre el ancho plano y el espesor de un elemento de miembro. Para secciones, laminadas en caliente, w es la distancia, desde el borde del filete, hasta la fibra extrema, mientras que, para los miembros conformados en frío, es la distancia que se muestra en la Fig. 58 (b). Se puede usar un radio de curvatura mayor, dados por fabricación, pero para propósitos de diseño, w se basará, en un radio de curvatura interior máximo, de dos veces el espesor del elemento (ASCE/SEI 10-15, 2015, p.5).

Figura 57.

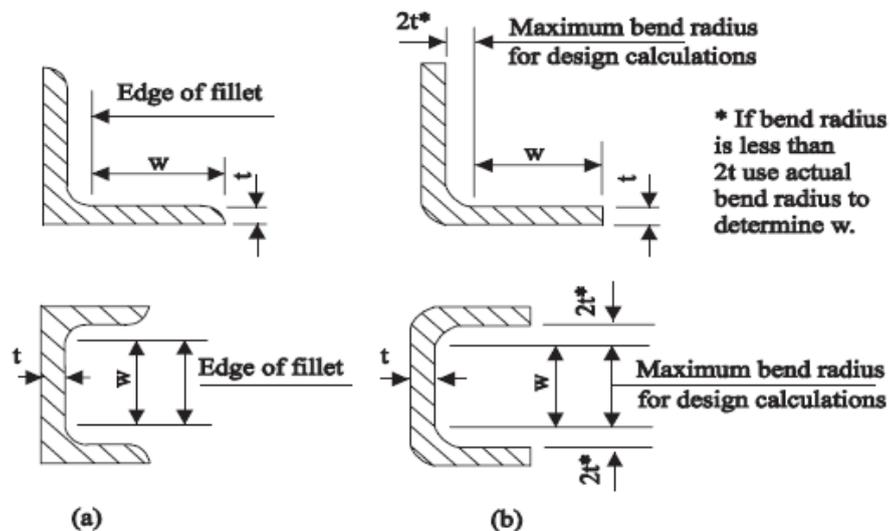
Secciones transversales y ejes típicos.



Nota: Tomado de Manual ACSE/SEI 10-15, Design of Latticed Steel Transmission Structures (p.36), ACSE/SEI 10-15 (2015), American Society of Civil Engineers.

Figura 58.

Determinación de relación w/t .



Nota: Tomado de Manual ACSE/SEI 10-15, Design of Latticed Steel Transmission Structures (p.6), ACSE/SEI 10-15 (2015), American Society of Civil Engineers.

2.9.11. Diseño a compresión de elementos de la torre de transmisión.

El esfuerzo de diseño a compresión, F_a , en el área de la sección transversal bruta, o reducida, en los miembros de compresión cargados axialmente, se calculará como se indica a continuación (ASCE/SEI 10-15, 2015, p.5).

$$F_a = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_y; \frac{KL}{r} \leq C_c$$

$$F_a = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2}; \frac{KL}{r} > C_c$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}}$$

Donde:

F_y : Limite de fluencia mínimo garantizado.

E : Módulo de elasticidad.

L : Longitud no arriostrada.

R : Radio de giro.

K : Coeficiente, de longitud efectiva.

C_c : Relación de esbeltez de columna, que separa el pandeo elástico, e inelástico.

Relación máxima permitida del ángulo plano ancho / espesor (w / t) = 25

Si la relación w / t excede el límite dado por

$$\left(\frac{w}{t} \right)_{\text{lim}} = \frac{80\Psi}{\sqrt{F_y}}$$

El esfuerzo de diseño F_a , será evaluados de acuerdo a la ecuación indicada líneas arriba, con F_y reemplazado por F_{cr} , donde F_{cr} está dado por (ASCE/SEI 10-15, 2015, p.6):

$$F_{cr} = \left[1.677 - 0.677 \frac{w/t}{(w/t)_{\text{lim}}} \right] F_y; \quad \left(\frac{w}{t} \right)_{\text{lim}} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{144\Psi}{\sqrt{F_y}};$$

$$F_{cr} = \frac{0.0332\pi^2 E}{(w/t)^2}; \quad \frac{w}{t} > \frac{144\Psi}{\sqrt{F_y}};$$

Donde;

$\Psi = 1$, para F_y , en ksi, y 2.62, para F_y , en MPa.

2.9.11.1. Longitudes efectivas de miembros angulares

Miembros de patas

Para miembros de pata atornillados en ambas caras en las conexiones,

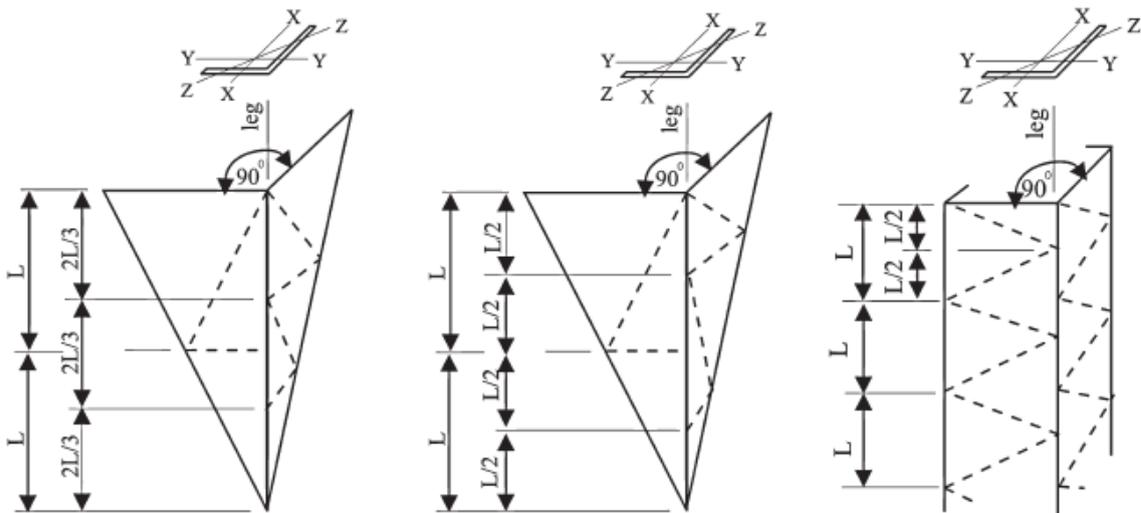
$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; \quad \text{para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 150$$

Para miembros de patas con ángulos de patas iguales, sin cambios, en la carga de los miembros, entre paneles, usados con arriostramientos escalonados, los valores de control, KL/r , serán como se muestra en la Fig. 59.

Figura 59.

Ángulo de pierna igual con arriostramiento escalonado

- (a) Leg Controlled by, $(2/3L)/r_z$ (b) Leg Controlled by, $(1.2L)/r_x$ (c) Leg Controlled by, $(1.2L)/r_x$



Nota: Tomado de Manual ACSE/SEI 10-15, Design of Latticed Steel Transmission Structures (p.7), ACSE/SEI 10-15 (2015), American Society of Civil Engineers.

Otros miembros de compresión.

Para miembros con una carga concéntrica, en ambos extremos, sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; \text{ para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120$$

Para miembros con carga concéntrica en un, extremo, con normal excentricidad de encuadre, en el otro extremo, sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = 30 + 0.75 \frac{L}{r}; \text{ para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120$$

Para miembros con excentricidades de estructura normales, en ambos extremos del sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = 60 + 0.50 \frac{L}{r}; \text{ para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120$$

Para miembros que no estén restringidos contra, la rotación, en ambos extremos del sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; \text{ para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 200$$

Para miembros parcialmente restringidos, contra la rotación, en un extremo, sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = 28.6 + 0.762 \frac{L}{r}; \text{ para } 120 \leq \frac{L}{r} \leq 225$$

Para miembros parcialmente restringidos, contra la rotación, en ambos extremos, sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = 46.2 + 0.615 \frac{L}{r}; \text{ para } 120 \leq \frac{L}{r} \leq 250$$

Miembros redundantes

Para miembros con una carga concéntrica en ambos extremos, sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; \text{ para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120$$

Para miembros con una carga concéntrica en un extremo, y excentricidad de estructura normal en el otro extremo, sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = 30 + 0.75 \frac{L}{r}; \text{ para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120$$

Para miembros con excentricidades de estructura normales, en ambos extremos, sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = 60 + 0.50 \frac{L}{r}; \text{ para } 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120$$

Si los miembros no están restringidos contra la rotación, en ambos extremos, sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; \text{ para } 120 \leq \frac{L}{r} \leq 250$$

Si los miembros están parcialmente restringidos, contra la rotación en ambos extremos, sin soporte,

$$\frac{KL}{r} = 42.6 + 0.615 \frac{L}{r}; \text{ para } 120 \leq \frac{L}{r} \leq 330$$

2.9.12. Diseño elementos a tracción en la torre de trasmisión.

2.9.12.1. Diseño de esfuerzos a tracción.

El esfuerzo de diseño a tracción, F_t , en los elementos en tracción, cargados concéntricamente, será, F_y , en el área de sección transversal neta, A_n , donde, A_n , es el área de sección transversal bruta, A_g (la suma de los productos del espesor, y el ancho bruto, de cada elemento, medido, normal al eje del miembro), menos la pérdida debida a agujeros, u otras aberturas, en la sección, que se está investigando. Si hay una cadena de agujeros, en una línea diagonal, o en zigzag, el ancho neto de un elemento, se determinará, deduciendo del ancho bruto, la suma de los diámetros de todos los agujeros en la cadena, sumando para cada espacio de calibre en la cadena, la cantidad $s^2 / 4g$, donde, s = separación longitudinal (paso), y g = separación transversal (calibre) de dos agujeros, consecutivos cualesquiera. El área crítica de la sección transversal neta, A_n , se obtiene de la cadena, que da la menor anchura neta. Al calcular, el área neta para la tensión, el diámetro de un orificio de perno que se ha perforado, debe tomarse como, 1/16 de pulgada (1,6 mm), mayor que el diámetro nominal del orificio. Para los orificios de pernos, que se han perforado, o subperforado y escariado, se puede utilizar el diámetro nominal del orificio. Los ángulos lisos y de labios atornillados, en ambas patas, en ambos extremos, se considerarán cargados concéntricamente (ASCE/SEI 10-15, 2015, p.9).

2.9.12.2. Miembros tipo ángulo.

El esfuerzo de diseño a tracción, F_t , en el área neta, de los ángulos planos conectados, debe ser, $0.9F_y$. Si las alas son desiguales, y el ala corta está conectada, el ala, no conectada, se considerará del mismo tamaño, que el ala conectada. Si el centroide del patrón de perno, en el ala conectada, está fuera del centro de gravedad del ángulo, la conexión se verificará para la ruptura (también llamada corte de bloque), mediante la siguiente ecuación:

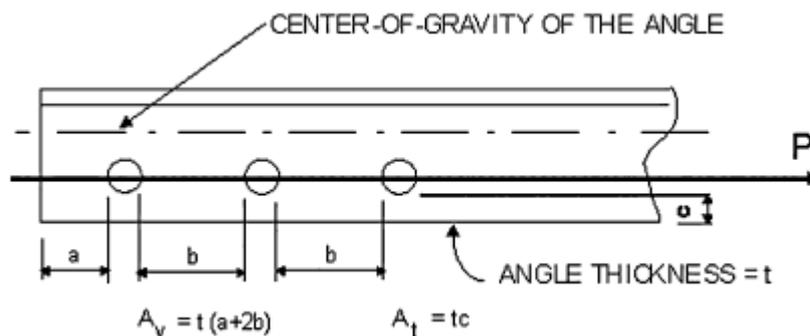
$$P = 0.60A_v + A_t F_y$$

Donde:

- P : Fuerza de tracción, de diseño en la conexión.
- F_y : Límite elástico mínimo, especificado del miembro.
- F_u : Resistencia a la tracción mínima, especificada del miembro.
- A_v : Área neta mínima en cortante, a lo largo de una línea, de fuerza transmitida, vea la figura 60.
- A_t : Área neta mínima en tensión, desde el agujero hasta la punta del ángulo, perpendicular a la línea de fuerza; vea la Fig. 60.

Figura 60.

Determinación de la ruptura (corte del bloque)



Nota: Tomado de Manual ACSE/SEI 10-15, Design of Latticed Steel Transmission Structures (p.6), ACSE/SEI 10-15 (2015), American Society of Civil Engineers.

CAPÍTULO III. RESULTADOS.

3.1. Modelamiento de Torre Metálica Reticulada, Auto Soportada, Para línea de Transmisión en Alta Tensión.

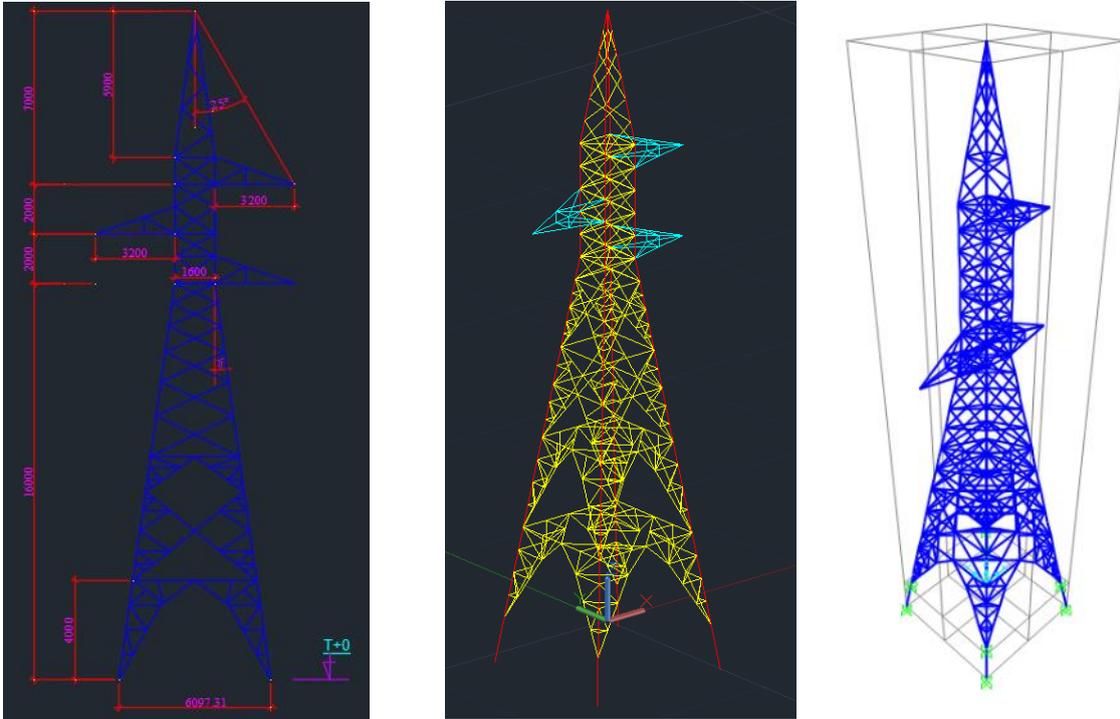
3.1.1. Geometría de la torre.

La torre elegida del proyecto “RENOVACIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN, EN NIVEL DE TENSIÓN, EN 138 KV Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS”, según se definió en dicho expediente, donde el modelado de la torre se inicia por el dibujo en AutoCAD el cual se trabajó en un formato 3D, a base de un modelo 2D o silueta de la torre base, propuesta para diseño en dicho expediente. En ese sentido, luego de la culminación en del formato 3D de la torre, se importó a formato DXF para luego importar al SAP2000. Por consiguiente, la necesidad de variar el diseño de la torre y con ello la silueta 2D, propuesta en el expediente técnico del que se tomó, fue determinado por el requerimiento estructural, determinado por el SAP2000, donde se indicaba las fallas de materiales, determinando así, las secciones de los perfiles y arriostramientos necesarios para cumplir las exigencias de las cargas aplicadas.

Figura 61.

Dibujo de torre metálica en Autocad 2D (a) y 3D (b) y modelo en SAP2000.

(a) silueta del proyecto. (b) modelo para exportar a DXF. (c)



Nota: Silueta de torre tipo A, modelada en SAP2000.

3.1.2. Materiales.

Se seleccionó como material, acero galvanizado, ASTM A36, según lo indicado en la norma ASCE/SEI 10-15, manteniendo, espesores mínimos serán de 1/8 pulg. (3 mm) para miembros estructurales. Así mismo, se tomó en cuenta lo indicado en la norma DGE (ETS-LT, 2013), que indica, que los tamaños mínimos de perfiles, serán los siguientes:

- ✓ Montantes y crucetas, 60 x 60 x 6 mm
- ✓ Otros elementos, 40 x 40x 4 mm

Creando selección automática de perfiles, de acuerdo a los requerimientos de carga.

Figura 62.

Propiedades del acero ASTM A36 utilizado en el modelo de la torre en SAP2000.

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box in SAP2000. It is divided into several sections:

- General Data:** Material Name and Display Color: A36; Material Type: Steel; Material Grade: Grade 36; Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume: 7849.0476; Mass per Unit Volume: 800.3801; Units: Kgf, m, C
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E: 2.039E+10; Poisson, U: 0.3; Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05; Shear Modulus, G: 7.842E+09
- Other Properties For Steel Materials:** Minimum Yield Stress, Fy: 25310507; Minimum Tensile Stress, Fu: 40778038; Expected Yield Stress, Fye: 37965760; Expected Tensile Stress, Fue: 44855842.

Fuente: Propiedades de Acero Ingresados a SAP2000.

Figura 63.

Perfiles metálicos angulares utilizado en el modelo de la torre en SAP2000.

The screenshot shows two instances of the 'Auto Selection Sections' dialog box. The left instance is titled 'Mat. Diagonales' and the right one is titled 'Mat. Mont. y Cruc.'. Both have 'Auto Section Type' set to 'Steel'. Below the dialog boxes, there are two lists of sections:

- Left Dialog (Mat. Diagonales):**
 - List of Sections: L3.5x3.5x1/4, L3.5x3.5x3/8, L4x4x1/2, L4x4x3/8, L5x5x1/2, L5x5x3/4, L5x5x3/8
 - Auto Selections: L1.5x1.5x1/4, L1.5x1.5x3/16, L2.5x2.5x1/4, L2x2x1/4, L2x2x3/16, L3x3x1/4, L3x3x3/8, L4x4x1/4
- Right Dialog (Mat. Mont. y Cruc.):**
 - List of Sections: L1.5x1.5x1/4, L1.5x1.5x3/16, L2x2x1/4, L2x2x3/16, L5x5x1/2
 - Auto Selections: L2.5x2.5x1/4, L3.5x3.5x1/4, L3.5x3.5x3/8, L3x3x1/4, L3x3x3/8, L4x4x1/2, L4x4x1/4, L4x4x3/8, L5x5x3/4

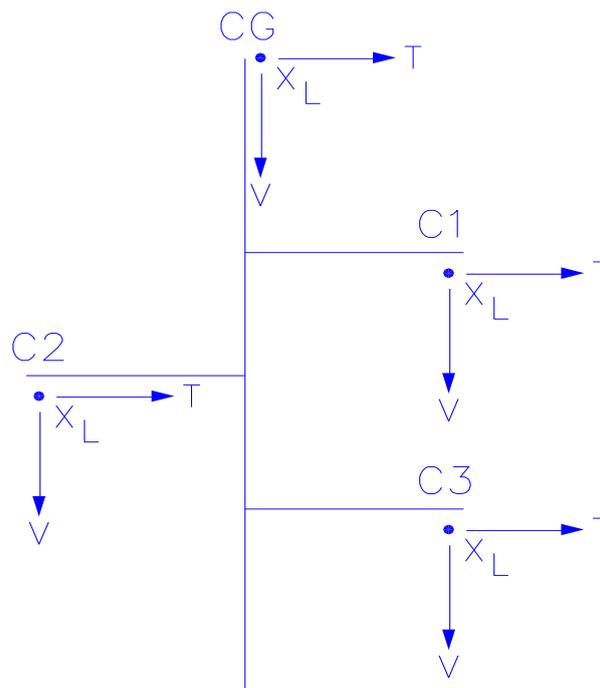
Fuente: Perfiles angulares seleccionados para calculo.

3.1.3. Árboles de carga.

Para la aplicación de cargas en la torre, se hace uso del árbol de cargas, donde se muestra, cómo se aplican las cargas en la estructura de celosía. Las cargas para el análisis se obtuvieron para diversas condiciones de carga, dado para condiciones normales y condiciones anormales, en el siguiente grafico se muestra dicha representación para la torre en estudio.

Figura 64.

Arboles de carga utilizado para el modelo de la torre en SAP2000.



Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

Donde las características de la torre se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 14.

Cargas verticales (V), trasversales (T) y longitudinales (L), aplicadas al modelo las torre en SAP2000, para las diferentes hipótesis de carga.

CARACTERISTICAS DE EMPLEO DE LA TORRE					
Tipo de estructura			Angular	Terminal	
Angulo de desviacion de línea	°	Ang	30	0	
Vano viento	m	Vv	450	800	
Vano Gravante	m	Vg	1000	1200	
Vano maximo lateral	m	Vml	700	1200	

Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

Y los parámetros de cálculo para las cargas se dan a continuación.

Tabla 15.

Cargas verticales (V), transversales (T) y longitudinales (L), aplicadas al modelo las torre en SAP2000, para las diferentes hipótesis de carga.

PARAMETROS BASICOS DE CALCULO			Angular	Terminal
Presión del viento	kg/m ²	Pv	40.27	
Espesor del manguito de hielo	mm	e	0.0	
Diametro del conductor	mm	Øc	18.90	
Diametro del cable de guarda	mm	Øcg	9.15	
Peso del conductor	kg/m	Wc	0.605	
Peso del cable de guarda	kg/m	Wcg	0.41	
Tiro máximo conductor (hip normal)	kg	Tc	954	954
Tiro máximo conductor (hip excepcional)	kg	T'c	1475	
Tiro máximo cable guarda (hip normal)	kg	Tcg	978	978
Tiro máximo cable guarda (hip excepcional)	kg	T'cg	1269	
Factor de sobrecarga (cargas transversales por viento, Tabla 253-1, CNE)			2.5	
Factor de sobrecarga (tension en el conductor, Tabla 253-1, CNE)			1.65	
Factor de sobrecarga (cargas verticales, Tabla 253-1, CNE)			1.5	

Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

3.1.4. Hipótesis de carga

Se definieron seis hipótesis o combinaciones de carga como son:

- Hipótesis 1: Condición Normal, Estructura de Angulo (30°).
- Hipótesis 2: Rotura del cable de guarda (C.G), Estructura de Angulo (30°).
- Hipótesis 3: Rotura del conductor en la fase 1 (C1), Estructura de Angulo (30°).
- Hipótesis 4: Rotura del conductor en la fase 2 (C2), Estructura de Angulo (30°).
- Hipótesis 5: Rotura del conductor en la fase 3 (C3), Estructura de Angulo (30°).
- Hipótesis 6: Condición Normal, como Estructura Terminal (0°).

Los valores de carga, aplicados en los puntos de amarre de la torre, para las diferentes hipótesis fueron tomadas del expediente, “RENOVACIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN, EN 138 KV Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS”, Cuyos datos se muestran en la siguiente tabla, en la cual, están aplicados, los factores de sobrecarga, dados en la tabla 253-1, del código nacional de electricidad (CNE, 2011). Los detalles de cálculo, se muestran, en el Anexo 07.

Tabla 16.

Cargas verticales (V), transversales (T) y longitudinales (L), aplicadas al modelo las torre en SAP2000, para las diferentes hipótesis de carga.

HIPOTESIS		1	2	3	4	5	6
CG	T	281	0	281	281	281	0
	V	835	417	835	835	835	549
	L	281	2094	281	281	281	1614
C1	T	326	326	0	326	326	0
	V	664	1200	870	1200	1200	755
	L	0	0	2434	0	0	1574
C2	T	326	326	326	0	326	0
	V	664	1200	1200	870	1200	755
	L	0	0	0	2434	0	1574
C3	T	326	326	326	326	0	0
	V	664	1200	1200	1200	870	755
	L	0	0	0	0	2434	1574
Factor seguridad		2.5	1.65	1.65	1.65	1.65	2.5
Presión viento(kg/m²)		40.27	0	0	0	0	40.27

Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

Las combinaciones de carga ingresadas al SAP 2000, se definieron como se indica a continuación;

Hipótesis 1:	$1.5*CM+V1+T1+L1+2.5*Wx.$
Hipótesis 2:	$1.5*CM+V2+T2+L2$
Hipótesis 3:	$1.5*CM+V3+T3+L3$
Hipótesis 4:	$1.5*CM+V4+T4+L4$
Hipótesis 5:	$1.5*CM+V5+T5+L5$
Hipótesis 6:	$1.5*CM+V6+T6+L6+2.5*Wy.$

Donde:

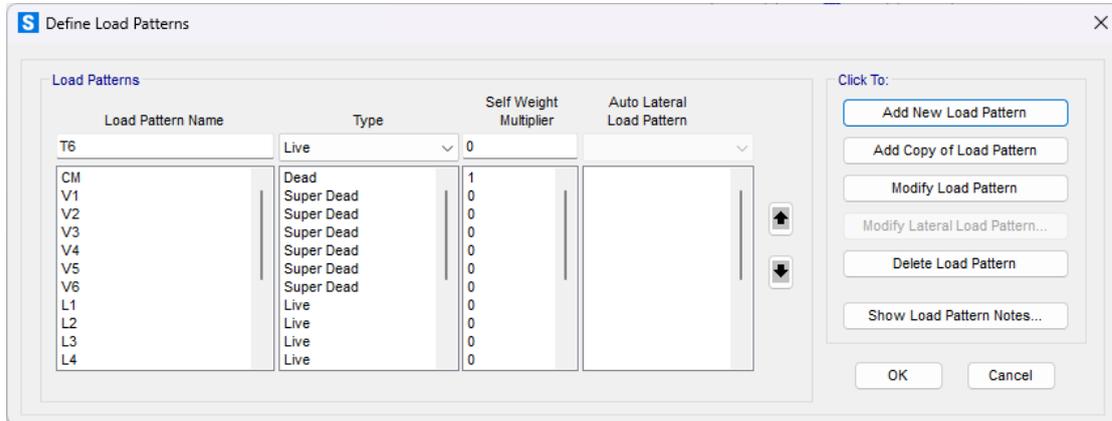
CM	: Carga muerta, definido como el peso propio de la torre.
Vi	: Carga vertical (V), debido al peso del conductor, incluido accesorios y cargas de construcción, operación y mantenimiento, para la hipótesis i.
Ti	: Carga transversal, producida por el tiro de los conductores debido al ángulo de desviación del conductor en la estructura para la hipótesis i.
Li	: Carga longitudinal, producida por el tiro de los conductores debido rotura o desbalance de carga en el conductor o tiro longitudinal en estructuras terminales, para la hipótesis i.
Wx	: carga de viento en la dirección x.
Wy	: carga de viento en la dirección y.

En la Tabla 16, se muestran, los valores de las cargas V, T y L, los cuales tienen los factores de sobrecarga aplicados, por eso no se consideró, esos factores de carga en las combinaciones de carga ya descritas.

A continuación, se muestra los datos descritos, ingresados al SAP2000.

Figura 65.

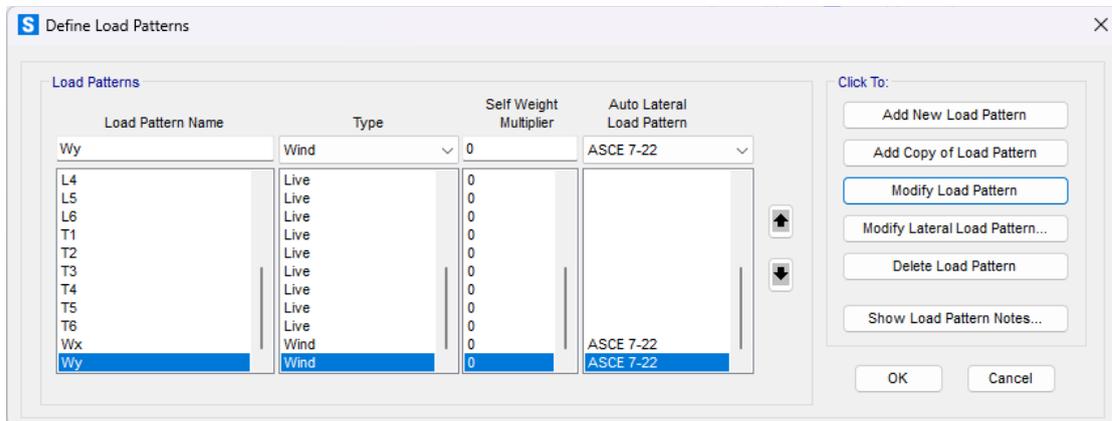
Definición de patrones de carga en SAP2000.



Nota: Patrones de carga ingresados a SAP 2000.

Figura 66.

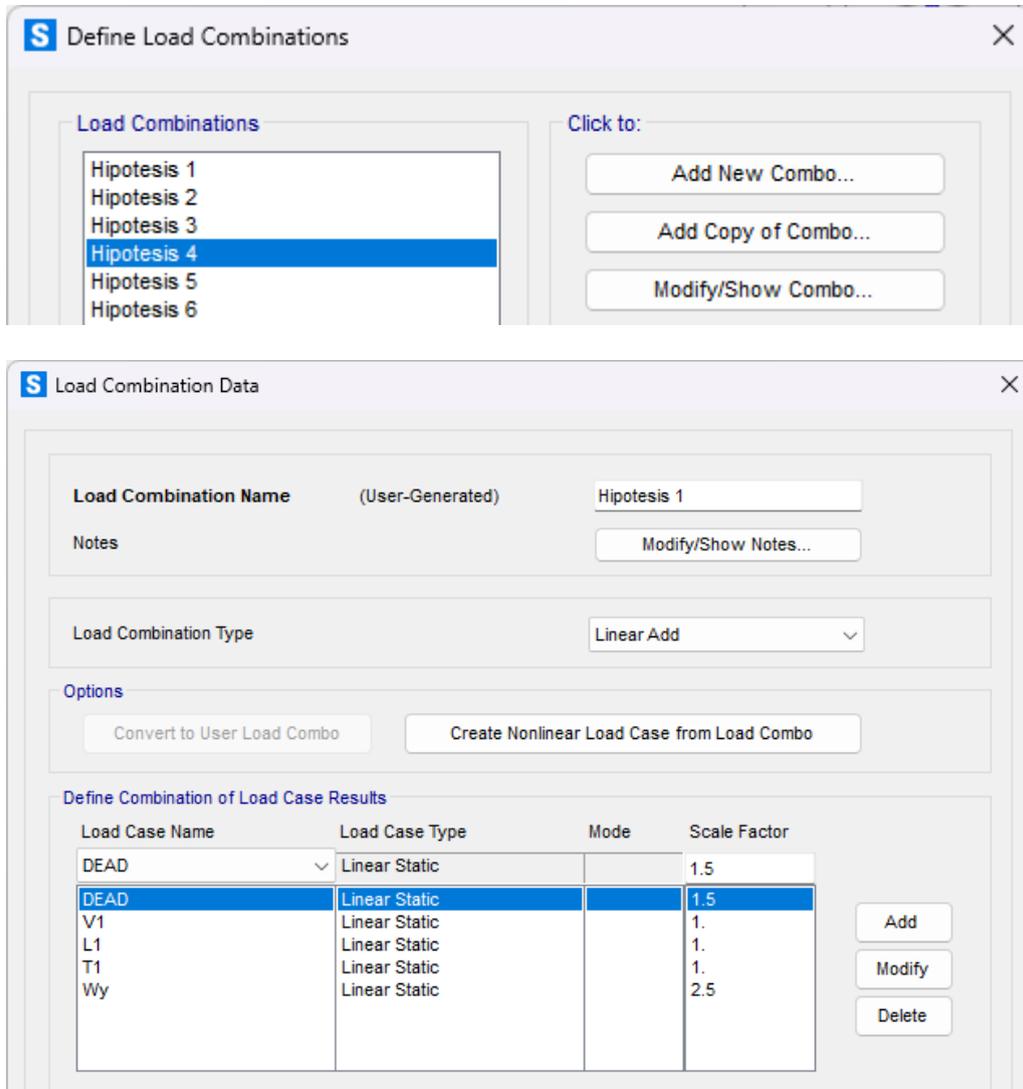
Definición de patrones de carga en SAP2000.



Nota: Patrones de carga ingresados a SAP 2000.

Figura 67.

Definición de combinaciones de carga en SAP2000.

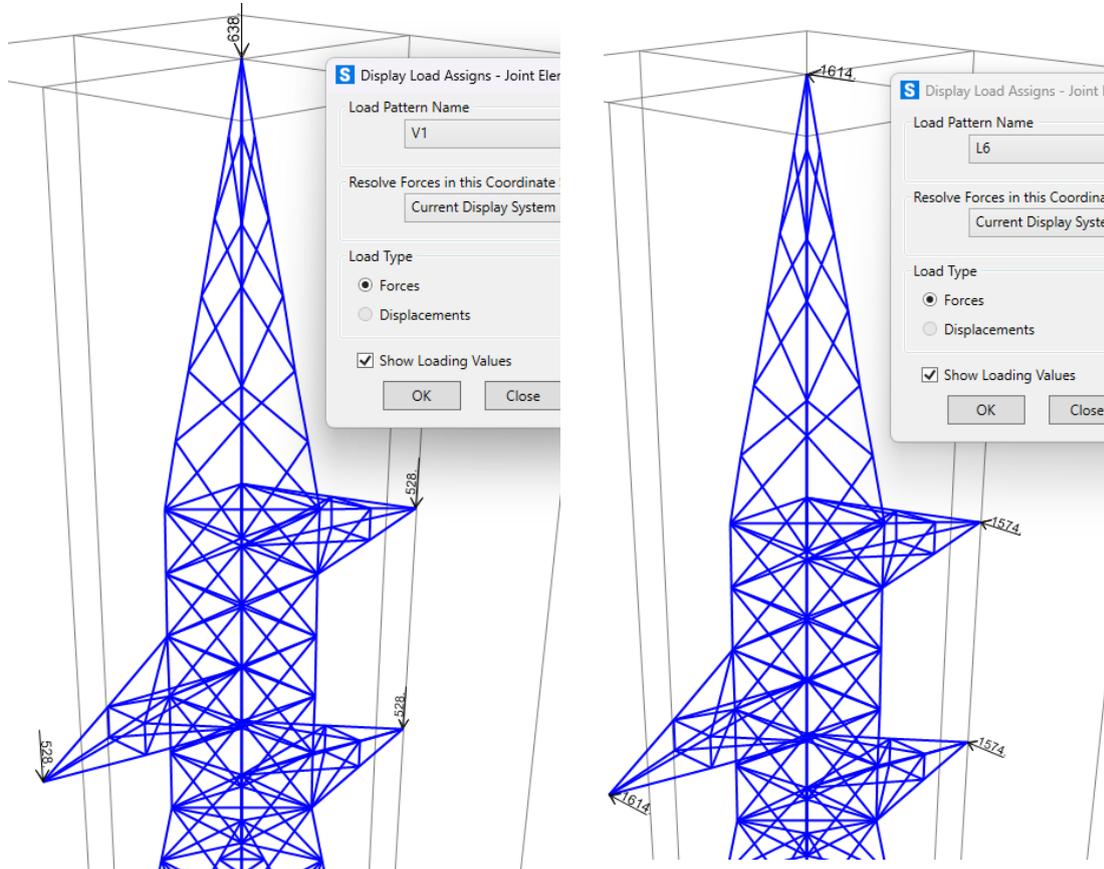


Nota: Combinaciones de carga para calculo.

A continuación, se muestra las cargas aplicadas a la torre.

Figura 68.

Asignación de cargas en el modelo de SAP2000.



Nota: Asignación de carga en la torre metálica autoportada.

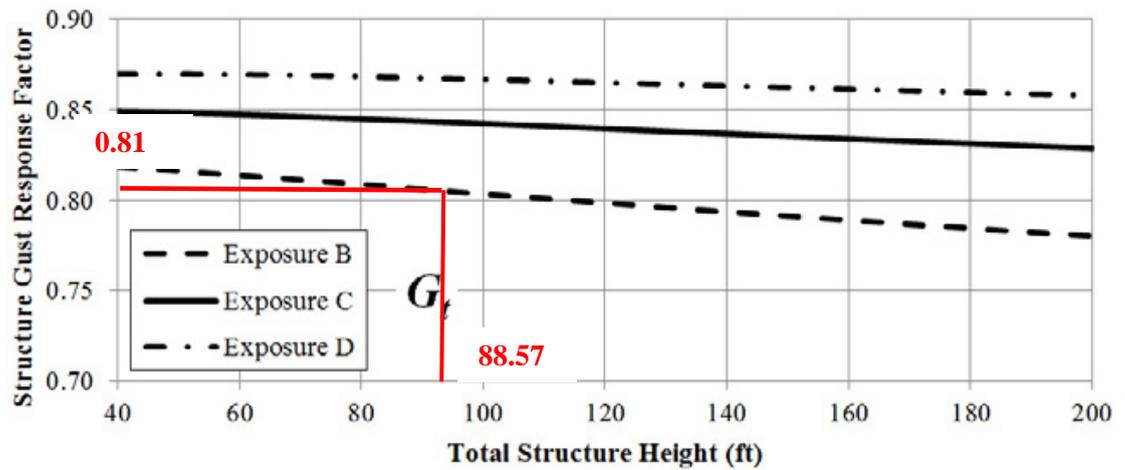
Para la aplicación de cargas de viento, se crearon los patrones de carga para las velocidades de viento, tanto en la dirección, x (W_x), como en la dirección, y (W_y), tal como se indica, en la figura N° 70 y 71, de acuerdo con lo establecido, en la norma ACSE 7-16. Tomándose como velocidad de viento, para calculo, la indicada en el C.N.E, suministro 2011.

Donde la velocidad del viento a 10m = 90km/h≈55.92mph (valor mínimo del CNE y lo señalado en la norma E.020). Así mismo, de acuerdo con las características de la zona donde se instalarán las torres, se elige categoría de exposición B, donde interpolando para una altura de torre de 27m≈88.57pies con datos de Tabla 04 Se tiene, $k_{zt}=k_z=0.946$, con el

factor de ráfaga, determinado según el gráfico siguiente, $G_t=0.81$, para una relación de sólidos de la estructura de $\Phi=0.20$.

Figura 69.

Determinación de factor de ráfaga.



Nota: Factor de ráfaga obtenido gráficamente según ACSE.

Figura 70.

Velocidad W_x , según datos de ACSE 7-16 y CNE-Suministro 2011, asignados en SAP2000.

ASCE 7-16 Wind Load Pattern

Exposure and Pressure Coefficients

- Exposure from Extents of Rigid Diaphragms
- Exposure from Frame and Area Objects
 - Include Area Objects
 - Include Frame Objects (Open Structure)

Wind Exposure Parameters

Wind Direction Angle: 0.

Windward Coeff, C_p : []

Leeward Coeff, C_p : []

Case (ASCE 7-16 Fig. 27.3-8): []

e1 Ratio (ASCE 7-16 Fig. 27.3-8): []

e2 Ratio (ASCE 7-16 Fig. 27.3-8): []

Modify/Show Exposure Widths...

Exposure Height

- Program Calculated
- User Specified
 - Reset Defaults
 - Maximum Global Z: 26.9
 - Minimum Global Z: 0.

Wind Coefficients

Wind Speed (mph): 55.92

Exposure Type: B

Topographical Factor, K_{zt} : 0.946

Gust Factor: 0.81

Directionality Factor, K_d : 0.85

Solid / Gross Area Ratio: 0.2

OK

Cancel

Nota: Datos ingresados, para el cálculo de carga de viento, en SAP2000.

Figura 71.

Velocidad Wy, según datos de ACSE 7-16 y CNE-Suministro 2011, asignados en SAP2000.

Nota: Datos ingresados, para el cálculo de carga de viento, en SAP2000.

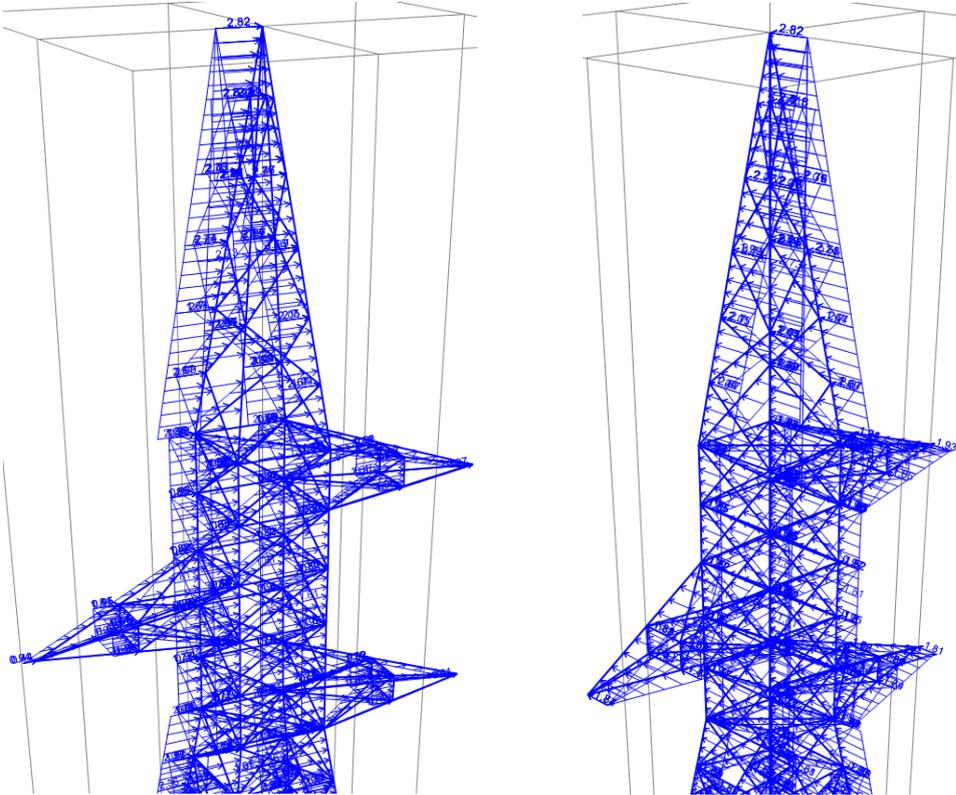
Donde el programa asignara, automáticamente las cargas de viento, que se muestra a continuación.

Figura 72.

Cargas de viento mostradas y asignadas al modelo en SAP2000.

(a) Carga de viento W_x .

(b) Carga de Viento W_y .



Nota: visualización de cargas de viento aplicado a la torre metálica en SAP2000.

3.1.5. Análisis estructural por método de elementos finitos (MEF).

Como la torre es una estructura articulada, se liberó los nudos de momentos en el software, de tal manera que los perfiles estructurales trabajen a tracción y compresión pura.

Figura 73.

Uniones en los perfiles de una torre.

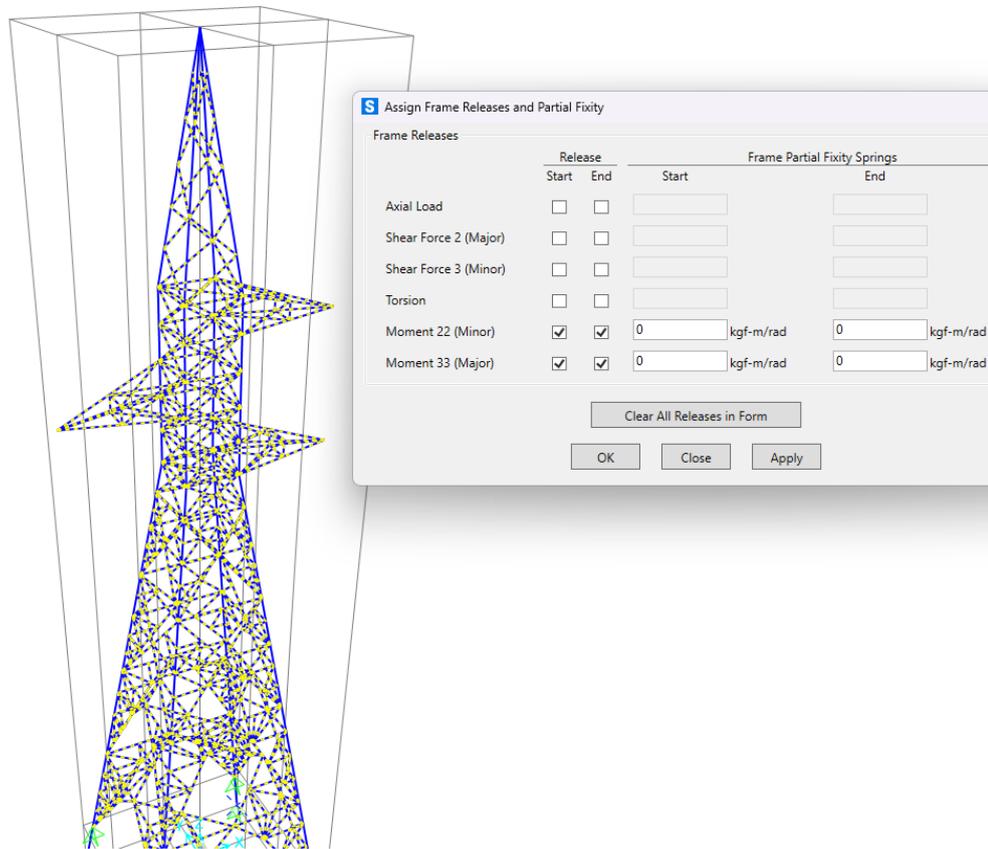


Nota: Visualización de nodos o uniones de una torre de transmisión en construcción.

Primero seleccionamos los perfiles de la estructura para luego liberar momentos, en Assign/Frame/Releases/Partial Fixity.

Figura 74.

Liberación de momentos en uniones en SAP2000.

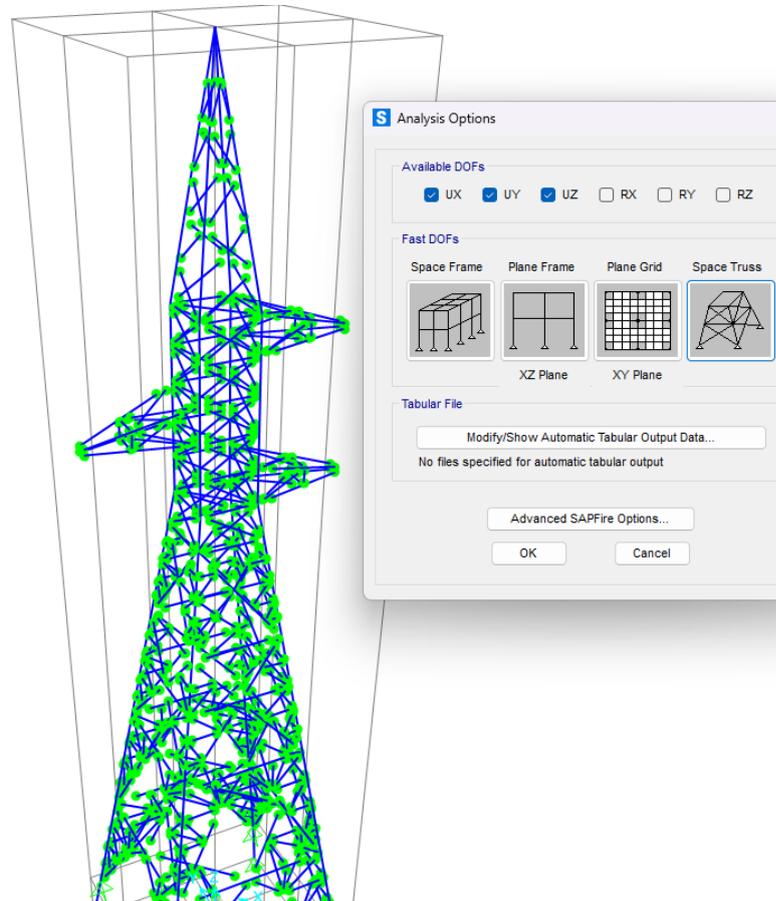


Nota: liberación de momentos flectores en nodos.

Par luego en las opciones de análisis, Analyze/Analysis Options, se selecciona Space Truss,

Figura 75.

Opción de análisis: Space frame



Nota: Análisis tipo frame, SAP2000.

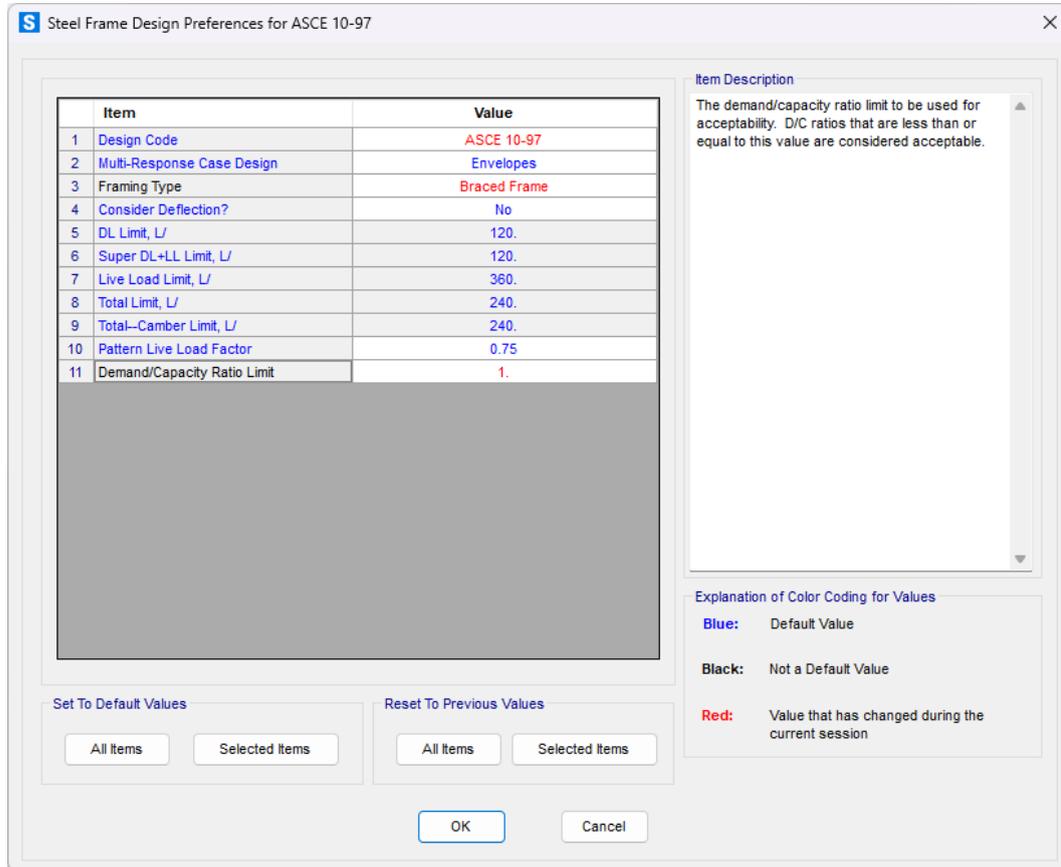
Luego se corre el programa, seleccionado Run Analysis, seleccionando Run Now, procediendo así, a verificar los resultados, calculados, con los perfiles seleccionados, verificando su capacidad de carga, de tal manera que dichos Frames o perfiles metálicos de celosía, trabajen al 80 y 95% de su capacidad, en la peor hipótesis. Evitando así, el sobredimensionamiento, que deriva en un mayor peso, y con ello aumento en el costo de construcción y mantenimiento.

3.1.6. Verificación del diseño del acero de SAP2000.

El programa SAP2000, realiza, el diseño de los elementos estructurales, bajo las norma ASCE 10-15, en este caso se tomó, la norma, ASCE/SEI 10-15, la cual, es una norma, específica, para el diseño de torres de transmisión, en acero, la cual, es una actualización de la norma anterior, la ACSE 10-97, donde, los parámetros de diseño, no han cambiado, por lo que, se mantiene, como norma, en el SAP2000, en su última versión (V.25), donde, para iniciar la verificación, de diseño, en SAP2000, ingresamos, en, Design/Steel Frame Design/View Revise Preferens, del cual seleccionamos la norma ACSE 10-97, y en el tipo de elemento o Frame Type, se selecciona, “braced frame”, ya que representa, la condición adecuada, para elementos de armadura, y no se considera los momentos en los nudos. Modificando, además, el factor, Demand/capacity Ratio Limit, en, 1, el cual está acorde, con la tabla 253-1, del CNE (2011, p.233).

Figura 76.

Parámetros para el diseño.



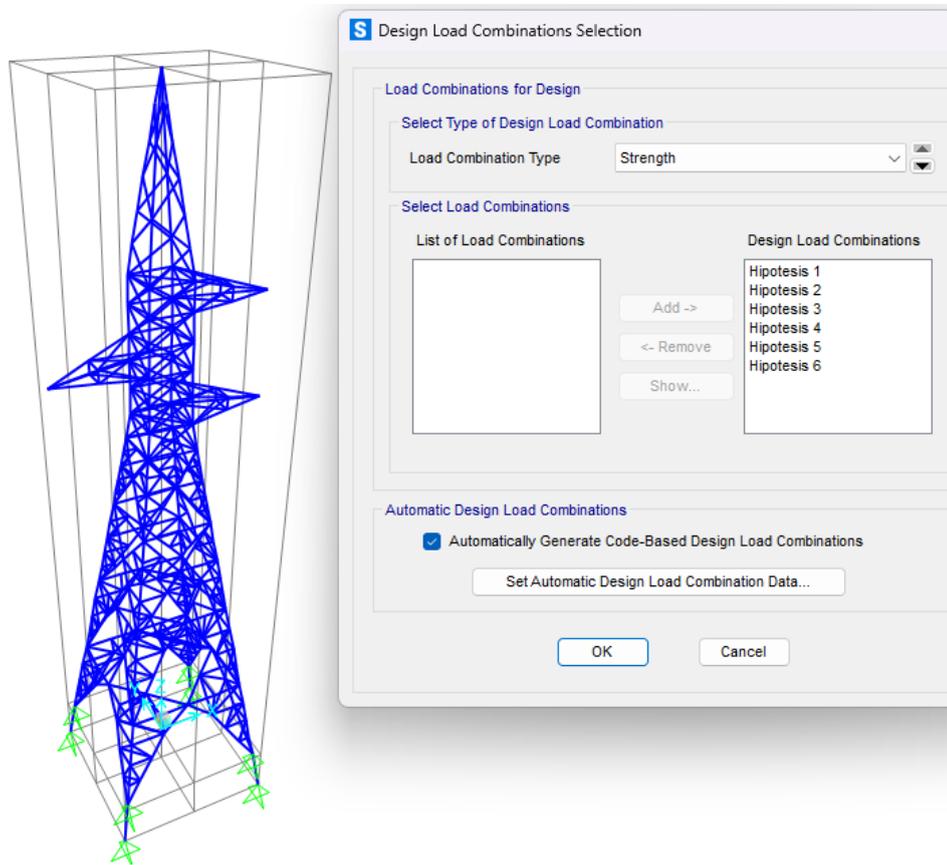
Nota: Parámetros para diseño en acero, según ACSE.

3.1.6.1. Combinaciones para verificación del diseño en acero.

Se elige las combinaciones de carga del proyecto analizadas, ya que el programa para la norma establecida (ASCE 10-97), contiene, una gama de combinaciones, establecidas, que, en este caso, su uso no es adecuado, pues, ya se tiene combinaciones definidas, para seis hipótesis, descritas líneas arriba, según, lo establecido, en el código nacional de electricidad (CNE, 2011).

Figura 77.

Combinaciones de carga, para diseño en acero, según ACSE 10-97.



Nota: Asignación de combinaciones de carga para el diseño en acero.

3.1.6.2. Resultados de verificación de diseño en acero.

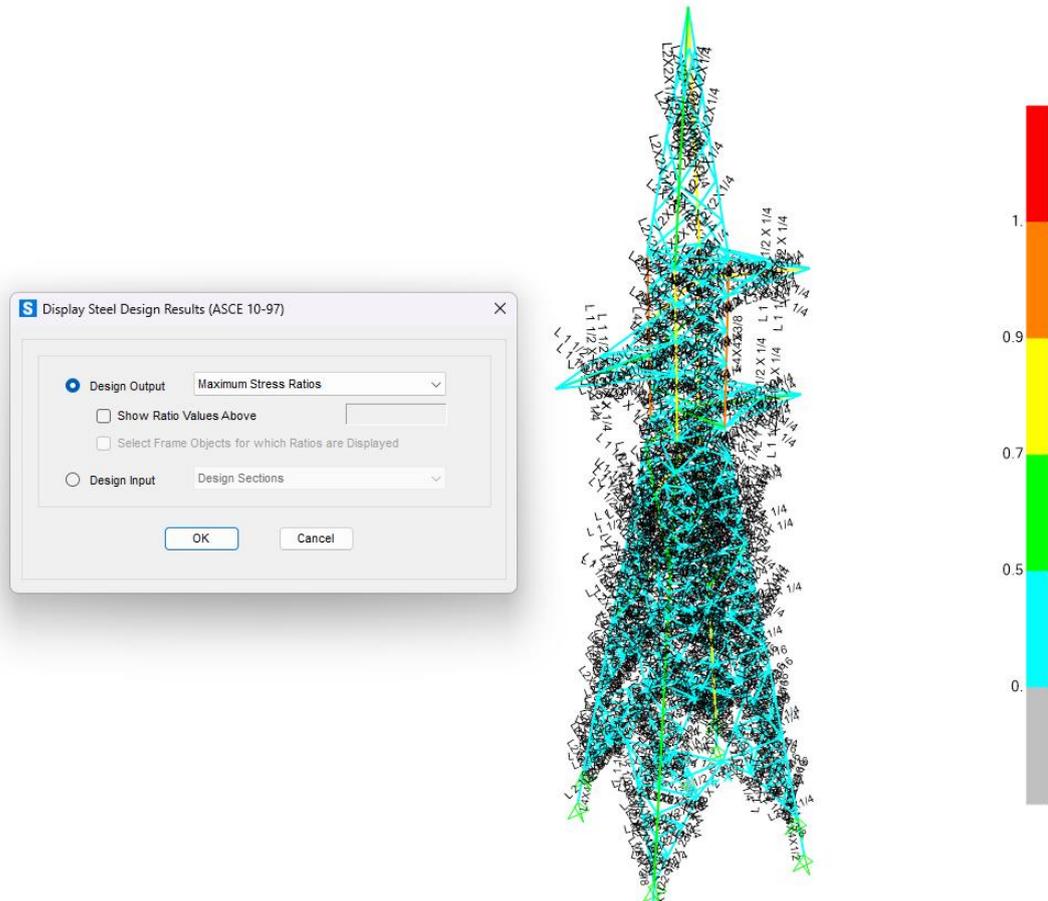
3.1.6.2.1. Ratio o relación de carga de perfiles

Luego de realizar los pasos anteriores, seleccionamos, en SAP2000, Design/Steel Frame Design/Star Design/Check of Structure, y una vez corrido el programa, se verifica el porcentaje de capacidad de carga, de cada elemento estructural, según los requerimientos, los cuales deben trabajar al 80 y 95% de su capacidad en la peor hipótesis, como se indicó líneas arriba, en caso de no cumplir, se verifica la causa y de ser necesario se incrementara la sección, o se arriostrara, en caso de tener fallas por pandeo.

En la siguiente figura, se muestra el resultado del diseño, verificándose, que los perfiles estructurales, cumplen los requerimientos de diseño, establecidos.

Figura 78.

Relación de capacidad de carga, de cada elemento estructural, según ACSE 10-97.



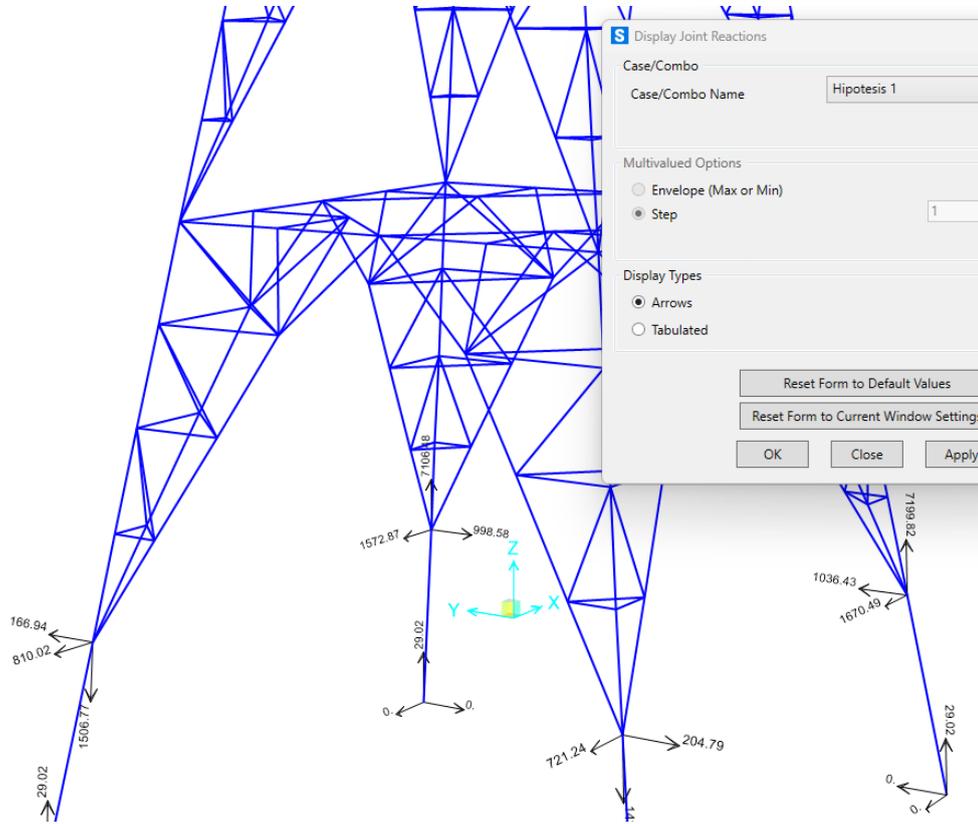
Nota: Resultados del diseño en acero.

3.1.7. Cálculo de reacciones en apoyos de la cimentación.

A continuación, se muestra, algunos resultados del cálculo de las reacciones, en las patas de las torres, con los cuales se procederá a realizar el diseño de las cimentaciones.

Figura 79.

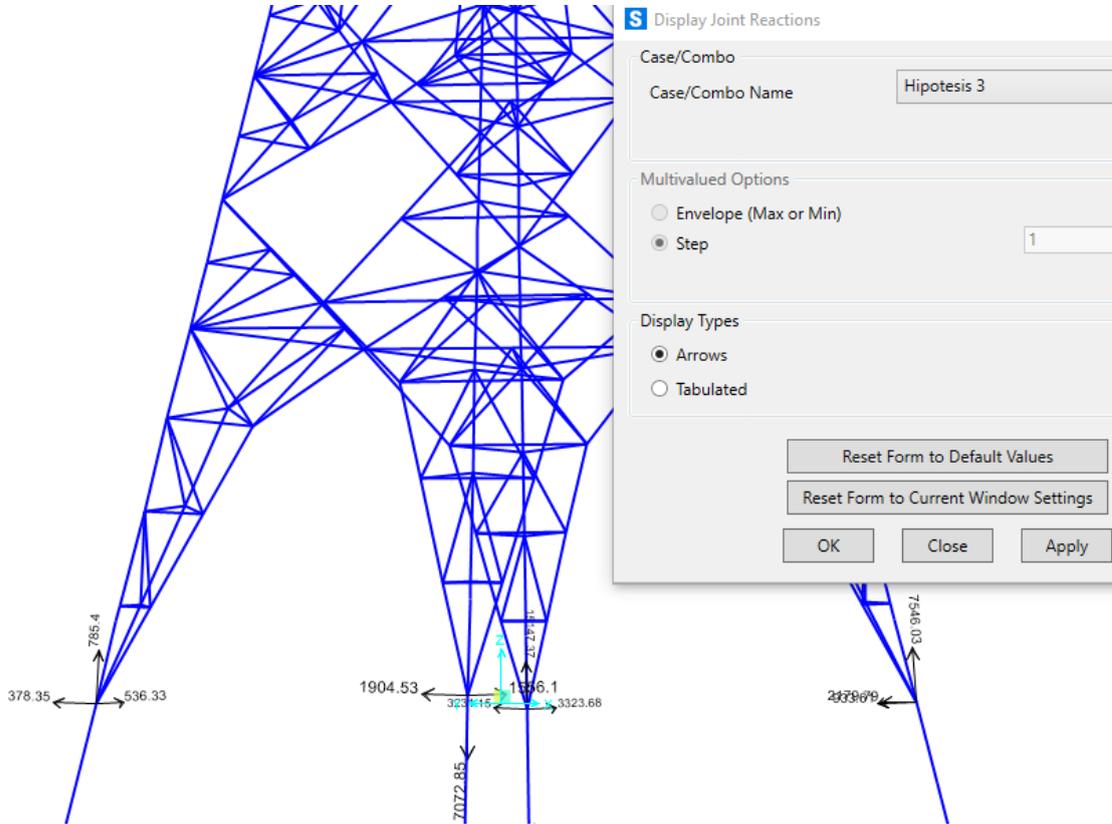
Reacciones calculadas en los apoyos de las patas, para la hipótesis 1.



Nota: Reacciones en las patas de la torre, calculadas con SAP2000.

Figura 80.

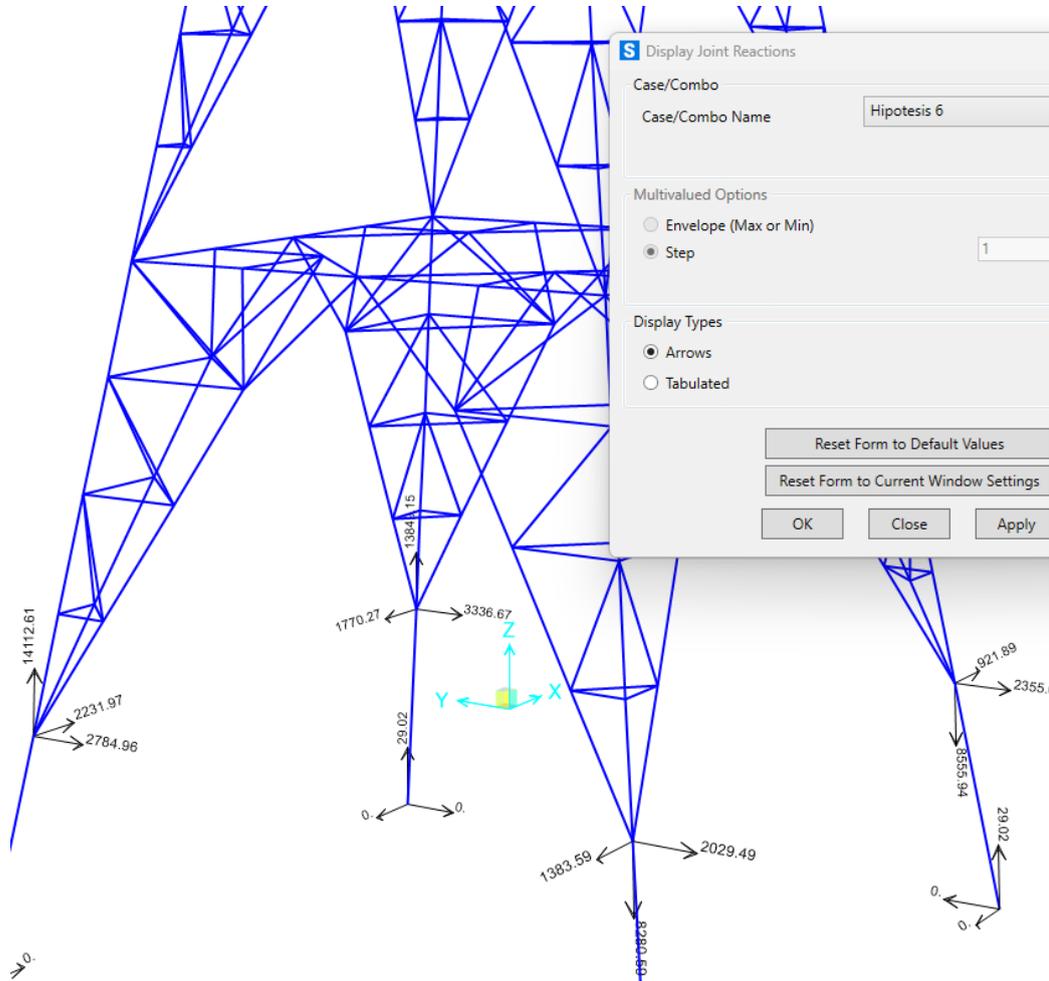
Reacciones calculadas en los apoyos de las patas, para la hipótesis 3.



Nota: Reacciones en las patas de la torre, calculadas con SAP2000.

Figura 81.

Reacciones calculadas en los apoyos de las patas, para la hipótesis 6.



Nota: Reacciones en las patas de la torre, calculadas con SAP2000.

3.1.8. Diseño de STUB.

3.1.8.1. Calculo se sección de perfil angular.

Material del stub, Acero A36:

$F_y=2530 \text{ kg/cm}^2$ y

$F_u=4080 \text{ kg/cm}^2$.

Con las reacciones máximas obtenidas para las diferentes hipótesis de diseño de la torre, se calculará el área requerida del perfil angular para el STUB. Donde el resumen del reporte calculado con SAP 2000, se muestran a continuación.

Tabla 17.

Reporte de recciones máximas en las patas de las torres, para las diferentes hipótesis calculadas con SAP2000.

TABLE: Joint Reactions					
Joint	OutputCase	CaseType	F1 (x)	F2 (y)	F3 (z)
Text	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf
5	Hipotesis 1	Combination	-721.24	-204.79	-1431.30
5	Hipotesis 2	Combination	-41.33	-83.42	-147.74
5	Hipotesis 3	Combination	-137.32	142.81	496.66
5	Hipotesis 4	Combination	-166.52	149.23	314.21
5	Hipotesis 5	Combination	254.99	-336.09	292.65
5	Hipotesis 6	Combination	-1383.59	-2029.49	-8280.59
6	Hipotesis 1	Combination	-810.02	166.94	-1506.77
6	Hipotesis 2	Combination	631.94	-752.37	4632.20
6	Hipotesis 3	Combination	755.57	-513.30	3779.08
6	Hipotesis 4	Combination	783.58	-529.72	4100.51
6	Hipotesis 5	Combination	317.28	-918.41	3822.65
6	Hipotesis 6	Combination	2231.97	-2784.96	14112.61
7	Hipotesis 1	Combination	-1670.49	1036.43	7199.82
7	Hipotesis 2	Combination	-286.96	169.66	1440.72
7	Hipotesis 3	Combination	-638.31	12.98	2412.58
7	Hipotesis 4	Combination	-586.80	2.35	2031.12
7	Hipotesis 5	Combination	-145.26	418.78	2277.70
7	Hipotesis 6	Combination	921.89	-2355.02	-8555.94
8	Hipotesis 1	Combination	-1572.87	-998.58	7106.48
8	Hipotesis 2	Combination	-936.65	-947.87	6249.04
8	Hipotesis 3	Combination	-617.94	-1216.49	5573.91
8	Hipotesis 4	Combination	-668.26	-1195.86	5816.38
8	Hipotesis 5	Combination	-1065.00	-738.29	5869.23
8	Hipotesis 6	Combination	-1770.27	-3336.67	13849.15

Nota: Reacciones máximas en las patas de la torre calculadas con SAP2000.

Con los valores de la tabla anterior, aplicamos la siguiente relación definida líneas arriba

$$A_a = \frac{P}{F_y} + \frac{V}{0.75F_y}$$

Donde; P=F3; V=resultante de F1 y F2.

Tabla 18.

Cálculo de área de perfil angular del STUB, para las diferentes hipótesis de diseño.

OutputCase	F1	F2	F3	P	V	Aa
Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf	cm2
Hipotesis 1	-721.24	-204.79	-1,460.32	1,641.54	749.75	1.04
Hipotesis 2	-41.33	-83.42	-176.76	199.78	93.10	0.13
Hipotesis 3	-137.32	142.81	467.64	507.88	198.12	0.31
Hipotesis 4	-166.52	149.23	285.19	362.40	223.60	0.26
Hipotesis 5	254.99	-336.09	263.63	497.47	421.87	0.42
Hipotesis 6	-1,383.59	-2,029.49	-8,309.61	8,665.03	2,456.25	4.72
Hipotesis 1	-810.02	166.94	-1,535.79	1,744.32	827.04	1.13
Hipotesis 2	631.94	-752.37	4,603.18	4,706.88	982.55	2.38
Hipotesis 3	755.57	-513.30	3,750.06	3,859.70	913.43	2.01
Hipotesis 4	783.58	-529.72	4,071.49	4,179.91	945.83	2.15
Hipotesis 5	317.28	-918.41	3,793.63	3,916.09	971.67	2.06
Hipotesis 6	2,231.97	-2,784.96	14,083.59	14,528.77	3,568.99	7.62
Hipotesis 1	-1,670.49	1,036.43	7,170.80	7,435.39	1,965.89	3.97
Hipotesis 2	-286.96	169.66	1,411.70	1,450.53	333.36	0.75
Hipotesis 3	-638.31	12.98	2,383.56	2,467.58	638.44	1.31
Hipotesis 4	-586.80	2.35	2,002.11	2,086.33	586.80	1.13
Hipotesis 5	-145.26	418.78	2,248.68	2,291.95	443.26	1.14
Hipotesis 6	921.89	-2,355.02	-8,584.96	8,949.72	2,529.03	4.87
Hipotesis 1	-1,572.87	-998.58	7,077.46	7,318.57	1,863.08	3.87
Hipotesis 2	-936.65	-947.87	6,220.03	6,361.17	1,332.58	3.22
Hipotesis 3	-617.94	-1,216.49	5,544.89	5,710.30	1,364.44	2.98
Hipotesis 4	-668.26	-1,195.86	5,787.36	5,947.28	1,369.91	3.07
Hipotesis 5	-1,065.00	-738.29	5,840.21	5,982.25	1,295.88	3.05
Hipotesis 6	-1,770.27	-3,336.67	13,820.13	14,327.01	3,777.20	7.65

Nota: Estimación del área del STUB, para las diferentes cargas dadas según la hipótesis de diseño.

Del cuadro anterior se define como el área máxima del STUB, $A_a = 7.65\text{cm}^2$.

Seleccionamos perfil de $4 \times 4 \times 5/8"$, cuya sección es de 29.74cm^2 , al que se le descontara el área de agujeros para 10 pernos de $3/4" \varnothing$, para ensamble de las patas, llegando a tener un área efectiva, $A_e = 8.99\text{cm}^2$, por lo que el perfil $4 \times 4 \times 5/8"$, es el adecuado y cumple las condiciones de carga.

3.1.8.2. Cálculo de capacidad de conectores de corte (Cleat).

La resistencia a la compresión del concreto, del pedestal, donde será embebido, es; $f_c = 210\text{kg/cm}^2$ y usando cleat, de con perfil de $1.5 \times 1.5 \times 1/4"$, se tiene:

$$r = 0.07\text{cm}, w = 5\text{cm}, t = 0.5\text{cm} \text{ y } b = 10\text{cm}$$

donde;

$$x = t \left[\frac{F_y}{1.19 f'_c} \right]^{1/2} \leq w - r - t$$

$$x = 1.59\text{cm} \leq 4.43\text{cm}$$

luego;

$$P_{cleat} = 1.19 f'_c b (t + r + x / 2) = 3412.28\text{kg}$$

3.1.8.2.1. Cálculo de número de conectores.

Utilizando la siguiente relación.

$$N_{cleat} = \frac{P_{\max(\text{traccion}, \text{compresion})}}{2P_{cleat}}$$

$$P_{max}=15192.54\text{kg}$$

$N_{cleat}=2.23 \approx 3u$ de cleat por lado de perfil.

3.1.8.3. Longitud de STUB embebida en el concreto.

Usando la ecuación dada en ACSE/SEI 10-15 (2020, p.23), para pernos de anclaje embebidos en concreto, se tiene:

$$L_d = 12 * d_e * \sqrt{F_u / 58}$$

Donde:

d_e : diámetro equivalente (cm)

F_u : esfuerzo mínimo de tensión del acero (ksi)= (58.06ksi, Perfil de acero A36)

Para el perfil de STUB, seleccionado 4x4x5/8", se tiene una sección de 29.75cm², donde;

$$d_e = \sqrt{\frac{4 * 29.75}{\pi}} = 6.15\text{cm}$$

Donde:

$$L_d = 73.86\text{cm} \approx 74\text{cm}$$

Teniendo en cuenta el la posición del STUB dentro del concreto y la separación de cleats se tiene:

$$L_d = N_{cleat} * W + 2W * N_{cleat} + 30 = 3 * 5 + 2 * 5 * 3 + 10 = 55\text{cm}$$

Se tomará,

Ld=75cm (embutido en concreto a nivel del suelo)

3.1.8.4. profundidad mínima de desplante de cimentación.

Tomando un espesor de losa de, $e_L=40\text{cm}$ y para un ángulo de patas de torre, $\beta=79^\circ$, se tiene una profundidad mínima de desplante de cimentación de;

$$Df_{\min} = L_d * \text{sen}\beta + e_L = 75 * \text{sen}(79^\circ) + 40 / 2$$

$$Df_{\min} = 93.62\text{cm} \approx 95\text{cm}$$

3.2. Cimentaciones superficiales para torres de transmisión de energía eléctrica en alta tensión.

Se diseñará, cuatro tipos de cimentaciones superficiales, como son, zapatas aisladas cuadradas, zapatas conectadas, una losa de cimentación y zapatas tipo circulares o patas de elefante.

3.2.1. Materiales.

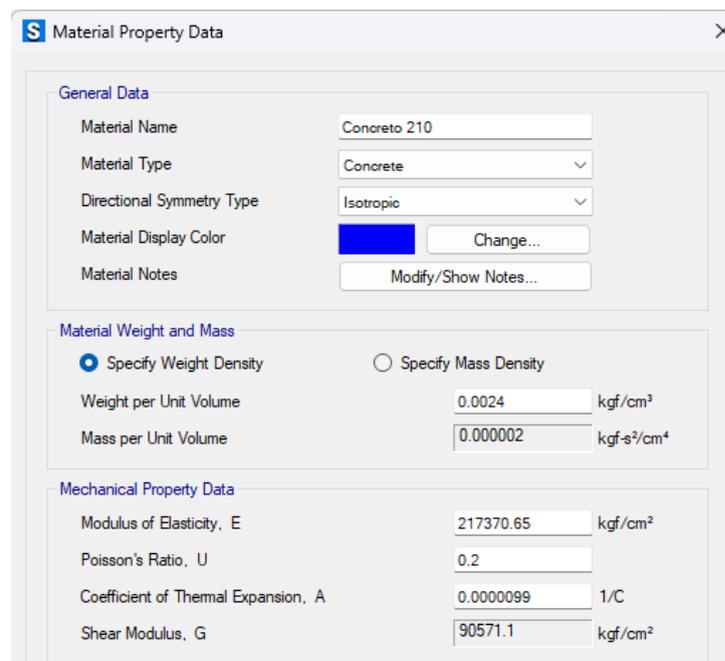
Concreto: $f'c=210\text{kg/cm}^2$

Acero corrugado: $f_y=4200\text{kg/cm}^2$

Se utiliza para el cálculo el software SAFE 21, a continuación, se muestran los datos de materiales ingresados.

Figura 82.

Propiedades del concreto, $f'c=210\text{kg/cm}^2$, utilizado en las cimentaciones, para torres autosportadas.

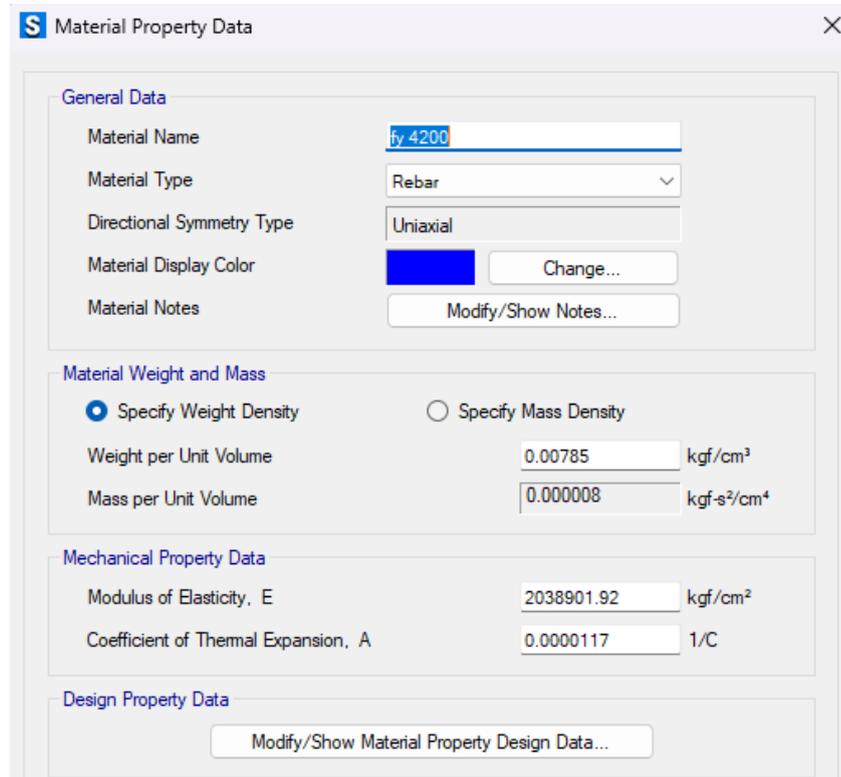


General Data	
Material Name	Concreto 210
Material Type	Concrete
Directional Symmetry Type	Isotropic
Material Display Color	 Change...
Material Notes	Modify/Show Notes...
Material Weight and Mass	
<input checked="" type="radio"/> Specify Weight Density	<input type="radio"/> Specify Mass Density
Weight per Unit Volume	0.0024 kgf/cm ³
Mass per Unit Volume	0.000002 kgf-s ² /cm ⁴
Mechanical Property Data	
Modulus of Elasticity, E	217370.65 kgf/cm ²
Poisson's Ratio, U	0.2
Coefficient of Thermal Expansion, A	0.0000099 1/C
Shear Modulus, G	90571.1 kgf/cm ²

Nota: características del concreto ingresado al SAFE 21.

Figura 83.

Propiedades del acero corrugado grado 60, $f_y=4200\text{kg/cm}^2$, utilizado en las cimentaciones, para torres autoportadas.



Nota: características del acero de refuerzo ingresado al SAFE 21.

3.2.2. Cargas de diseño.

Se utilizaron los resultados de las reacciones en los apoyos de las patas para las diferentes hipótesis consideradas, sin factores de sobrecarga pues las cargas ingresadas para el cálculo de las torres contenían los factores de sobrecarga para estructuras Grado B.

3.2.3. Capacidad portante del suelo.

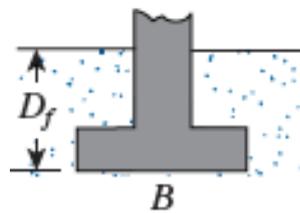
Se utilizarán los datos tomados del estudio de suelos del expediente, “RENOVACIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN, EN EL NIVEL DE TENSIÓN, EN 138 KV Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA,

DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS”, donde, según los datos del estudio de suelos se tiene:

$$\phi' = 19.27^\circ, c' = 0.11 \text{ g/cm}^2, \gamma = 1.40 \text{ g/cm}^3 \text{ y para } D_f = 2.20 \text{ m y } B = 2.60 \text{ m.}$$

Figura 84.

Detalle grafico de zapata para cálculo de capacidad portante.



Nota: Tomado de Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones (p.137), Braja (2012), Cengage Learning, México.

Donde la capacidad última del terreno

$$q_u = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

De tabla N° 06, con el ángulo de fricción e interpolando se obtiene, $N_c = 13.93$, $N_q = 5.8$ $N_\gamma = 4.68$, $D_f = 2.2 \text{ m}$ y $B = 2.60 \text{ m}$.

$$q = \gamma * D_f = 0.308 \text{ kg/cm}^2$$

Factor de forma:

$$F_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_c} = 1.416$$

$$F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi' = 1.35$$

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L} = 0.60$$

Factor de profundidad:

$$D_f / B = 0.917 \leq 1$$

$$\phi' = 19.27^\circ > 0$$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'} = 1.32$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \left(\frac{D_f}{B} \right) = 1.266$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

Factor de Inclinación:

Para, $\beta = 30^\circ$,

$$\beta = 7.042^\circ$$

$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta}{90} \right)^2 = 0.444$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi'} \right)^2 = 0.471$$

$$q_u = 4.62 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$FS = 3$$

Siendo el esfuerzo admisible del terreno:

$$q_a = 0.94 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

donde el coeficiente de balastro relacionado a esta capacidad portante sería:

$$K = 2.10 \text{ kg} / \text{cm}^3$$

Figura 85.

Coefficiente de balastro ingresado a SAFE, para modelado de cimentación.

S Area Spring Property Data

General Data

Property Name:

Display Color:

Property Notes:

Property

Subgrade Modulus (Compression Only): kgf/cm/cm²

Nonlinear Option (Nonlinear Cases Only)

None (Linear)

Tension Only

Compression Only

Elasto-Plastic

Nota: Características del suelo ingresado al SAFE 21.

3.2.4. Diseño de cimentaciones tipo zapata aislada.

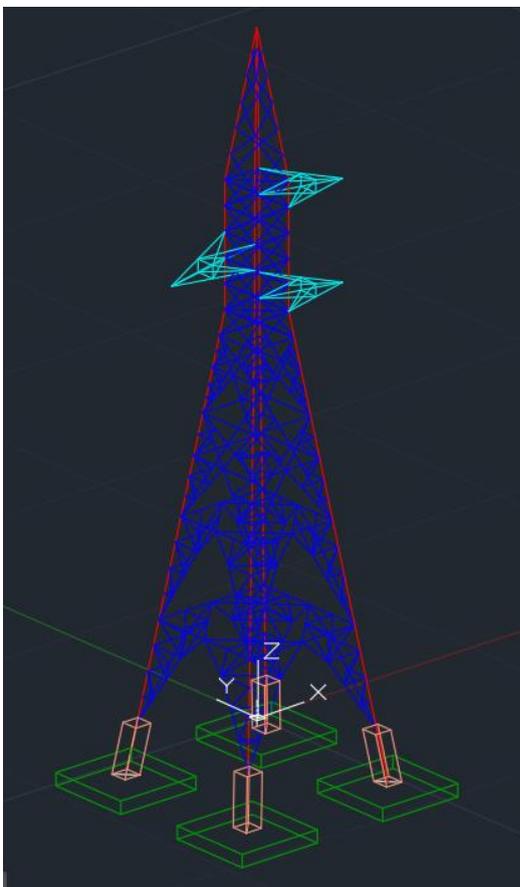
3.2.4.1. Modelo.

Con los datos de la torre realizada en AutoCAD 3D, se crea un modelo en el software SAFE 21, al cual se le ingresara las cargas calculadas con SAP2000, y con el que se evaluara dicha cimentación.

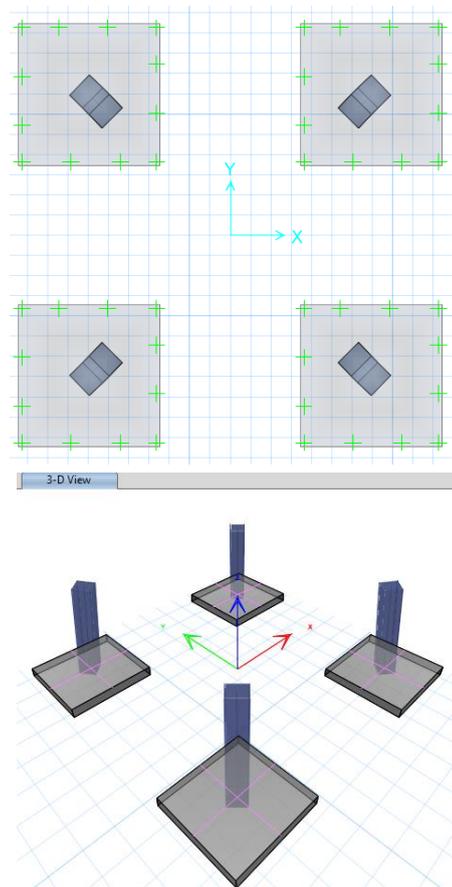
Figura 86.

Modelo de cimentación tipo zapata aislada.

a) *Modelo en CAD 3D*



b) *Modelado en SAFE 21*

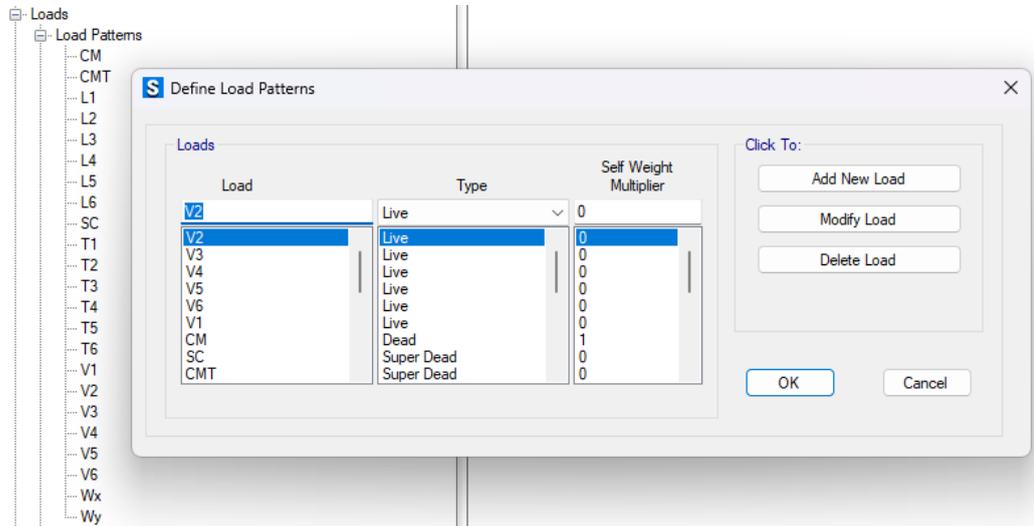


Nota: Modelo de zapata aislada cuadrada ingresado a SAFE 21.

Se crearon los patrones de carga, y las combinaciones de carga, similares, para el cálculo de la torre de transmisión, ingresando luego, las cargas al modelo.

Figura 87.

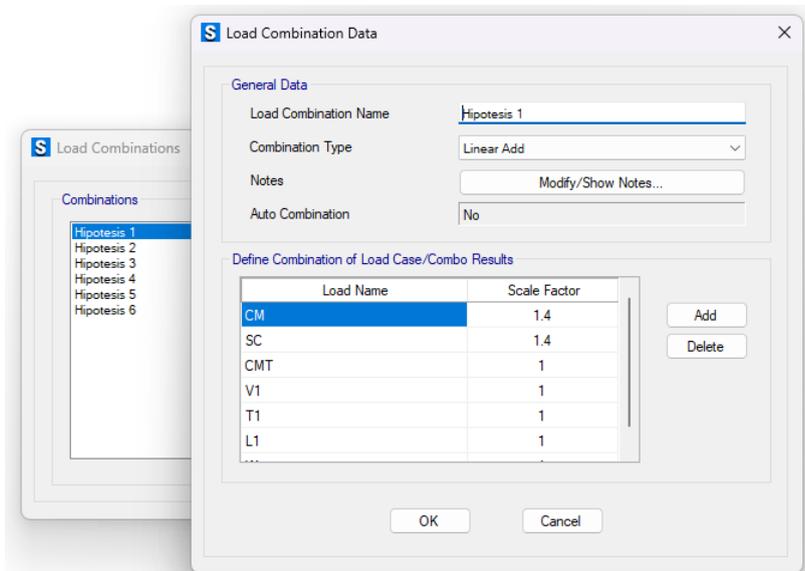
Definición de patrones de carga para modelo en SAFE 21.



Nota: Patrones de carga ingresado a SAFE 21.

Figura 88.

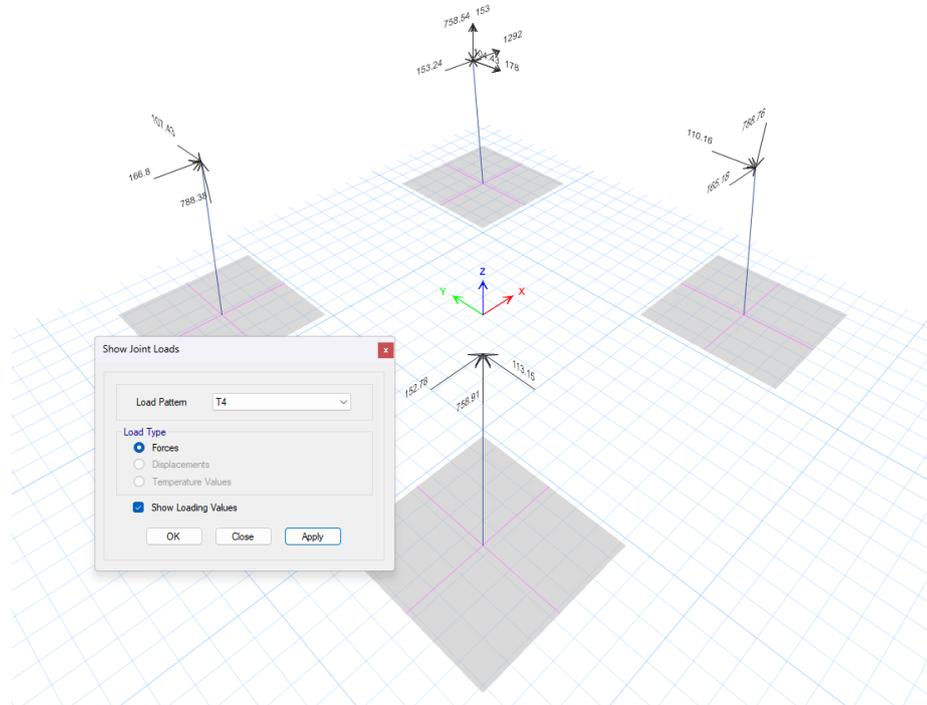
Definición de combinaciones para modelo en SAFE 21.



Nota: Hipótesis de carga ingresado a SAFE 21.

Figura 89.

Cargas aplicadas al modelo en SAFE 21, para la carga transversal T4.



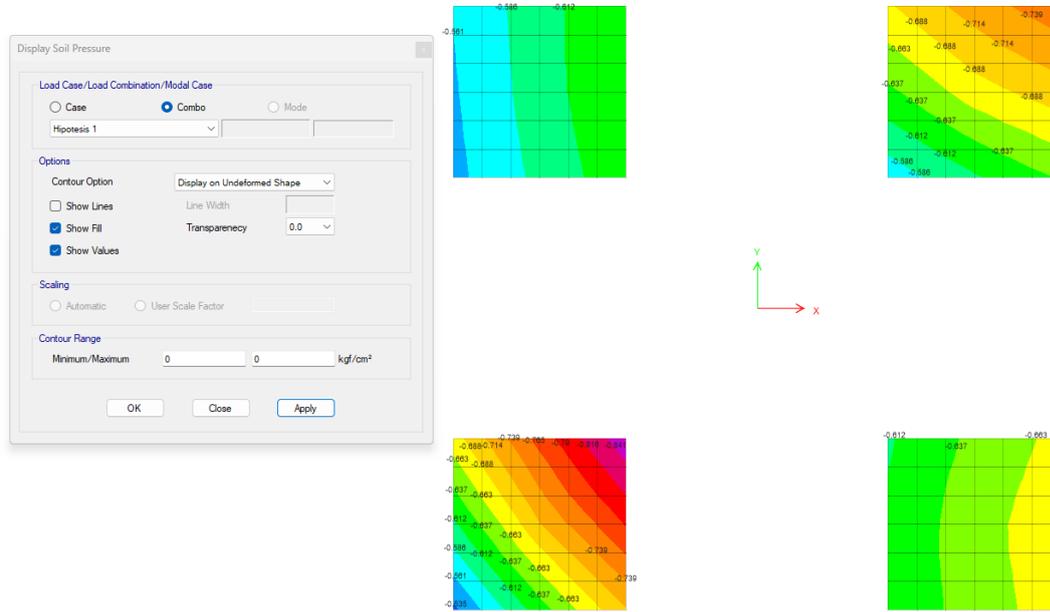
Nota: Cargas aplicadas a cimentación en SAFE 21.

3.2.4.2. Revisión por capacidad portante.

A continuación, se muestra los resultados evaluados, para la capacidad portante del suelo

Figura 90.

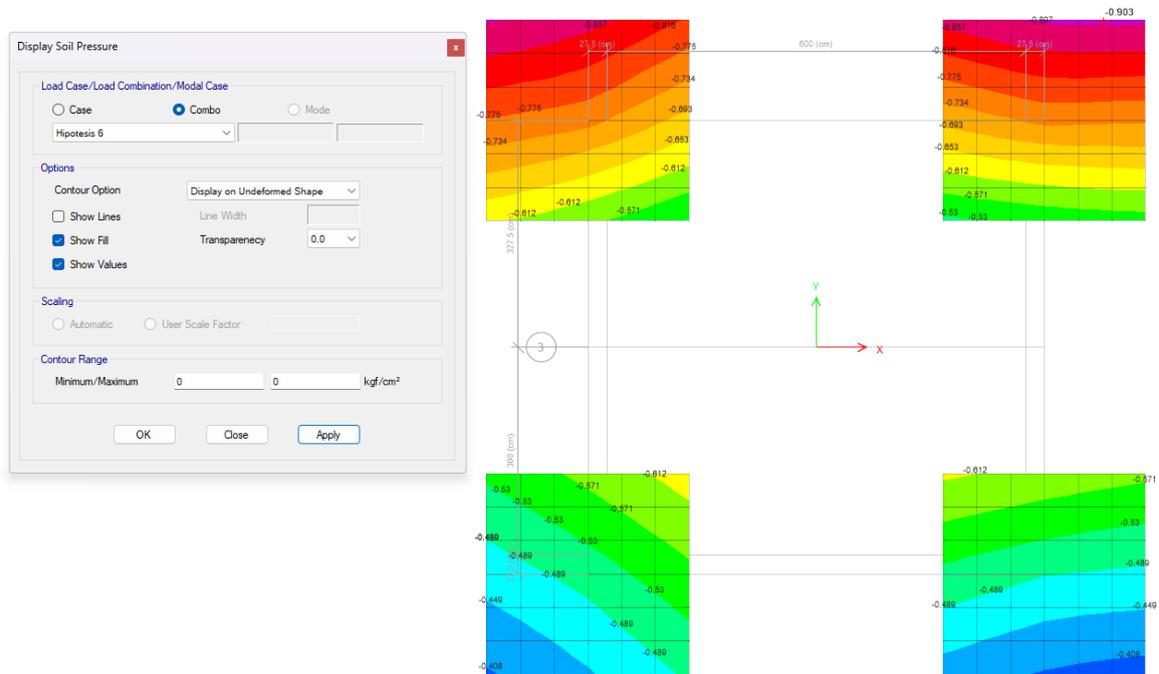
Capacidad portante del suelo, para la Hipótesis 1.



Nota: Resultados de capacidad portante, en SAFE 21.

Figura 91.

Capacidad portante del suelo, para la Hipótesis 6.



Nota: Resultados de capacidad portante, en SAFE 21.

En las seis hipótesis evaluadas la capacidad portante no supero el esfuerzo del terreno admisible, siendo el máximo valor obtenido en la hipótesis 6, en cual dio como resultado la siguiente capacidad portante;

$$q_a = 0.903 \text{ kg/cm}^2 < 0.94 \text{ kg/cm}^2$$

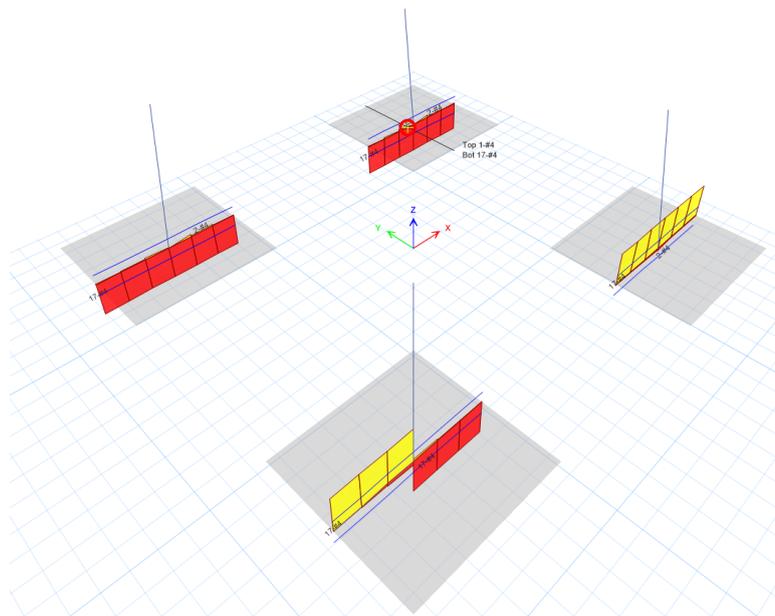
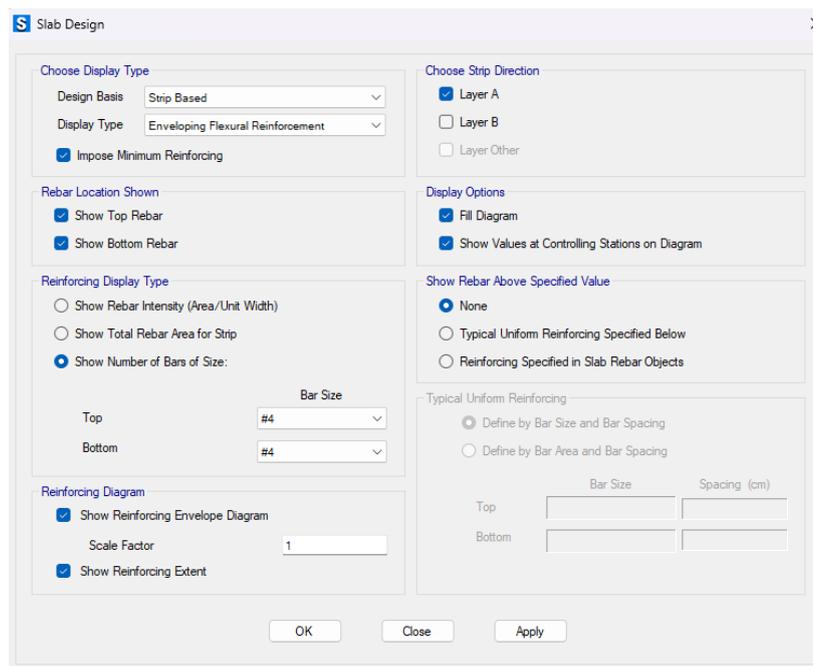
Siendo este resultado para una zapata de 2.90x2.9mx0.40m de espesor.

3.2.4.3. Diseño estructural.

A continuación, se muestra los resultados del cálculo de acero, requerido en la losa, en flexión, para lo cual, hemos usado acero corrugado, #4 \sphericalangle 1/2" \varnothing .

Figura 92.

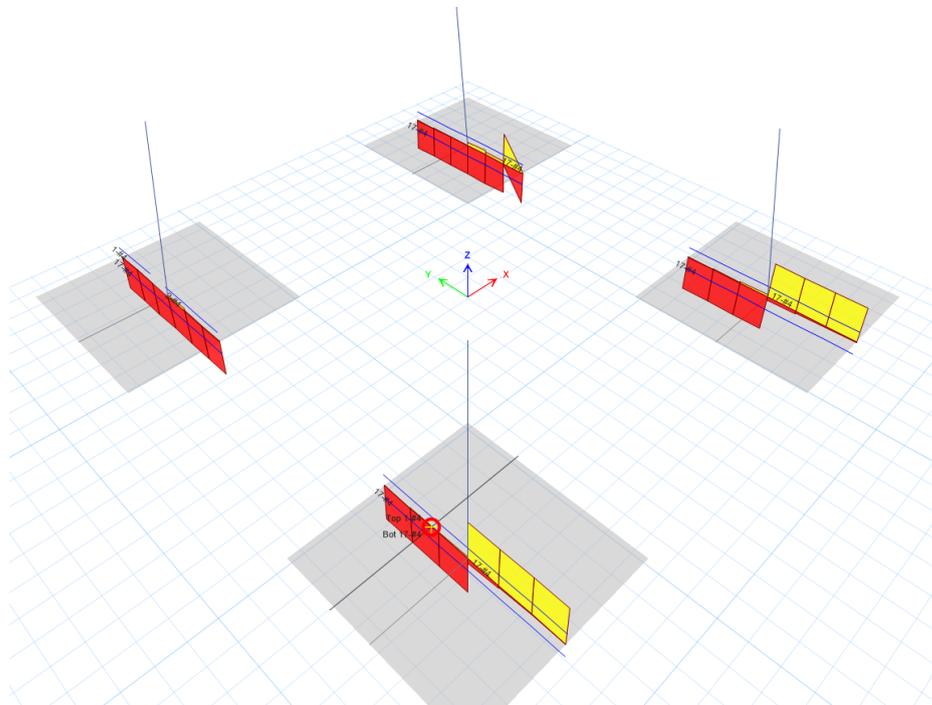
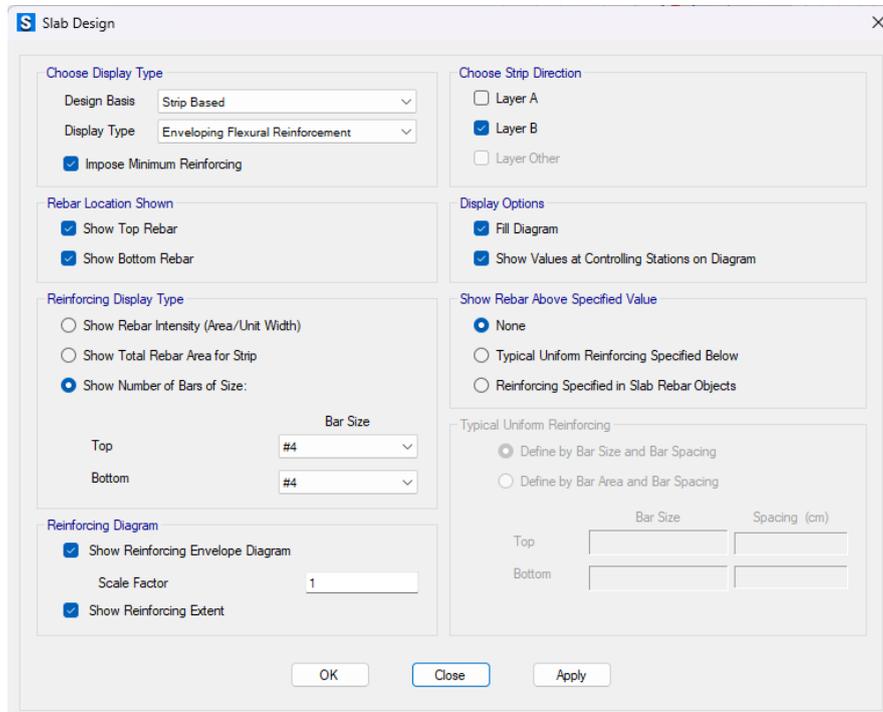
Acero de 1/2" \varnothing , requerido a lo largo del eje x, o strip A.



Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo en SAFE 21.

Figura 93.

Acero de 1/2" Ø, requerido a lo largo del eje y, o strip B.



Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo en SAFE 21.

Por lo que, según resultados del análisis, a lo largo del eje “x” y “y”, por arriba y debajo de la zapata, se requiere, 17 unidades de varillas de ½” Ø, distribuidas, en toda su longitud, quedando espaciadas a 0.17m, en una zapata de 2.90x2.90x0.40m.

3.2.4.4. Capacidad de elevación (Uplift).

Según lo establecido, en el estudio de suelos; $\phi'=19.27^\circ$, $c=0.14\text{kg/cm}^2$, $\gamma=1399.95\text{kg/m}^3$, $\gamma_c=2400\text{kg/m}^3$, y las dimensiones de la cimentación, $D=2.2\text{m}$, $B=2.6\text{m}$, $L=2.6\text{m}$, $e=0.4\text{m}$ (espesor de losa), con un pedestal de $0.50 \times 0.5 \times 2.90\text{m}$, se tiene;

$$W_s=16,404.57\text{kg}$$

$$W_f=7,869.6\text{kg}$$

De tabla, para $\phi'=19.27^\circ$:

$$M=0.05, K_{u\max} = 0.85 \text{ y } S_{f\max}=1.12$$

El factor de forma;

$$s_f = 1 + \frac{MD}{B} \leq 1 + \frac{H}{B} M$$

$$s_f = 1.04 < 1.05 < S_{f\max}$$

Por lo que se toma,

$$s_f = 1.04$$

donde;

$$K_u = 0.49\phi'^{0.18} = 2.54 > K_{u\max}$$

Por lo tanto,

$$K_u = 0.85$$

Donde la capacidad de levantamiento de esta cimentación;

$$T_u = W_s + W_f + 2cD(B + L) + \gamma D^2(2s_f B + L - B)K_u \tan \phi$$

$$T_u = 35,190.65 \text{ kg}$$

Del reporte de SAP2000, se tiene las cargas de levantamiento en cada zapata (F3), para las diversas hipótesis de cálculo, con el cual se calcula, el Factor de seguridad al levantamiento (Uplift), utilizando, la siguiente relación:

$$FSU = \frac{T_u}{F3}$$

Tabla 19.

Factores de seguridad Uplift, para cargas de levantamiento en patas de la torre, calculada con SAP2000.

TABLE: Joint Reactions			
Joint	OutputCase	F3 (z)	FSU
Text	Text	Kgf	
7	Hipotesis 1	7,170.80	4.91
8	Hipotesis 2	6,220.03	5.66
8	Hipotesis 3	5,544.89	6.35
8	Hipotesis 4	5,787.36	6.08
8	Hipotesis 5	5,840.21	6.03
6	Hipotesis 6	14,083.59	2.50

Nota: Resultados del cálculo de factor de seguridad a cargas de levantamiento (Uplift).

En la tabla anterior, se muestra que, la zapata aislada tiene un factor de seguridad al levantamiento, mayor a 2.55, lo cual muestra que el tamaño de cimentación es adecuada y segura al volteo.

3.2.4.5. Costo de construcción.

En la siguiente tabla se aprecia detallado el costo de construcción de este tipo de cimentaciones (04 Zapatas), la cual está acorde al diseño establecido con el programa SAFE 21, para resistir todas, las hipótesis de carga, establecidas, para el diseño, de la torre de transmisión.

Tabla 20.

Presupuesto de cimentación de torres tipo T o A, con zapatas aisladas.

Item	Descripción	Und	Metrado	P.U S/.	MONTO S/.
01.00	MOVIMIENTO DE TIERRAS				13,616.76
01.01	Excavación en terreno normal H=1.5m.	m3	50.46	81.19	4,097.05
01.02	Excavación en terreno entibado H>1.5m.	m3	37.00	97.43	3,605.40
01.03	Entibado para excavacion de cimentaciones.	m2	120.64	22.08	2,663.84
01.04	Nivelacion y colocacion de Stubs	Und	4.00	147.80	591.19
01.05	Relleno compactado con material propio.	m3	68.54	31.54	2,162.14
01.06	Eliminación de material excedente (d < 100 m)	m3	18.92	26.28	497.15
02.00	CONCRETO SIMPLE				1,270.97
02.01	Solado para Estructuras e=0.05 m	m2	33.64	37.78	1,270.97
03.00	CONCRETO ARMADO				19,857.87
03.01	Concreto f 'c = 210 kg/cm2	m3	16.65	681.89	11,352.63
03.02	Encofrado y Desencofrado Plano	m2	19.20	83.47	1,602.60
03.03	Acero de Refuerzo fy = 4200 kg/cm2	Kg	976.24	7.07	6,902.65
				TOTAL S/.	34,745.60

Nota: Costo de construcción de una cimentación con zapatas aisladas.

Los detalles de los precios unitarios, así como planillas de metrado se encuentran en los anexos.

3.2.5. Diseño de cimentaciones tipo zapata conectada.

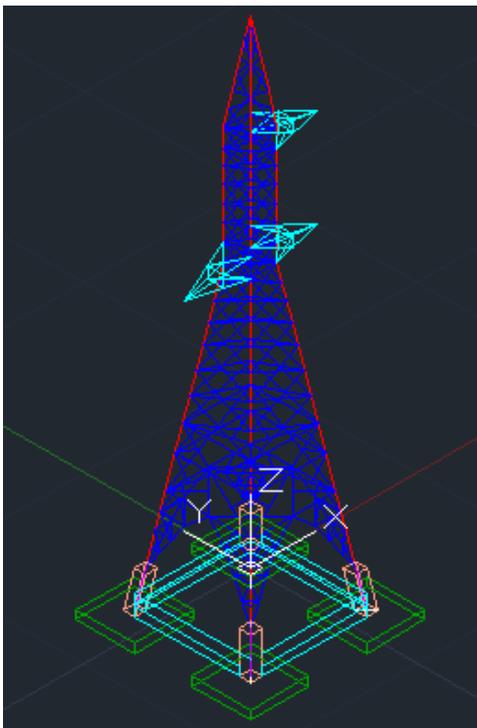
3.2.5.1. Modelo.

Con los datos de la torre realizada en AutoCAD 3D, se crea un modelo en el software SAFE 21, al cual se le ingresara las cargas calculadas con SAP2000, y con el que se evaluara dicha cimentación.

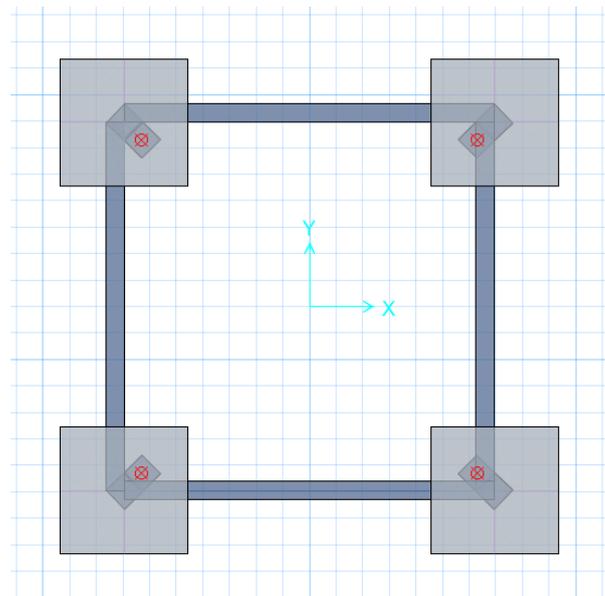
Figura 94.

Modelo de cimentación tipo zapata conectada.

a) Modelo en CAD 3D



b) Modelado en SAFE 21

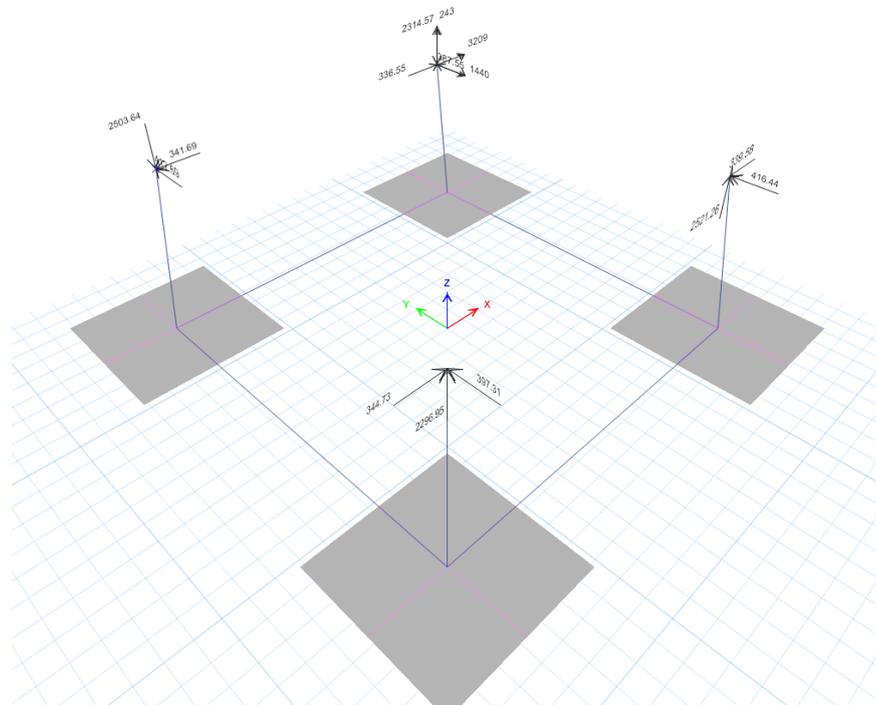


Nota: Modelo de zapata conectada ingresado a SAFE 21.

los patrones de carga, y las combinaciones de carga, son los mismos a los indicados en el cálculo de cimentaciones con zapatas aisladas como se vio líneas arriba.

Figura 95.

Cargas aplicadas al modelo en SAFE 21, para la carga vertical, V2.



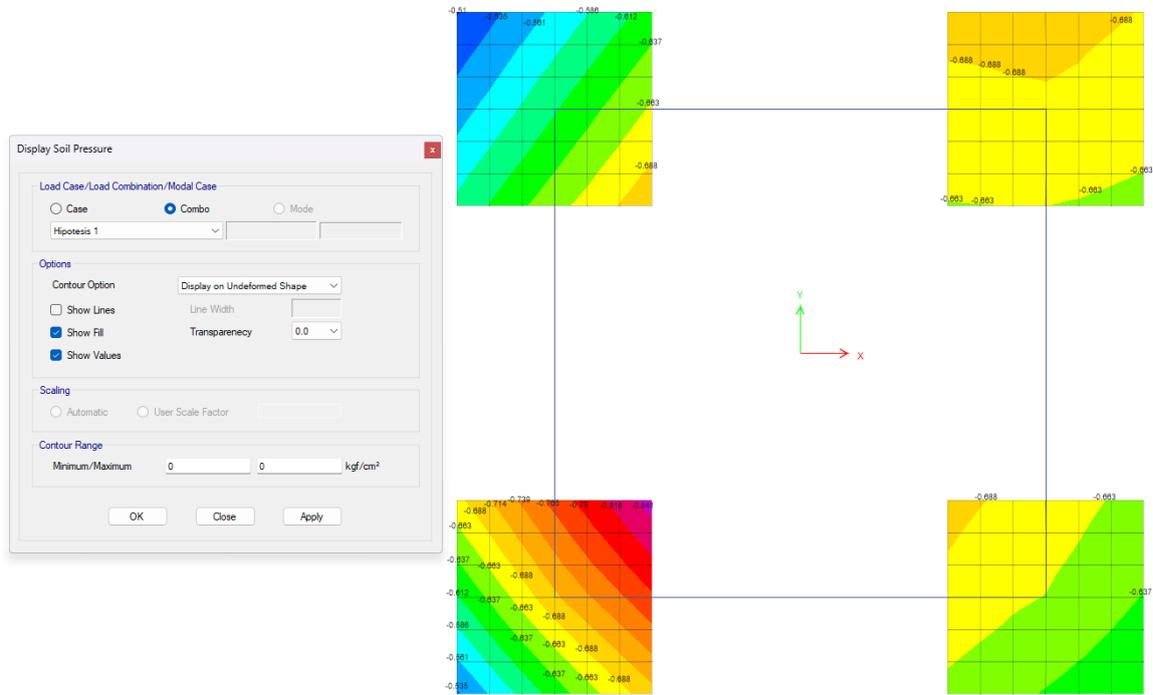
Nota: Cargas aplicadas a cimentación en SAFE 21.

3.2.5.2. Revisión por capacidad portante.

A continuación, se muestra los resultados evaluados, para la capacidad portante del suelo.

Figura 96.

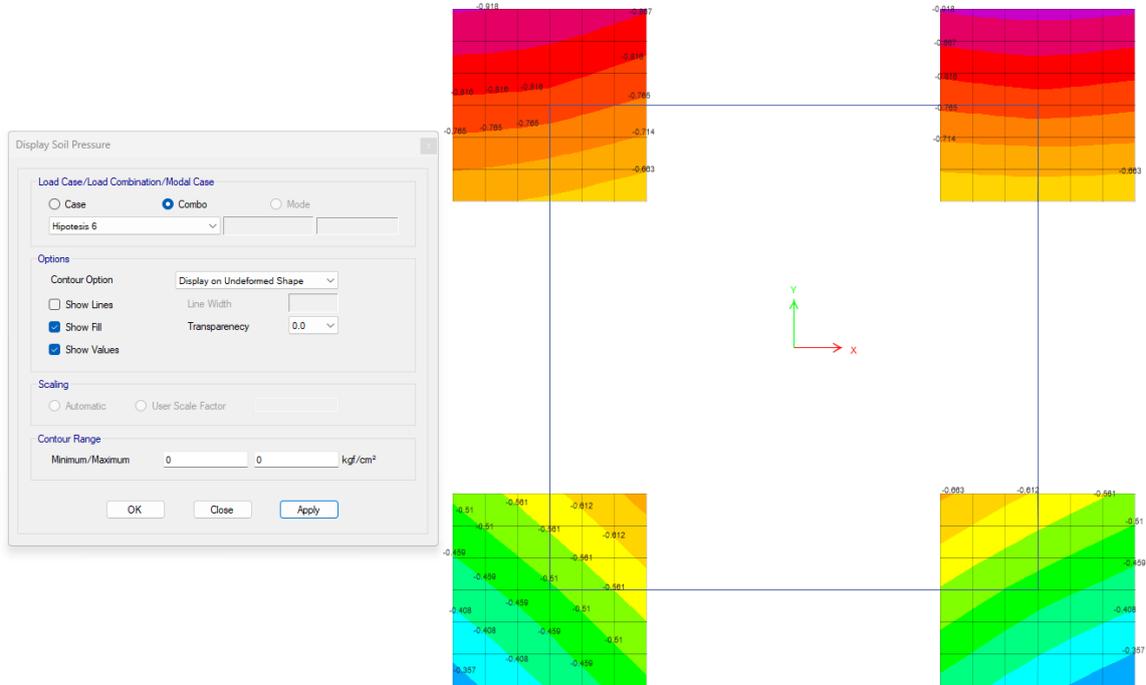
Capacidad portante del suelo, para la Hipótesis 1.



Nota: Resultados de capacidad portante en SAFE 21.

Figura 97.

Capacidad portante del suelo, para la Hipótesis 3.



Nota: Resultados de capacidad portante en SAFE 21.

En las seis hipótesis evaluadas la capacidad portante no supero el esfuerzo del terreno admisible, siendo el máximo valor obtenido en la hipótesis 6, en cual dio como resultado la siguiente capacidad portante;

$$q_a = 0.918 \text{ kg/cm}^2 < 0.94 \text{ kg/cm}^2$$

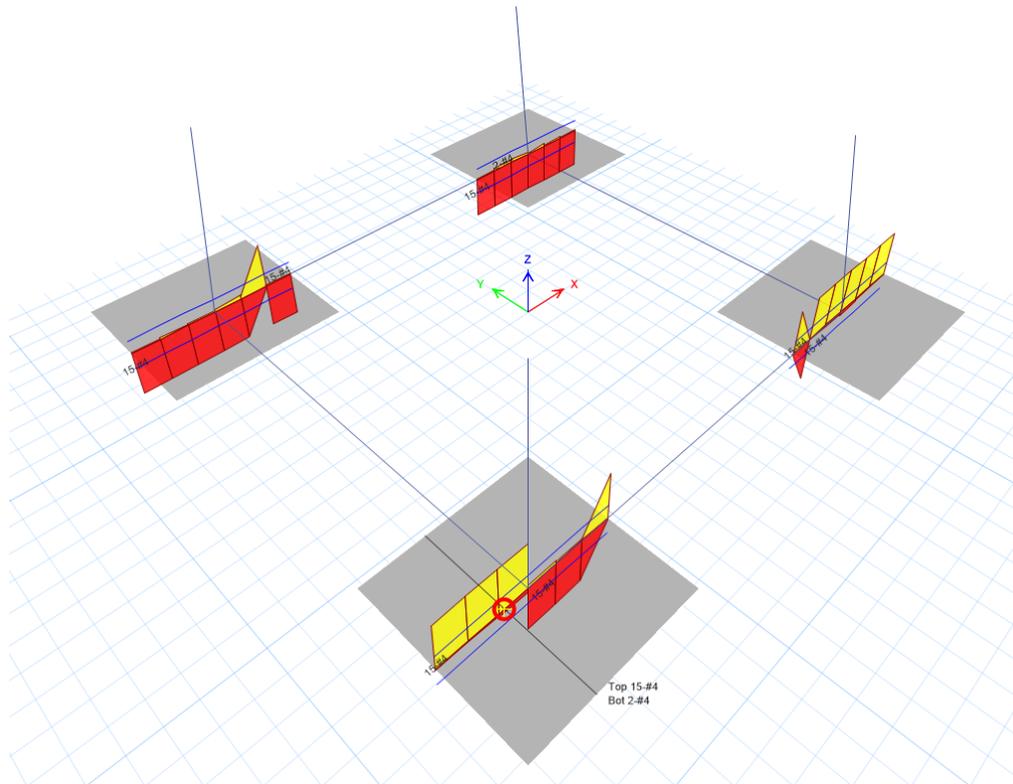
Siendo este resultado para una zapata de 2.60x2.6mx0.40m de espesor.

3.2.5.3. Diseño estructural.

A continuación, se muestra los resultados del acero requerido, en la zapata conectada, para flexión, en el cual hemos usado acero corrugado #4 \diamond $\frac{1}{2}$ " \varnothing .

Figura 98.

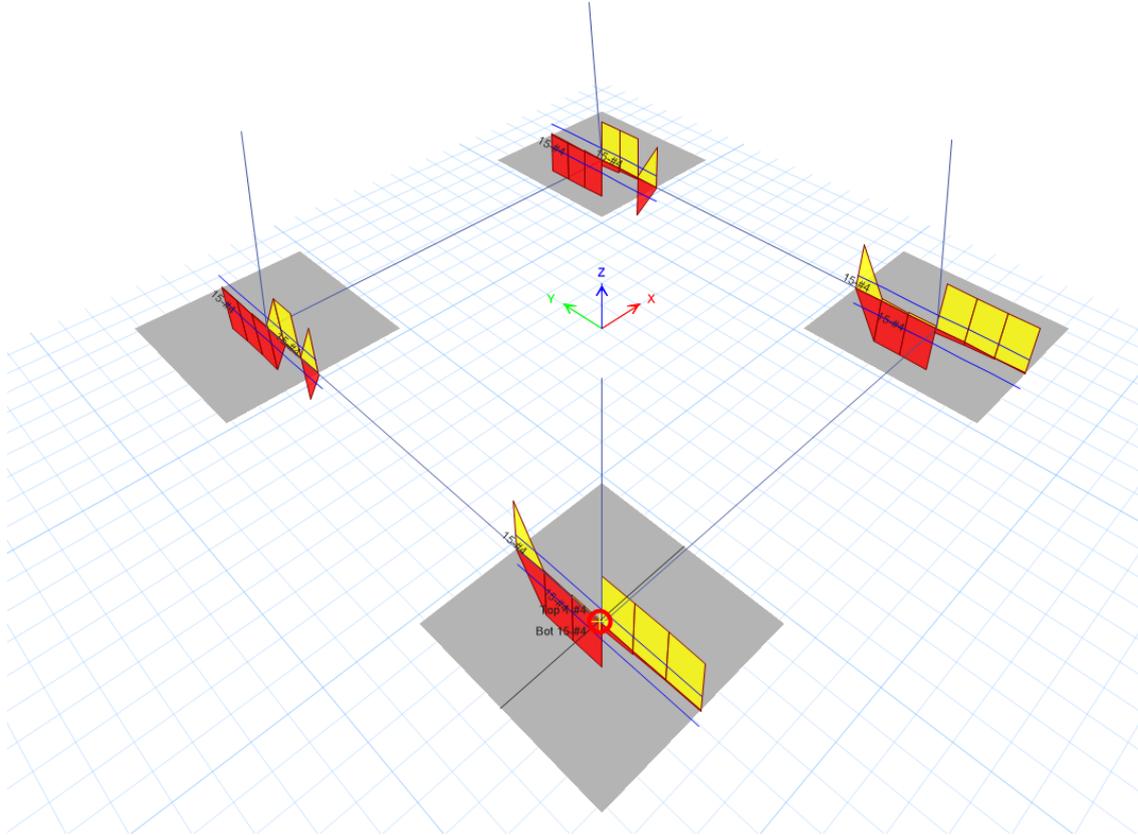
Acero de $\frac{1}{2}$ " \varnothing , requerido a lo largo del eje x, o strip A.



Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo en SAFE 21.

Figura 99.

Acero de ½" Ø, requerido a lo largo del eje y, o strip B.



Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo en SAFE 21.

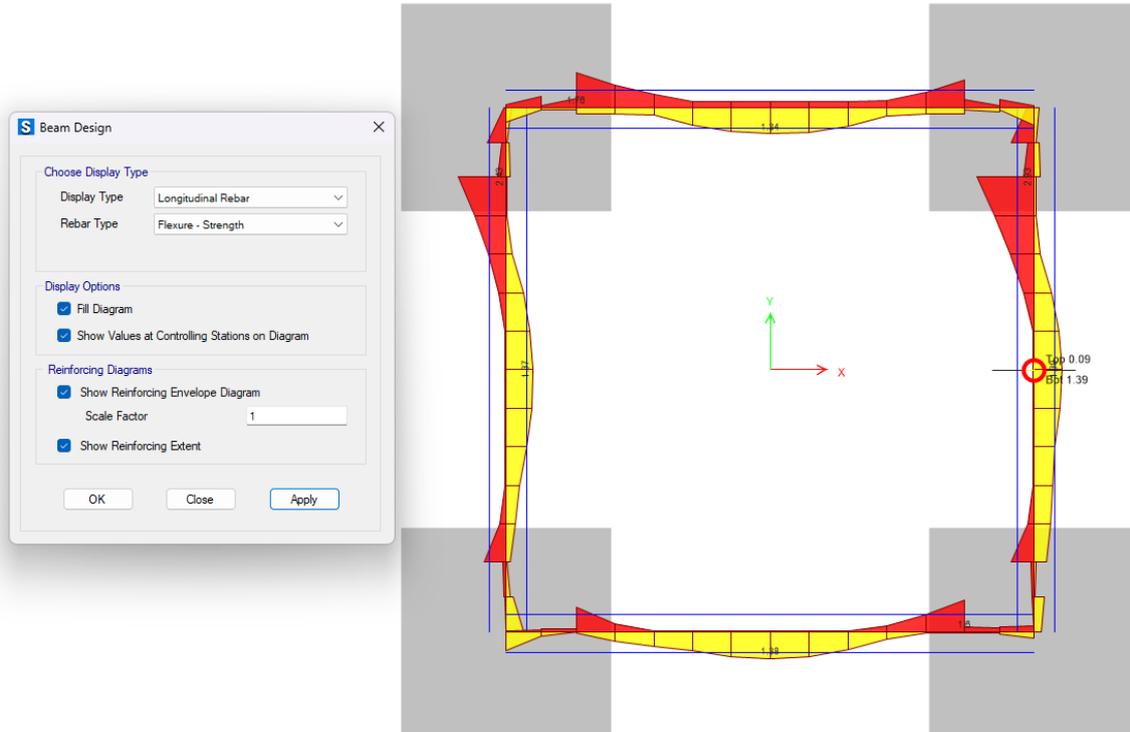
Por lo que según el análisis a lo largo del eje x, arriba y debajo de la zapata, se requiere, en la zapata más esforzada 15 unidades de varillas de ½" Ø, distribuidas, en toda su longitud, para un ancho de zapata de 2.60m, se tendría que espaciar a 0.16m.

Por lo que, según resultados del análisis, a lo largo del eje "x" y "y", por arriba y debajo de la zapata, se requiere, 15 unidades de varillas de ½" Ø, distribuidas, en toda su longitud, quedando espaciadas a 0.16m, en una zapata de 2.60x2.60x0.40m.

A continuación, se muestra el acero requerido por flexión y corte.

Figura 100.

Acero requerido por flexión.

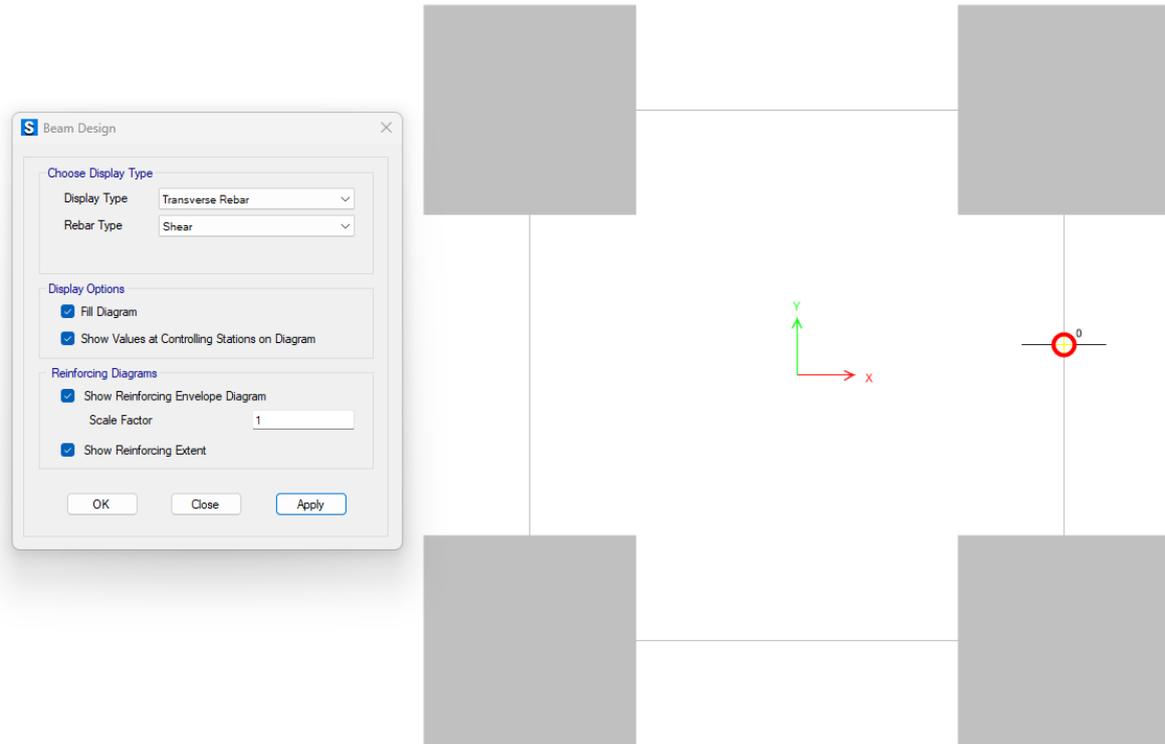


Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo en SAFE 21.

Según los resultados del análisis, a mitad de vano de la viga, en la cima de la, no se requeriría acero y la parte baja de la misma viga se requeriría un área de acero de 1.39cm², donde se usaría tres varillas de acero corrugado de ½” Ø (1.27cm²), y para la cima sería dos varillas de ½” Ø, para cumplir con el acero mínimo requerido según la cuantía mínima (ver Anexo 07).

Figura 101.

Acero requerido por corte.



Nota: Resultados de cálculo de acero para carga de corte, en SAFE 21.

Según el análisis en se requería un máximo de $0.00\text{cm}^2/\text{cm}$, por lo que se cumplirá con el acero para estribos mínimo.

3.2.5.4. Costo de construcción.

En la siguiente tabla se aprecia detallado el costo de construcción de este tipo de cimentación, la cual está acorde al diseño establecido con el programa SAFE 21, analizado para resistir todas las hipótesis de carga, establecidas para la torre de transmisión.

Tabla 21.

Presupuesto de cimentación de torres tipo T, con zapatas conectadas.

Item	Descripción	Und	Metrado	P.U S/.	MONTO S/.
01.00	MOVIMIENTO DE TIERRAS				17,068.26
01.01	Excavación en terreno normal H=1.5m.	m3	62.46	81.19	5,071.37
01.02	Excavación en terreno entibado H>1.5m.	m3	34.48	97.43	3,359.87
01.03	Entibado para excavacion de cimentaciones.	m2	177.68	22.08	3,923.33
01.04	Nivelacion y colocacion de Stubs	Und	4.00	147.80	591.19
01.05	Relleno compactado con material propio.	m3	116.07	31.54	3,661.20
01.06	Eliminación de material excedente (d < 100 m)	m3	17.56	26.28	461.29
02.00	CONCRETO				1,260.39
02.01	Solado para Estructuras e=0.05 m	m2	33.36	37.78	1,260.39
03.00	CONCRETO ARMADO				22,662.62
03.01	Concreto f 'c = 210 kg/cm2	m3	16.99	681.89	11,584.96
03.02	Encofrado y Desencofrado Plano	m2	30.26	83.47	2,525.76
03.03	Acero de Refuerzo fy = 4200 kg/cm2	Kg	1,209.49	7.07	8,551.90
				TOTAL S/.	40,991.27

Nota: Costo de construcción de una cimentación con zapatas conectadas.

Los detalles de los precios unitarios, así como planillas de metrado se encuentran en los anexos.

3.2.6. Diseño de Cimentaciones Tipo Losa.

Siguiendo el método de meyerhof, con los datos del estudio de suelos; $\phi' = 19.27^\circ$, $c' = 0.11 \text{ kg/cm}^2$, $\gamma = 1.40 \text{ kg/cm}^3$ y para $D_f = 1.4 \text{ m}$ y $B = 8 \text{ m}$, se tiene como capacidad portante admisible:

$$q_a = 0.79 \text{ kg/cm}^2$$

donde el coeficiente de balastro relacionado a esta capacidad portante sería:

$$K = 1.84 \text{ kg/cm}^3$$

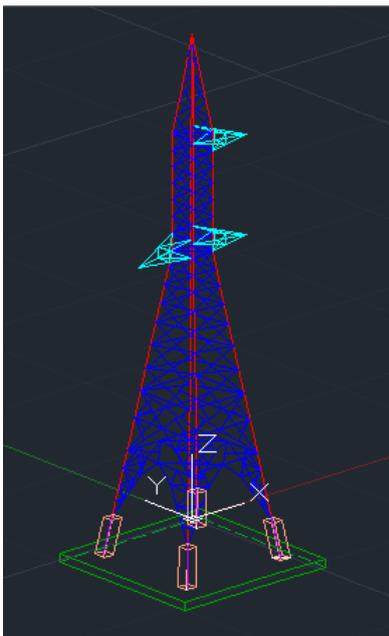
3.2.6.1. Modelo.

Con los datos de la torre realizada en AutoCAD 3D, se crea un modelo en el software SAFE 21, al cual se le ingreso las cargas calculadas con SAP2000, y con el que se evaluara dicha cimentación.

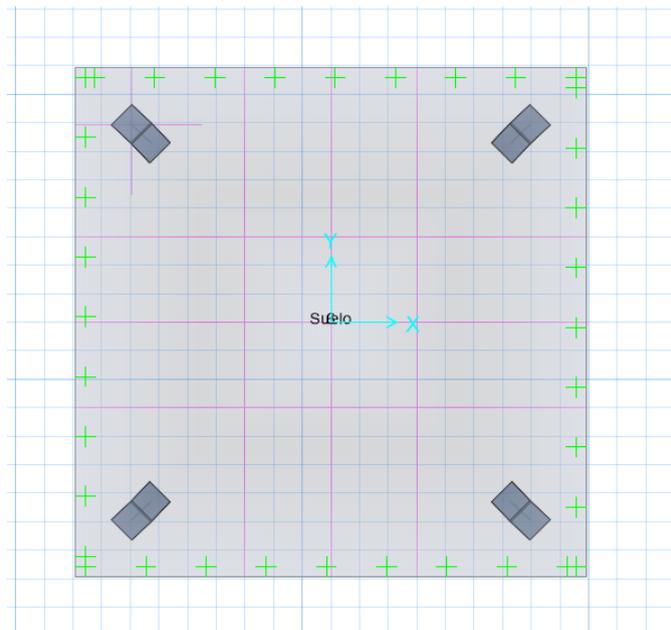
Figura 102.

Modelo de cimentación tipo zapata tipo losa.

a) Modelo en CAD 3D



b) Modelado en SAFE 21

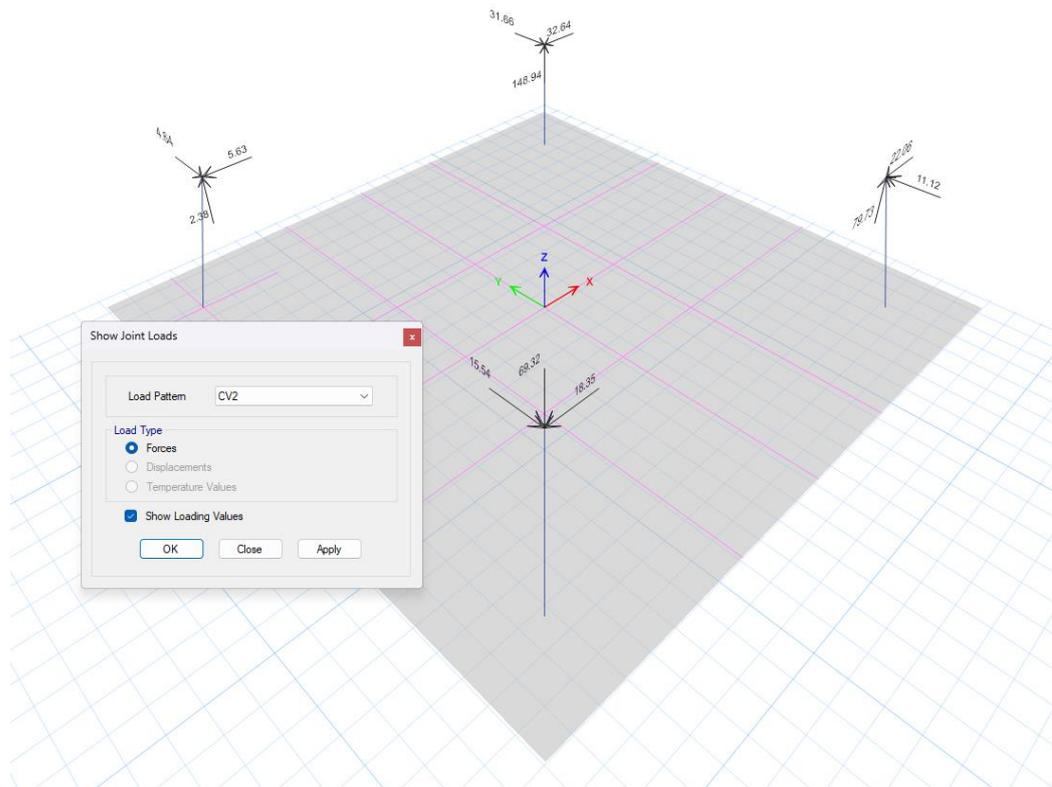


Nota: Modelo de cimentación tipo losa, ingresado a SAFE 21.

los patrones de carga, y las combinaciones de carga, son los mismos a los indicados en el cálculo de cimentaciones con zapatas aisladas.

Figura 103.

Cargas aplicadas al modelo en SAFE 21, para la carga vertical V2.



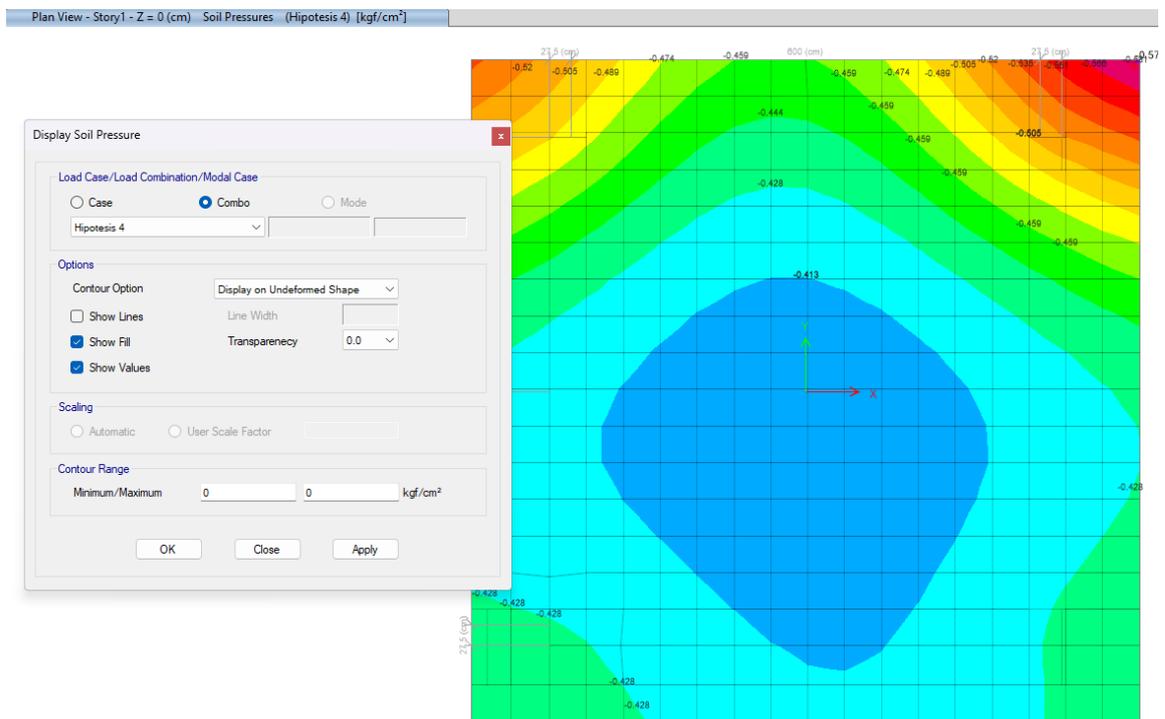
Nota: Cargas aplicadas a cimentación en SAFE 21.

3.2.6.2.Revisión por capacidad portante.

A continuación, se muestra los resultados evaluados, para la capacidad portante del suelo

Figura 104.

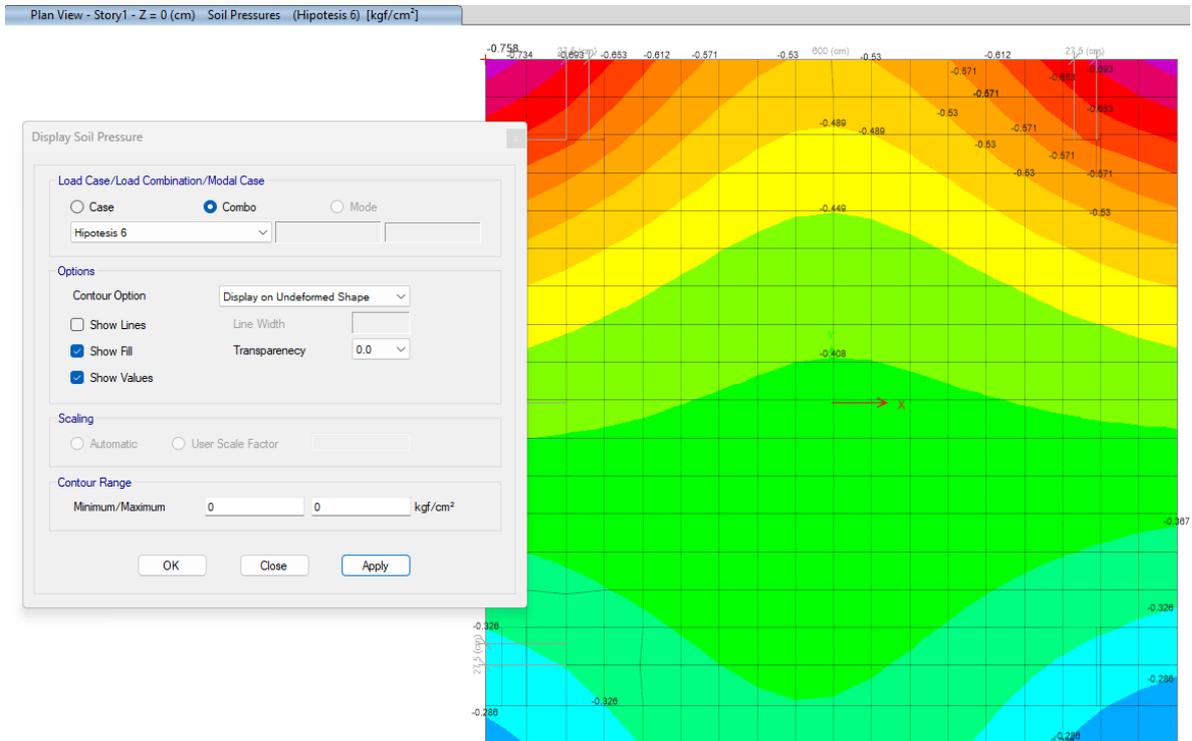
Capacidad portante del suelo, para la Hipótesis 4.



Nota: Resultados de capacidad portante en SAFE 21.

Figura 105.

Capacidad portante del suelo, para la Hipótesis 6.



Nota: Resultados de capacidad portante en SAFE 21.

En las seis hipótesis evaluadas la capacidad portante no supero el esfuerzo del terreno admisible, siendo el máximo valor obtenido en la hipótesis 6, en cual tuvo como resultado la siguiente capacidad portante;

$$q_a = 0.758 \text{ kg/cm}^2 < 0.80 \text{ kg/cm}^2$$

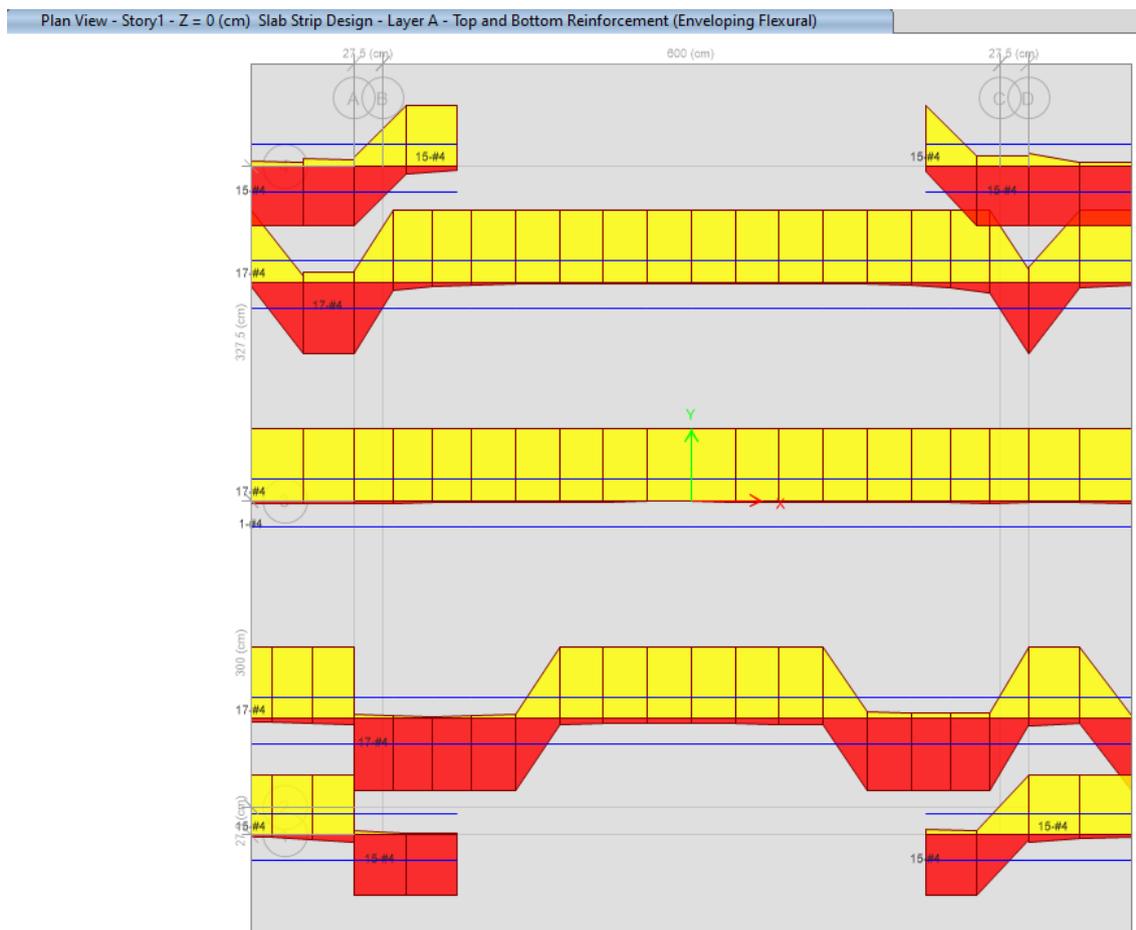
Siendo este resultado para una losa de 8.55x8.55mx0.40m de espesor.

3.2.6.3. Diseño estructural.

A continuación, se muestra los resultados de acero requerido en la losa, para flexión, en el cual hemos usado acero corrugado #4 \sphericalangle 1/2" \varnothing .

Figura 106.

Acero de 1/2" \varnothing , requerido a lo largo del eje x, o strip A.

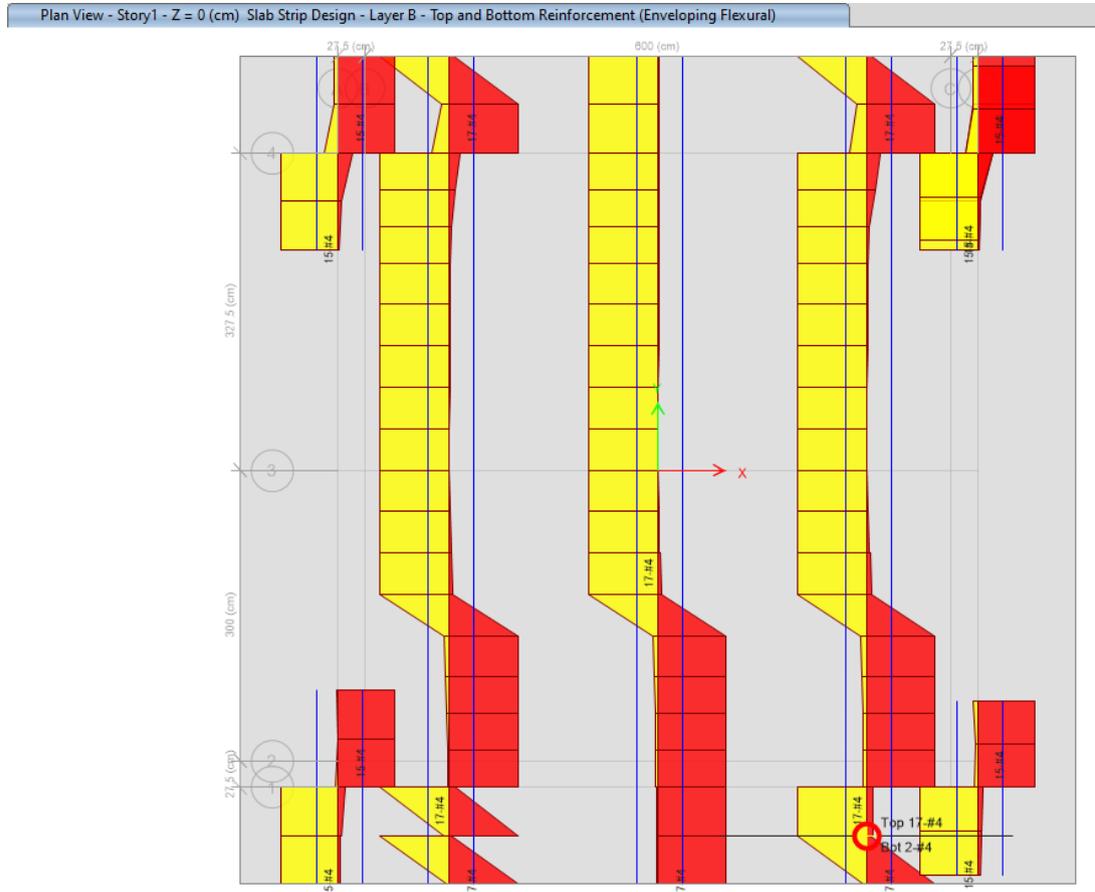


Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo en SAFE 21.

Según los resultados en el primer strip (a 1m a lado de cada pedestal), en la cima, y la parte baja, se requiere, de 17 barras de acero N° 4, las cuales quedarían espaciadas a 0.10m. Así mismo, en tramo en la parte interior, de la losa, se requiere lo misma cantidad de barras de acero, distribuidas en 4.55m, espaciándose a 0.25m.

Figura 107.

Acero de ½" Ø, requerido a lo largo del eje y, o strip B.



Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo en SAFE 21.

Según los resultados se requiere la misma distribución de acero N° 4, dado para el strip A.

A continuación, se muestra el acero requerido por punzonamiento.

Figura 108.

Acero requerido por punzonamiento.



Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo por punzonado, en SAFE 21.

Según el análisis, no se requiere acero por punzonamiento, o incrementar el espesor de la losa. Por lo cual, un espesor de 0.40cm, es diseño adecuado.

3.2.6.4. Revisión por volteo y deslizamiento.

La seguridad al volteo se determinará por la relación del momento resistente, al momento de volteo, tanto en el eje x, como en el eje y, tal como, se indica a continuación:

Factor de seguridad al volteo (FSV):

$$FSV_y = \frac{\sum M_r}{M_y}, \quad FSV_x = \frac{\sum M_r}{M_x},$$

De igual manera para el deslizamiento.

$$FSD = \frac{\mu^* \sum F_v}{VT}$$

Donde para, $\theta = 19.27^\circ$, se tiene que $\mu = 0.35$.

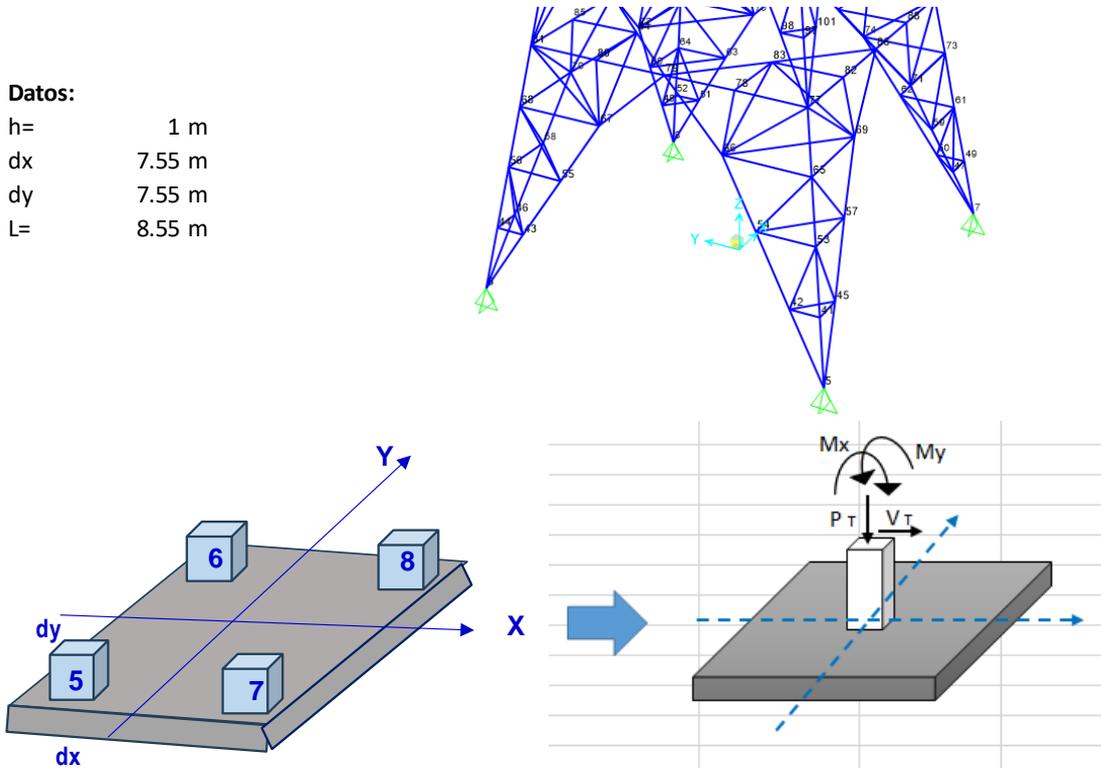
Teniendo en cuenta la siguiente figura y los datos calculados con SAP2000.

Figura 109.

Geometría de losa para cálculo de fuerzas y momentos equivalentes.

Datos:

h= 1 m
dx 7.55 m
dy 7.55 m
L= 8.55 m



Nota: Detalles para el cálculo de fuerza y momentos equivalentes para una losa de cimentación.

Se tiene las siguientes fuerzas resistentes y fuerzas actuantes.

Tabla 22.

Fuerzas y momentos resistentes.

Fuerzas	Peso (kg)	Brazo (m)	Momento (kg.m)
Peso suelo	111,033.58	3.61	400,646.16
Peso del concreto	55,273.80	3.61	199,446.30
ΣFv=	166,307.38		ΣMr= 600,092.45

Nota: Resultados de fuerza y momentos resistentes en la losa de cimentación.

Tabla 23.

Fuerzas momentos actuantes, calculadas de los reportes de SAP2000.

Combinacion	My (kg*m)	Mx (kg*m)	VT (kg*m)
Hipotesis 1	84,953.73	80,179.11	4,774.62
Hipotesis 2	89,425.03	90,406.03	1,733.69
Hipotesis 3	90,129.43	91,065.43	1,698.39
Hipotesis 4	90,129.43	91,065.43	1,698.39
Hipotesis 5	90,129.42	91,065.44	1,698.39
Hipotesis 6	72,612.94	83,119.08	10,506.14

Nota: Resultado de fuerzas y momentos actuantes en la losa de cimentación.

Donde los factores de seguridad, al deslizamiento, y al volteo, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 24.

Factores de seguridad al deslizamiento y al volteo.

Combinacion	FSVy	FSVx	FSD
Hipotesis 1	7.06	7.48	12.18
Hipotesis 2	6.71	6.64	33.54
Hipotesis 3	6.66	6.59	34.23
Hipotesis 4	6.66	6.59	34.23
Hipotesis 5	6.66	6.59	34.23
Hipotesis 6	8.26	7.22	5.53

Nota: Resultados de cálculo de factores, de seguridad, al deslizamiento, y volteo en la losa de cimentación.

El momento resistente debido al peso de suelo y concreto deberá ser mayor que los momentos de volteo y deslizamiento, con un factor de seguridad de mayor a igual a 1.5, según, la norma E.030 (2018), de diseño dismorresistente.

De este análisis, se observa que la cimentación tipo losa, tiene factores de seguridad elevados, resistiendo a grandes cargas que evitan el volteo y deslizamiento, obteniéndose FSV en la dirección x e y mínimos de 7.55 y 7.55 respectivamente y un factor FSD mínimo de 5.53.

3.2.6.5. Costo de construcción.

En la siguiente tabla se aprecia detallado el costo de construcción de este tipo de cimentaciones, la cual está acorde al diseño establecido con el programa SAFE 21, analizado, para resistir todas las hipótesis de carga, establecidas para la torre de transmisión.

Tabla 25.

Presupuesto de cimentación tipo losa, en torres tipo T.

Item	Descripción	Und	Metrado	P.U S/.	MONTO S/.
01.00	MOVIMIENTO DE TIERRAS				12,755.50
01.01	Excavación en terreno normal H=1.5m.	m3	109.65	81.19	8,903.22
01.02	Nivelacion y colocacion de Stubs	Und	4.00	147.80	591.19
01.03	Relleno compactado con material propio.	m3	72.10	31.54	2,274.39
01.04	Eliminación de material excedente (d < 100 m)	m3	37.55	26.28	986.70
02.00	CONCRETO				2,761.92
02.01	Solado para Estructuras e=0.05 m	m2	73.10	37.78	2,761.92
03.00	CONCRETO ARMADO				25,931.05
03.01	Concreto f 'c = 210 kg/cm2	m3	23.77	681.89	16,206.10
03.02	Encofrado y Desencofrado Plano	m2	10.40	83.47	868.07
03.03	Acero de Refuerzo fy = 4200 kg/cm2	Kg	1,252.63	7.07	8,856.88
TOTAL S/.					41,448.48

Nota: Costo de construcción de una cimentación tipo losa.

Los detalles de los precios unitarios, así como planillas de metrado se encuentran en los anexos.

3.2.7. Diseño de cimentaciones tipo pata de elefante.

Siguiendo el método de Meyerhof, con los datos del estudio de suelos; $\phi' = 19.27^\circ$, $c' = 0.11 \text{ g/cm}^2$, $\gamma = 1.39 \text{ g/cm}^3$ y para $D_f = 2.6 \text{ m}$ y $B = 2.8 \text{ m}$, se tiene como capacidad portante admisible:

$$q_a = 1.45 \text{ kg/cm}^2$$

donde el coeficiente de balastro relacionado a esta capacidad portante sería:

$$K = 2.1 \text{ kg/cm}^3$$

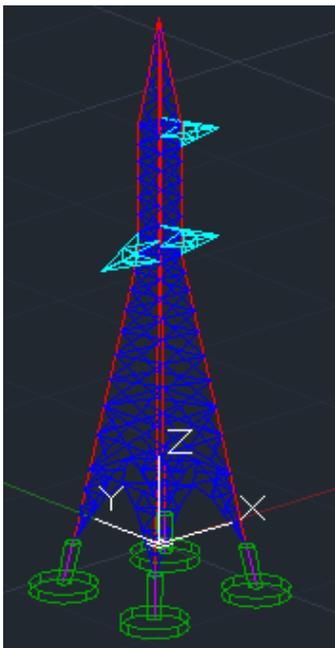
3.2.7.1. Modelo.

Con los datos de la torre realizada en AutoCAD 3D, se crea un modelo en el software SAFE 21, al cual se le ingresara las cargas calculadas con SAP2000, y con el que se evaluara dicha cimentación.

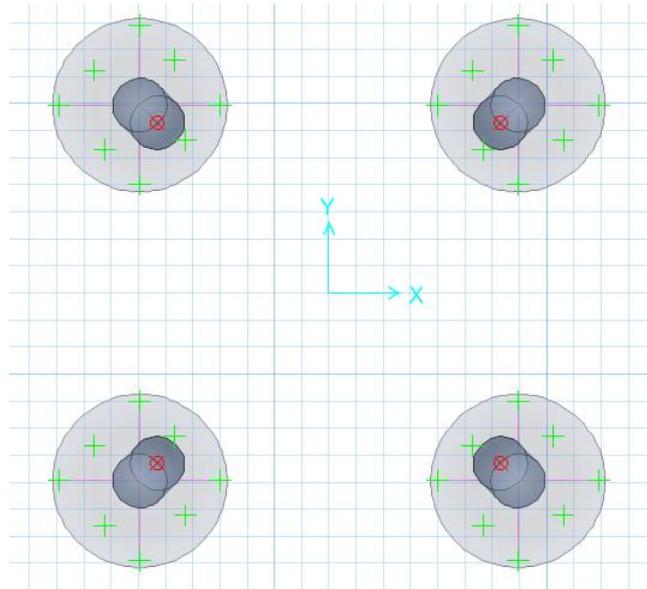
Figura 110.

Modelo de cimentación tipo zapata tipo losa.

a) *Modelo en CAD 3D*



b) *Modelado en SAFE 21*

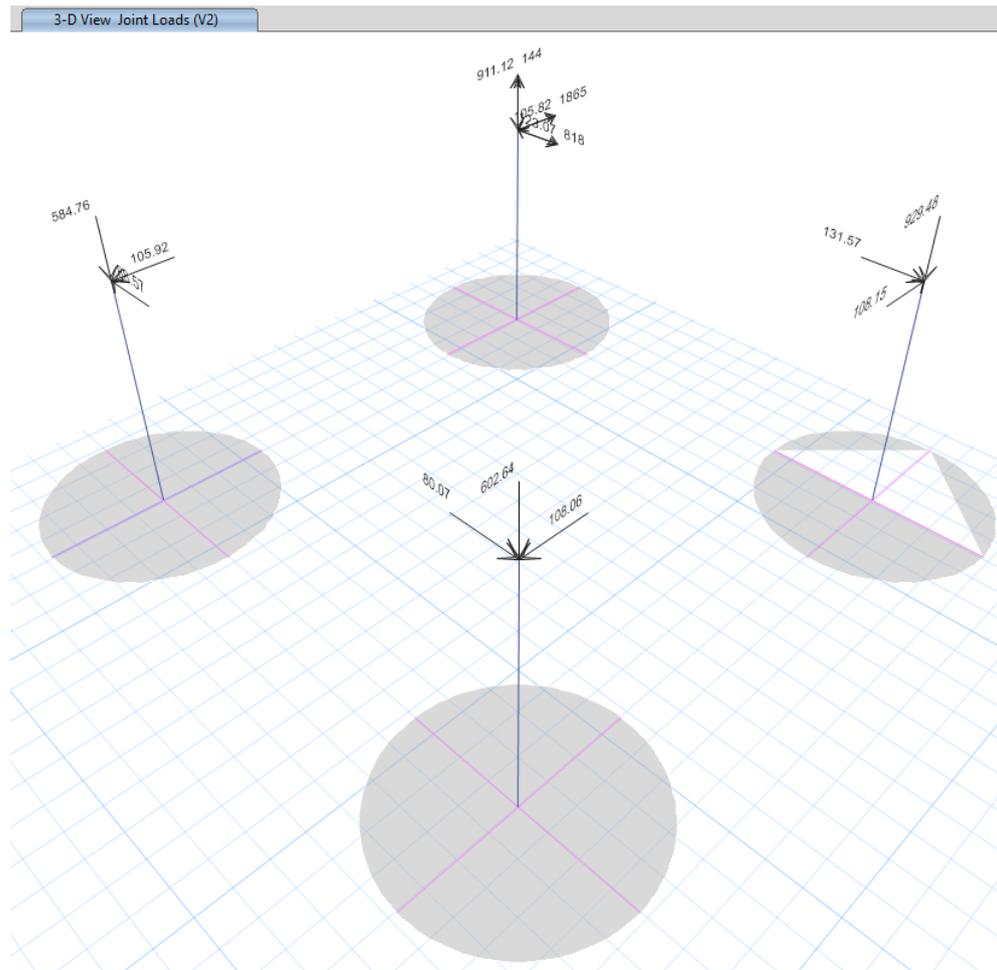


Nota: Modelo de cimentación tipo pata de elefante, ingresado a SAFE 21.

Los patrones de carga, y las combinaciones de carga, son los mismos a los indicados en el cálculo de cimentaciones con zapatas aisladas.

Figura 111.

Cargas aplicadas al modelo en SAFE 21, para la carga vertical V2.



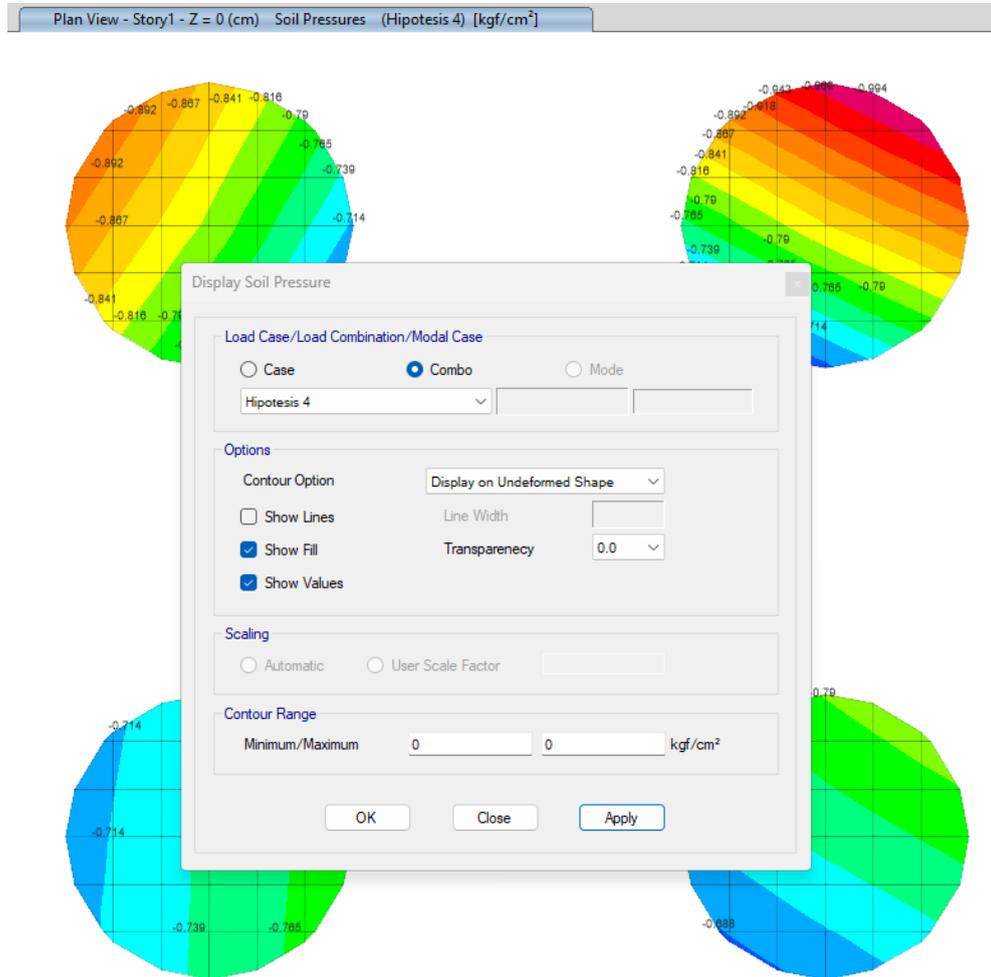
Nota: Cargas aplicadas a cimentación en SAFE 21.

3.2.7.2. Revisión por capacidad portante.

A continuación, se muestra los resultados evaluados, para la capacidad portante del suelo.

Figura 112.

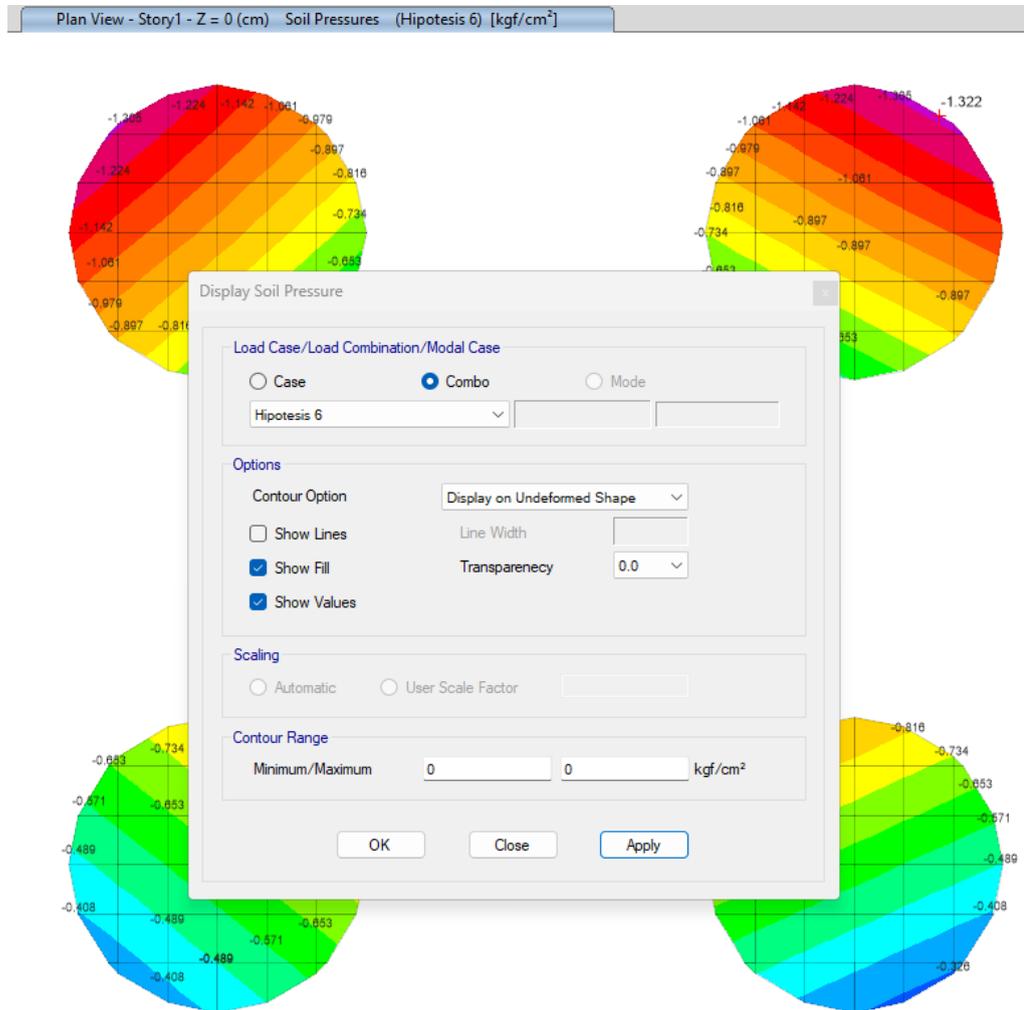
Capacidad portante del suelo, para la Hipótesis 4.



Nota: Resultados de capacidad portante, en SAFE 21.

Figura 113.

Capacidad portante del suelo, para la Hipótesis 6.



Nota: Resultados de capacidad portante, en SAFE 21.

En las seis hipótesis evaluadas la capacidad portante no supero el esfuerzo del terreno admisible, siendo el máximo valor obtenido en la hipótesis 6, en cual tuvo como resultado la siguiente capacidad portante;

$$q_a = 1.322 \text{ kg/cm}^2 < 1.45 \text{ kg/cm}^2$$

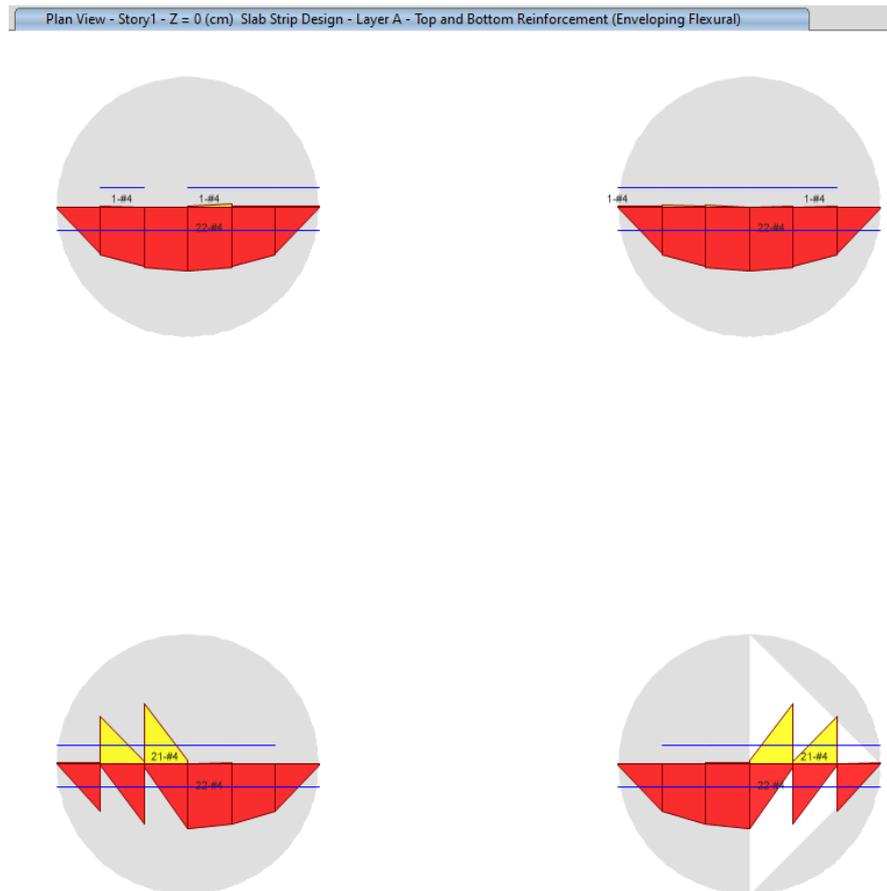
Siendo este resultado para zapata de 2.8mØx0.55m de espesor.

3.2.7.3. Diseño estructural.

A continuación, se muestra los resultados del acero requerido en la losa, para cargas a flexión, en el cual hemos usado acero corrugado #4 \times 1/2" \varnothing .

Figura 114.

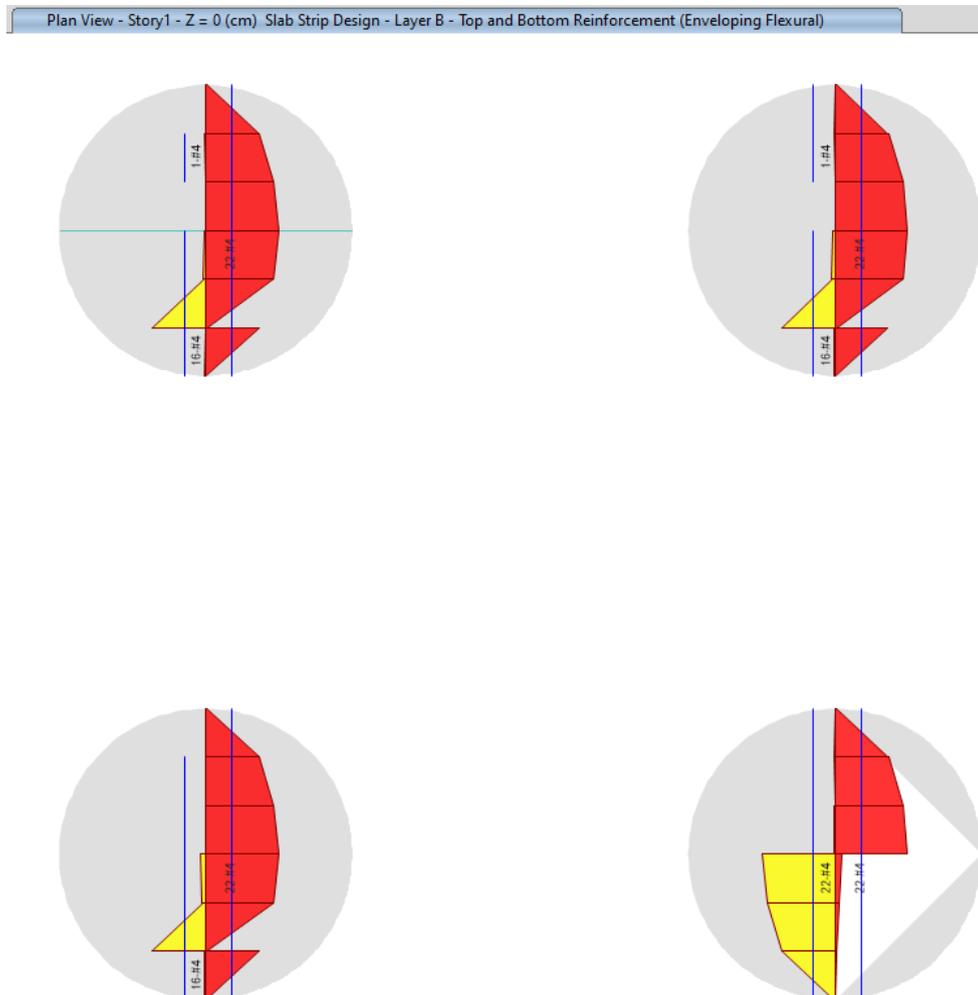
Acero de 1/2" \varnothing , requerido a lo largo del eje x, o strip A.



Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo en SAFE 21.

Figura 115.

Acero de ½" Ø, requerido a lo largo del eje y, o strip B.



Nota: Resultados de cálculo de acero de refuerzo en SAFE 21.

Por lo que según el análisis a lo largo del eje x e y, tanto arriba y debajo de la losa, se requiere, de varillas de ½" Ø, espaciadas a 0.12m, tanto en la cima como en la parte baja de la zapata.

3.2.7.4. Capacidad de elevación (Uplift).

Según lo establecido, en el estudio de suelos; $\phi'=19.27^\circ$, $c=0.14\text{kg/cm}^2$, $\gamma=1399.95\text{kg/m}^3$, $\gamma_c=2400\text{kg/m}^3$, y las dimensiones de la cimentación, $D=2.6\text{m}$, $B=2.8\text{m}$, $R=1.4\text{m}$, $e=0.5\text{m}$ (espesor de losa), con un pedestal de $0.50 \times 0.5 \times 2.90\text{m}$, se tiene;

$$W_s=6,333.21\text{kg}$$

$$W_f=10,872.42\text{kg}$$

De tabla, para $\phi'=19.27^\circ$:

$$M=0.05, S_{fmax}=1.12 \text{ y } K_{umax}=0.85$$

El factor de forma;

$$s_f = 1 + \frac{MD}{B} \leq 1 + \frac{H}{B} M$$

$$sf=1.05 \leq 1.05 \leq S_{fmax}$$

Por lo que se toma,

$$sf=1.05$$

donde;

$$K_u = 0.49\phi^{0.18} = 2.54$$

Donde la capacidad de levantamiento de esta cimentación;

$$T_u = W_s + W_f + \pi BcD + s_f (\pi / 2) B \gamma D^2 K_u \tan \phi$$

$$\mathbf{T_u=22, 924.83\text{kg}}$$

Del reporte de SAP2000, para las diversas hipótesis de cálculo, se tiene las cargas de levantamiento en cada zapata (F3), con el cual se calcula, el Factor de seguridad al levantamiento (Uplift), con establecido, en la siguiente relación:

$$FSU = \frac{T_u}{F3}$$

Tabla 26.

Factores de seguridad Uplift, para cargas de levantamiento en patas de la torre, calculada con SAP2000.

TABLE: Joint Reactions			
Joint	OutputCase	F3 (z)	FSU
Text	Text	Kgf	
7	Hipotesis 1	7,170.80	3.20
8	Hipotesis 2	6,220.03	3.69
8	Hipotesis 3	5,544.89	4.13
8	Hipotesis 4	5,787.36	3.96
8	Hipotesis 5	5,840.21	3.93
6	Hipotesis 6	14,083.59	1.63

Nota: Resultados del cálculo de factor de seguridad a cargas de levantamiento (Uplift).

En la tabla anterior, se muestra que la zapata aislada, tiene un factor de seguridad, al levantamiento, mayor a 1.63, lo cual muestra que el tamaño de cimentación es adecuada y segura al volteo.

3.2.7.5. Costo de construcción.

En la siguiente tabla se aprecia detallado el costo de construcción de este tipo de cimentaciones, la cual está acorde al diseño establecido con el programa SAFE 21, analizado, para resistir todas las hipótesis de carga establecidas para la torre de transmisión.

Tabla 27.

Presupuesto de cimentación de torres tipo T, con zapatas tipo pata de elefante.

Item	Descripción	Und	Metrado	P.U S/.	MONTO S/.
01.00	MOVIMIENTO DE TIERRAS				9,578.67
01.01	Excavación en terreno normal H=1.5m.	m3	36.95	81.19	2,999.72
01.02	Excavación en terreno entibado H>1.5m.	m3	27.09	97.43	2,639.75
01.03	Entibado para excavacion de cimentaciones.	m2	64.04	22.08	1,414.02
01.04	Nivelacion y colocacion de Stubs	Und	4.00	147.80	591.19
01.05	Relleno compactado con material propio.	m3	40.62	31.54	1,281.19
01.06	Eliminación de material excedente (d < 100 m)	m3	24.84	26.28	652.80
02.00	CONCRETO				930.56
02.01	Solado para Estructuras e=0.05 m	m2	24.63	37.78	930.56
03.00	CONCRETO ARMADO				28,533.93
03.01	Concreto f 'c = 210 kg/cm2	m3	24.30	681.89	16,568.55
03.02	Encofrado y Desencofrado Plano	m2	30.41	83.47	2,538.33
03.03	Acero de Refuerzo fy = 4200 kg/cm2	Kg	1,333.27	7.07	9,427.06
TOTAL S/.					39,043.16

Nota: Costo de construcción de una cimentación tipo pata de elefante.

Los detalles de los precios unitarios, así como planillas de metrado se encuentran en los anexos.

3.2.8. Incidencia de las cimentaciones en costo de una línea de transmisión.

El proyecto; RENOVACIÓN, DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN, EN NIVEL DE TENSIÓN, DE 138 KV Y MODIFICACIÓN DE RUTA MAZUKO - PUERTO MALDONADO, SECTOR VILLA SANTIAGO, DISTRITO DE INAMBARI, PROVINCIA DE TAMBOPATA, DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS, detallado en el Anexo 05, fue realizado con torres de celosía, usando solo zapatas aisladas, resumiéndose a continuación.

Tabla 28.

Resumen del presupuesto, de línea de transmisión, en el proyecto, Renovación de Línea De Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento Madre de Dios.

Seccion Obra	Descripcion	Modificacion de la Ruta L.T. 138kV Mazuko - Puerto Maldonado	
A.	Suministro de Materiales	S/	1,243,066.53
B.	Montaje Electromecanico	S/	499,945.40
C.	Obras Civiles	S/	791,863.65
D.	Transporte	S/	74,583.99
Total Costo Directo		S/	2,609,459.57

Nota: Tomado de expediente técnico, Renovación, de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, LP-SM-6-2021-ELSE-1. (Memoria descriptiva), SEACE 3 (2021), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OSCE, Perú.

En la tabla anterior, se muestra que el costo de las cimentaciones (obras civiles), tiene una incidencia en el costo directo del 30.35%.

Con base a este presupuesto, se analiza, como varia este presupuesto, variando el tipo cimentación, para los cuatro casos diseñados, en las cuales, los costos de suministro de materiales, montaje electromecánico, y transporte se mantuvieron constantes.

Tabla 29.

Variación del presupuesto, de línea de transmisión, en el proyecto, Renovación de Línea De Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento Madre de Dios. Utilizando, una cimentación, con zapatas aisladas.

Seccion Obra	Descripcion	Modificacion de la Ruta L.T. 138kV Mazuko - Puerto	
A.	Suministro de Materiales	S/	1,243,066.53
B.	Montaje Electromecanico	S/	499,945.40
C.	Obras Civiles	S/	762,645.32
D.	Transporte	S/	74,583.99
Total Costo Directo		S/	2,580,241.24

Nota: Presupuesto del proyecto usando zapatas aisladas cuadradas.

En la tabla anterior, se muestra que el costo de las cimentaciones con zapatas aisladas, tiene una incidencia en el costo directo del 29.56%, que es menor al del proyecto base (30.35%), esto se debe a que se optimizo el diseño, obteniendo menores dimensiones de la zapata y con ello reducción de materiales.

Tabla 30.

Variación del presupuesto, de línea de transmisión, en el proyecto, Renovación de Línea De Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento Madre de Dios. Utilizando, una cimentación, con zapatas conectadas.

Seccion Obra	Descripcion	Modificacion de la Ruta L.T. 138kV Mazuko - Puerto	
A.	Suministro de Materiales	S/	1,243,066.53
B.	Montaje Electromecanico	S/	499,945.40
C.	Obras Civiles	✓ S/	807,527.79
D.	Transporte	S/	74,583.99
Total Costo Directo		S/	2,625,123.71

Nota: Presupuesto del proyecto usando zapatas conectadas.

En la tabla anterior, se muestra que el costo de las cimentaciones, con zapatas conectadas, tiene una incidencia en el costo directo del 30.48%, que es ligeramente mayor al del proyecto base (30.35%).

Tabla 31.

Variación del presupuesto, de línea de transmisión, en el proyecto, Renovación de Línea De Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento Madre de Dios. Utilizando, una cimentación, tipo losa.

Seccion Obra	Descripcion	Modificacion de la Ruta L.T. 138kV	
A.	Suministro de Materiales	S/	1,243,066.53
B.	Montaje Electromecanico	S/	499,945.40
C.	Obras Civiles	S/	811,185.44
D.	Transporte	S/	74,583.99
Total Costo Directo		S/	2,628,781.36

Nota: Presupuesto del proyecto usando cimentación tipo losa.

En la tabla, anterior se muestra que el costo de las cimentaciones, usando una losa de cimentación, tiene una incidencia en el costo directo del 30.86%, que ligeramente mayor al del proyecto base (30.35%).

Tabla 32.

Variación del presupuesto, de línea de transmisión, en el proyecto, Renovación de Línea De Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento Madre de Dios. Utilizando, una cimentación, tipo pata de elefante.

Seccion Obra	Descripcion	Modificacion de la Ruta L.T. 138kV	
A.	Suministro de Materiales	S/	1,243,066.53
B.	Montaje Electromecanico	S/	499,945.40
C.	Obras Civiles	S/	791,942.90
D.	Transporte	S/	74,583.99
Total Costo Directo		S/	2,609,538.82

Nota: Presupuesto del proyecto usando zapatas pata de elefante.

En la tabla anterior, se muestra que el costo de las cimentaciones, usando una losa de cimentación, tiene una incidencia en el costo directo del 29.38%, que es menor al del proyecto base (30.35%).

De otro lado, en el proyecto, Saldo de Obra “Ampliación de la SET Chahuares, Línea de Transmisión 60 kV, Chahuares – Kiteni, y Subestación Kiteni, del Distrito de Echarati, Provincia de la Convención, del Departamento de Cusco”, el cual está cercano al área del proyecto analizado, las obras civiles (cimentaciones), tienen, una incidencia del 25.24%, donde su presupuesto está a base de torres de celosía y cimentaciones con zapatas aisladas.

Tabla 33.

Resumen de presupuesto, Saldo de Obra, Ampliación de la SET Chahuares, Línea de Transmisión, en 60 kV, Chahuares – Kiteni, y Subestación Kiteni, del Distrito de Echarati, Provincia de la Convención, en el Departamento de Cusco”.

Seccion Obra	Descripcion	Modificacion de la Ruta L.T. 138kV Mazuko - Puerto Maldonado	L.T. 60 kV Chahuares – Kiteni, y Subestación Kiteni, Echarati.
A.	Suministro de Materiales	1,243,066.53	495,795.34
B.	Montaje Electromecanico	499,945.40	1,878,944.18
C.	Obras Civiles	791,863.65	888,321.47
D.	Transporte	74,583.99	228,669.16
Total Costo Directo		S/ 2,609,459.57	S/ 3,491,730.15

Nota: Tomado de expediente técnico Saldo de Obra, Ampliación de la SET Chahuares, Línea de Transmisión, en 60 kV Chahuares – Kiteni, y Subestación Kiteni, del Distrito de Echarati, Provincia de la Convención, en el Departamento de Cusco, Contratación Directa N° CD-001-2022-ELSE, SEACE 3 (2022), Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado (OSCE), Perú.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión.

Para el diseño de cimentaciones, en líneas de transmisión, en alta tensión, es necesario, conocer sus características, la cual está dado, por su capacidad de transporte de energía, que define, el número y calibre de conductores, que junto con la topografía y condiciones ambientales, de la zona que atraviesa, determina los esfuerzos mecánicos, y con ello las condiciones o hipótesis de carga, para el diseño, las cuales, se visualizaran en árboles de carga, para ser aplicados a las torres de transmisión, en su diseño. Así mismo, el tamaño y/o dimensionamiento de la torre, está definido por el nivel de tensión, en que operara la línea, ya que la tensión, define el nivel de aislamiento, con ello se determina, las distancias mínimas, de seguridad, como son, la distancia del conductor al suelo, longitud de crucetas, altura del cable de guarda, etc. De otro lado, es necesario, conocer la función o tipo de torre dentro de una línea de transmisión (suspensión, de anclaje de ángulo o terminal), ya que cada torre tendrá árboles de carga diferentes, que afectará, el diseño de las cimentaciones, las cuales se reflejan por sus reacciones en las patas de las mismas torres, en las diferentes hipótesis de carga.

Es este estudio de cimentaciones, realizado para cuatro tipos de cimentaciones; zapata aislada, zapata conectada, losa de cimentación, zapata tipo pata de elefante. Se observó que las cimentaciones con zapatas tipo pata de elefante tienen menores volúmenes de excavación en comparación con el resto de las cimentaciones. Sin embargo, no sucede lo mismo con el concreto vertido, donde menor volumen para vaciado, lo tiene las zapatas aisladas cuadradas. Así mismo, en las zapatas aisladas se utiliza menor cantidad de acero, lo que da como principal motivación reconocer a la zapata aislada, como la cimentación más práctica, de las cuatro cimentaciones que se han estudiado. Esta afirmación se fundamenta en la siguiente tabla.

Tabla 34.

Cantidad de materiales utilizados en cimentaciones superficiales.

Tipo de cimentacion	Volumen de excavacion (m3)	Volumen de concreto (m3)	Encofrado (m3)	Cantidad de acero (kg)
Zapata aislada	87.46	16.65	19.20	976.24
Zapata conectada	96.94	16.99	30.26	1,209.49
Losa de cimentacion	109.65	23.77	10.40	1,252.63
Zapata pata de elefante	64.04	24.30	30.41	1,333.27

Nota: Detalle de cantidad de materiales utilizados por tipo de cimentación.

Al conectar con una viga de cimentación las zapatas aisladas, estas mejoran su rendimiento estructural y geotécnico, uniformizando las cargas en el suelo, permitiendo además disminuir la longitud de la zapata, pero su costo se incrementa, debido a que se requiere mayores volúmenes de excavación, entibado, encofrado y cantidad de acero.

De las cimentaciones evaluadas, se concluye que la cimentación de zapata aislada es la más económica, seguida de la cimentación tipo pata de elefante, zapata conectada, y losa de cimentación, tal como se describe en la siguiente tabla, donde comparadas con la cimentación de zapata aislada, la cimentación de zapata conectada tiene un costo mayor en un 17.98%, la cimentación tipo losa en un 19.29% y la cimentación tipo pata de elefante en un 12.37%.

Tabla 35.

Resumen de costo de construcción de cimentaciones superficiales evaluadas.

Tipo de cimentacion	Costo de construccion (S/.)	Indicencia
Zapata aislada	34,745.60	0.00%
Zapata conectada	40,991.27	17.98%
Losa de cimentacion	41,448.48	19.29%
Zapata pata de elefante	39,043.16	12.37%

Nota: Costo de construcción e incidencia de cimentaciones.

Con respecto al análisis de estabilidad al volteo y deslizamiento, la cimentación tipo losa, tiene grandes factores de seguridad resumidos a continuación, superando al valor mínimo de 1.5, requerido según la norma E0.30 de diseño sismorresistente para cimentaciones.

Tabla 36.

Resumen de factores de seguridad al volteo (FSV) y deslizamiento (FSD, cimentación tipo losa.

Combinacion	FSVy	FSVx	FSD
Hipotesis 1	7.06	7.48	12.18
Hipotesis 2	6.71	6.64	33.54
Hipotesis 3	6.66	6.59	34.23
Hipotesis 4	6.66	6.59	34.23
Hipotesis 5	6.66	6.59	34.23
Hipotesis 6	8.26	7.22	5.53

Nota: Factores de seguridad, al deslizamiento, y volteo, calculado para una losa de cimentación.

De las cimentaciones tipo zapata aislada y pata de elefante, se tiene que, para la misma carga de levantamiento, la cimentación, tipo zapata aislada, tiene mayor factor de seguridad, que la de zapata, tipo para de elefante, siendo esta última, poco resistente al levantamiento, la cual, tiene un factor de seguridad mínimo de, 1.67, al volteo, con un,

consumo de concreto del 45.94%, mayor al requerido, en la construcción, de una zapata aislada. Por lo cual, una zapata aislada, será, es más eficiente, económicamente, para cargas, Uplift.

Tabla 37.

Resumen de factores de seguridad al levantamiento para zapatas aisladas y tipo pata de elefante.

TABLE: Joint Reactions				
Joint	OutputCase	F3 (z)	FSU Zapata Aislada	FSU Zapata Pata de Elefante
Text	Text	Kgf		
170	Hipotesis 1	7,170.80	7.23	3.28
170	Hipotesis 2	6,220.03	8.34	3.78
170	Hipotesis 3	5,544.89	9.35	4.24
170	Hipotesis 4	5,787.36	8.96	4.06
170	Hipotesis 5	5,840.21	8.88	4.02
171	Hipotesis 6	14,083.59	3.68	1.67

Fuente: Discusión y conclusiones de proyecto de tesis.

En las seis hipótesis evaluadas la capacidad portante para la cimentación tipo losa, el esfuerzo del terreno admisible máximo llegó a $0.758 \text{ kg/cm}^2 < 0.80 \text{ kg/cm}^2$, que era el requerido, por lo que se puede inferir que la cimentación tipo losa es recomendable en suelos malos o de baja capacidad admisible ($\leq 1.0 \text{ kg/cm}^2$).

Se determinó que el STUB, embebido en el concreto ($f'c=210 \text{ kg/cm}^2$), requiere de 3 conectores de corte (Cleats) por lado de perfil, teniendo un perfil como STUB, tipo L de $4 \times 4 \times 5/8$ ", el cual es adecuado para soportar las cargas, en las patas de las torres, para las diferentes hipótesis, de diseño. Así mismo, teniendo en cuenta la pendiente de la patas de las torres, se determinó que la profundidad de desplante mínima, para los diferentes tipos de cimentación, según las características el STUB, la cual está dado por;

$$Df_{\min} = 94.62 \text{ cm} \approx 95 \text{ cm}.$$

4.2. Conclusiones.

Se analizó el efecto de las cimentaciones superficiales, en la construcción de líneas, de transmisión, de energía eléctrica, en alta tensión, en el Perú, tomando como muestra, una línea de 138kV, analizando, la afectación de cuatro tipos de cimentaciones, determinando, además, la incidencia del costo de construcción, y estabilidad estructural, de la línea de transmisión.

Se ha modelado y analizado, una torre metálica de celosía, de anclaje, tipo T, para uso en alta tensión, en una línea de transmisión, en 138kV, en el departamento de Madre de Dios, mediante software, SAP 2000, aplicando las combinaciones de cargas, según las hipótesis de trabajo, u operación, de la línea de transmisión, considerando, las normas internacionales, Código Nacional de Electricidad, Así como, los requerimientos de diseño estructural en acero, dados, en la Norma ACSE/SEI 10-15, teniendo como resultados, en el diseño estructural, que la torre autoportada, cumple con los ratios de carga, y relaciones de esbeltez, en todos sus miembros.

Se corroboró la importancia e influencia de las cargas de viento, al respecto se indica que el CNE (2011), la cual, considera, que la velocidad de diseño, que no varía con la altura. Así mismo, la Norma E.020, si la toma en cuenta su variación, de la velocidad de diseño, a partir de los 10m. De otro lado, al ser las torres de transmisión, clasificadas como una edificación tipo 3, en la norma, E0.20 (p.20), las presiones de diseño, se determinaron, a partir de procedimientos, de análisis, reconocidos en ingeniería, siendo las Norma ACSE/SEI 7-16, la que toma en cuenta, muchos factores, como factores de zona, topografía, ráfaga, y diversos coeficientes que hacen el análisis más de la estructura más confiable ya que son las que se indican en el Manual ACSE N° 74 y IEEE NESC 2017, para, redes eléctricas, aéreas.

Se realizó, el diseño geotécnico, y estructural de cuatro tipos de cimentaciones

superficiales (Cimentación de zapata aislada, zapata conectada, tipo losa y pata de elefante) verificándose la estabilidad (volteo o deslizamiento), determinando que la cimentación tipo losa tiene grandes factores de seguridad para estabilidad al volteo y deslizamiento. Así mismo, para cargas de levantamiento (Uplift), la cimentación tipo pata de elefante, tiene bajos factores de seguridad comparados con la cimentación tipo zapata aislada, determinando así que esta última es más eficiente.

La cimentación superficial, tipo zapata aislada, es la más económica, en la construcción, de una línea de transmisión. Sin embargo, según las condiciones de suelo, como aquellos de baja capacidad portante se pueden optar por cimentaciones tipo losa o zapatas conectadas, previa evaluación.

En el caso de cimentaciones tipo pata de elefante, estas son muy costosas, comparadas con las zapatas aisladas, debido a que el efecto de levantamiento (Uplift), incrementa los volúmenes de concreto para conseguir factores de seguridad adecuados, para este tipo de cargas.

Las cimentaciones con zapatas conectadas son más costosas que las zapatas aisladas cuadradas y las de tipo pata de elefante, pero tienen costo del 98.90% de lo que representa la construcción de una cimentación tipo losa.

La profundidad de desplante de las cimentaciones está determinada por longitud mínima de empotrado del STUB, en el concreto. En este sentido, en el caso de cimentaciones tipo losa, las cuales se usarían en cimentaciones con suelos de baja capacidad portante ($\leq 1.0 \text{ kg/cm}^2$), estas estarían limitadas a un desplante de profundidad mínima de 1.0 m.

El costo o influencia, de cimentaciones, en líneas de transmisión, es aproximadamente, el 30% del costo directo, utilizando cimentaciones con zapatas aisladas (cuadradas) como se muestra a continuación, para el análisis en el presupuesto, de dos estudios de líneas de transmisión, analizados;

Tabla 38.
Incidencia de las cimentaciones en el costo total de un proyecto.

Descripcion	Modificacion de la Ruta L.T. 138kV Mazuko - Puerto Maldonado		L.T. 60 kV Chahuares – Kiteni, y Subestación Kiteni, Echarati.	
Costo de Obras Civiles	S/	791,863.65	S/	888,321.47
Costo directo total de Proyecto	S/	2,609,459.57	S/	3,491,730.15
Incidencia		30.35%		25.44%

Nota: Incidencia de costos de cimentación para dos proyectos con niveles de tensión de 60 y 138kV.

las variaciones en la incidencia del presupuesto se pueden modificar ligeramente según el tipo de cimentación utilizada, u optimizando su diseño. En el caso del proyecto, Renovación de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios, mejorando el diseño de cimentaciones, se tiene una incidencia mínima de -0.789% usando zapatas aisladas optimizando el diseño y una incidencia máxima de 0.002% usando zapatas patas de elefante (circulares), donde estas comparaciones fueron hechas con el presupuesto base u original.

Tabla 39.

Variación de incidencia de los diferentes tipos de cimentaciones analizadas con respecto al presupuesto original del proyecto, Renovación de Línea de Transmisión, En el Nivel de Tensión, de 138 kV, y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, del Distrito de Inambari, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios.

Tipo de cimentacion	Incidencia	variacion de incidencia
Zapata aislada	29.56%	-0.789%
Zapata conectada	30.76%	0.416%
Losa de cimentacion	30.86%	0.512%
Zapata pata de elefante	30.35%	0.002%

Nota: Discusión y conclusiones de proyecto de tesis.

4.3. Recomendaciones

Se recomienda a los estudiantes de ingeniería, familiarizarse con las normas ACSE/SEI 10-15, ACSE/SEI 7-16, Manuales ACSE N° 74, 91, 123, Norma IEEE std 691, IEEE NESC 2017, para el diseño, de estructuras, de líneas de transmisión, debido a que, en el Perú, no está normado su diseño, en el Reglamento Nacional de Construcción (E.020, E0.30, E.050 y E0.60), donde, el Ministerio de Energía, y Minas (MEM), solo ha publicado las Norma, DGE (2003), "Especificaciones técnicas, para los estudios de geología, y geotecnia, para electroductos, para Electrificación Rural" (aprobada con R.D. N° 029-2003 EM/DGE, publicada el 2004-03-02) y "Especificaciones técnicas, para El suministro de materiales, y Equipos de líneas de transmisión, para electrificación rural" (aprobada con R.D. N° 028-2003 EM/DGE, publicada el 2004-03-02), las que indican, rasgos generales de diseño los componentes estructurales, para líneas de transmisión.

Hacer análisis comparativos de resultados de análisis estructural de torres autoportadas y cimentaciones, usando SAP2000, SAFE 21 y comparando con los softwares Tower, Caisson, de Power Line Systems (<https://www.powerlinesystems.com/>).

Realizar estudios, para las diversas cimentaciones, considerando, el desnivel del terreno, donde, además, se tenga en cuenta, las variaciones, del tamaño de las extensiones, de las patas, en las torres.

Modelar estructuras, autoportadas, de celosía, para cargas de viento, con el software, RWIND 2, de Dlubal, y comparar los resultados, con los obtenidos con él, ACSE/SEI 7-16. Así mismo, evaluar las cimentaciones, según cargas obtenidas, en el Software, Plaxis 2D y 3D, y realizar comparaciones, con el Software, SAFE 21.

REFERENCIAS

1. Chen, W (1999). *Handbook of Structural Engineering*. Londres, Inglaterra. Editorial CRC LLC.
2. IEEE. Std 691 (2001). *Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing*. American National Standards Institute Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, New York, NY 10016-5997, USA. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/979362>
3. Kiessling, E & Nefzger, P & Nolasco, J & Kaintzyk, U (2003). *Overhead Power Line, Planning, Design, Construction*. Berlín, Alemania. Editorial Springer. Recuperado de <https://www.springer.com/gp/book/9783540002970>
4. IEC 60826 (2003). *Design criteria of overhead transmission lines*. International Electrotechnical Commission. Switzerland. Recuperado de <https://webstore.iec.ch/publication/33148#:~:text=IEC%2060826%3A2017%3A%20specifies%20the,with%20a%20lower%20nominal%20voltage.>
5. Labegalini, P & Fuchs, R & Almeida, M (2005). *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*. São Paulo, Brasil. Editorial Blücher.
6. Chen, W & Lui, E (2005). *Handbook of Structural Engineering*. Londres, Inglaterra. Editorial CRC press, Taylor&Francis Group Recuperado de <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420039931/handbook-structural-engineering-chen-lui>
7. MINEM (23 de julio de 2006). *Ley para asegurar el desarrollo eficiente de la Generación Eléctrica (Ley N° 28832)*. Recuperado de <https://www.minem.gob.pe/legislacionM.php?idSector=12&idLegislacion=6428>
8. MINEM (2007). *Tejedores de Luz (Homenaje a los forjadores de la transmisión de energía eléctrica en el Perú)*, Lima, Perú. Recuperado de <https://minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/biblioteca/tejedores/capitulo9.pdf>
9. Garrido, J. (2009). *Fundações superficiais de linhas de transmissão submetidas a esforços de Tração*. (Tesis de grado). Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Recuperado de <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/24115>
10. Tojeira, L. (2010). *Metodização do estudo das fundações para suportes de linhas de transmissão*. (Tesis de doctorado). Pontificia universidad católica de Rio de Janeiro, PCU-Rio, Rio de Janeiro, Brasil. Recuperado de <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=16178@1>
11. De la Cruz, J & Sánchez, M. (2010). *Diseño Geotécnico de la cimentación a base de zapatas*

- aisladas ancladas en roca para el proyecto L. T. Quevedo Menonita.* (Tesis de grado). Instituto Politécnico Nacional, IPN, México. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/8996>
12. IEEE. Std 977 (2010). Guide to Installation of Foundations for Transmission Line Structures. American National Standards Institute Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, New York, NY 10016-5997, USA. Recuperado de <https://standards.ieee.org/ieee/977/1343/>
 13. CNE. (2011). *Código nacional de electricidad suministro 2011*. Ministerio de Energía y Minas, MEM, Lima, Perú. Recuperado de <http://spij.minjus.gob.pe/Graficos/Peru/2011/Mayo/05/RM-214-2011-MEM-DM.pdf>
 14. Cañar, G. (2012). *La resistencia del suelo y su incidencia en el tipo de cimentación para la línea de subtransmisión a 69kV, Puyo – Mushullacta.* (Tesis de grado). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/2157>
 15. Simonetti, A. (2012). *Análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão considerando a interação solo-estrutura.* (Tesis de maestría). Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa María, Brasil. Recuperado de <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7785>
 16. CFE. (2012). *Manual para el Diseño Electromecánico de Líneas de Transmisión Aéreas. Comisión Federal de Electricidad, CFE.* México. Recuperado de <https://www.cfe.mx/Transmision/Pages/default.aspx>
 17. Braja, D (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones.* Cengage Learnig. México. Recuperado de <https://latam.cengage.com/libros/fundamentos-de-ingenieria-de-cimentaciones/>
 18. ETS-LT (2013). *Norma DGE, Especificaciones técnicas para el suministro de materiales y equipos de líneas de transmisión para electrificación rural. Dirección General de Electricidad, DGE. Ministerio de Energía y Minas. Perú.* Recuperado de; <http://www.minem.gob.pe/detalle.php?idSector=6&idTitular=628&idMenu=sub114&idCateg=342>
 19. Hernández, R, P (2014) *Metodología de la Investigación.* México. Editorial McGraw-Hill, Interamericana Editores, S.A. de C.V.
 20. MINEM (2015). *Transmisión de energía eléctrica, parte 4.* Lima, Perú. Recuperado de https://minem.gob.pe/minem/archivos/Capitulo%204%20Transmision%20electrica%202015%20FINAL_.pdf
 21. Costa, R. (2015). *Dimensionamento de fundações para torres metálicas de linha de transmissão de energia elétrica.* (Tesis de grado). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, Brasil. Recuperado de <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/157039>

22. ACSE/SEI 10-15. (2015). *Design of Latticed Steel Transmission Structures*. American Society of Civil Engineers. ACSE, Reston, Virginia 20191-4382, USA. Recuperado de <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784413760>
23. Álvarez, D. (2017). *Diseño de cimientos en base a zapatas aisladas para torres de transmisión eléctrica aplicado al proyecto Condorococha -Tarma-Junín*. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Continental, UC, Huancayo, Perú. Recuperado de <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/4414>
24. Kalaga, S & Yenumula, P (2017). *Design of Electrical Transmission Lines*. Londres, Inglaterra. Editorial C RC press, Taylor&Francis Group Recuperado de <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315755687/design-electrical-transmission-lines-sriram-kalaga-prasad-yenumula>
25. Konstanting, P (2017). *Overhead Lines*. CIGRE Green Books. CIGRE, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France. Recuperado de <https://www.e-cigre.org/publications/detail/gb-1-overhead-lines.html>
26. Coca, J. (2018). *Influencia de Calidad del Concreto, Acero y Compactación en Construcción de Cimientos en Torres de Alta Tensión*. (Tesis de grado). Universidad Peruana los Andes, UPLA, Huancayo, Perú. Recuperado de <http://www.repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/1034>
27. Ruiz, M. (2018). *Soluciones para el diseño y construcción de cimentaciones de torres de transmisión eléctrica de alta tensión*. (Tesis de grado). Universidad de El Salvador, UES, El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/16234/>
28. More, A. & Taypicuri, L (2019). *Método de cálculo para predimensionar zapatas ancladas en roca para cimentaciones de torres de alta tensión*. (Tesis de grado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, UPC, Lima, Perú. Recuperado de <http://www.repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/1034>
29. Lavall, T. (2019). *Dimensionamento de fundação para uma torre metálica estaiada de linha de transmissão de energia*. (Tesis de grado). Universidade Do Sul de Santa Catarina, UNISUL, Palhoça, Brasil. Recuperado de <https://riuni.unisul.br/handle/12345/8531>
30. Anfossi, G. (2019). *Diseño de Pilotes Helicoidales para el Soporte de la Cimentación de una Torre de Alta Tensión*. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú, PUCP, Lima, Perú. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/17491>
31. Caycho, F. (2020). *Análisis y diseño de la cimentación superficial de una torre de alta tensión en líneas de transmisión*. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú, PUCP, Lima, Perú. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/17491>

32. Chávez, F & Paz, A. (2020). *Metodología del diseño geotécnico de las cimentaciones en líneas de transmisión. (Tesis de grado)*. Universidad de Piura, UDEP, Piura, Perú. Recuperado de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/4711>
33. Gilberto, D. (2020). *A influência das características geotécnicas dos solos no dimensionamento das fundações das estruturas metálicas pertencentes a linhas de transmissão de energia elétrica. (Tesis de grado)*. Universidade do Sul de Santa Catarina, RIUNI, Brasil. Recuperado de <https://riuni.unisul.br/handle/12345/10097>
34. ACSE N° 74. (2020). *Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading*. American Society of Civil Engineers. ACSE, Reston, Virginia 20191-4382, USA. Recuperado de <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784410356>
35. SEACE 3. (2021). *Expediente técnico, "Renovación de Línea De Transmisión; En El (La) Nivel De Tensión 138 kV y Modificación de Ruta Mazuko - Puerto Maldonado, Sector Villa Santiago, del Distrito de Inambari, Provincia Tambopata, Departamento Madre de Dios", LP-SM-6-2021-ELSE-1*. Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OCSE. Perú. Recuperado de; <https://prodapp2.seace.gob.pe/seacebus-uiwd-pub/fichaSeleccion/fichaSeleccion.xhtml?ptoRetorno=LOCAL>
36. MINEM (29 de diciembre de 2022). *Aprueban el Plan de Transmisión 2023-2032*. El peruano. Recuperado de <https://www.minem.gob.pe/detalle.php?idSector=6&idTitular=3337&idMenu=sub3191&idCateg=773>
37. SEACE 3. (2022). *Expediente técnico, "Saldo de Obra "Ampliación de la SET Chahuares, Línea de Transmisión 60 kV Chahuares – Kiteni Y Subestación Kiteni del Distrito de Echarati, Provincia de la Convención del Departamento de Cusco", Contratación Directa N° CD-001-2022-ELSE, SEACE 3 (2022)*. Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado, OCSE. Perú. Recuperado de; <https://prodapp2.seace.gob.pe/seacebus-uiwd-pub/fichaSeleccion/fichaSeleccion.xhtml?ptoRetorno=LOCAL>
38. Portalino, F. (2022). *Alternativa de Fundación con Micropilotes Helicoidales para Torres de Telecomunicación en Suelos Granulares. (Tesis de grado)*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, UPC, Lima, Perú. Recuperado de <http://www.repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/1034>
39. COES (2023). *Comité de Operación Económica del Sistema*. Lima, Perú. Recuperado de <https://www.coes.org.pe/Portal/PreguntasFrecuentes/Index>