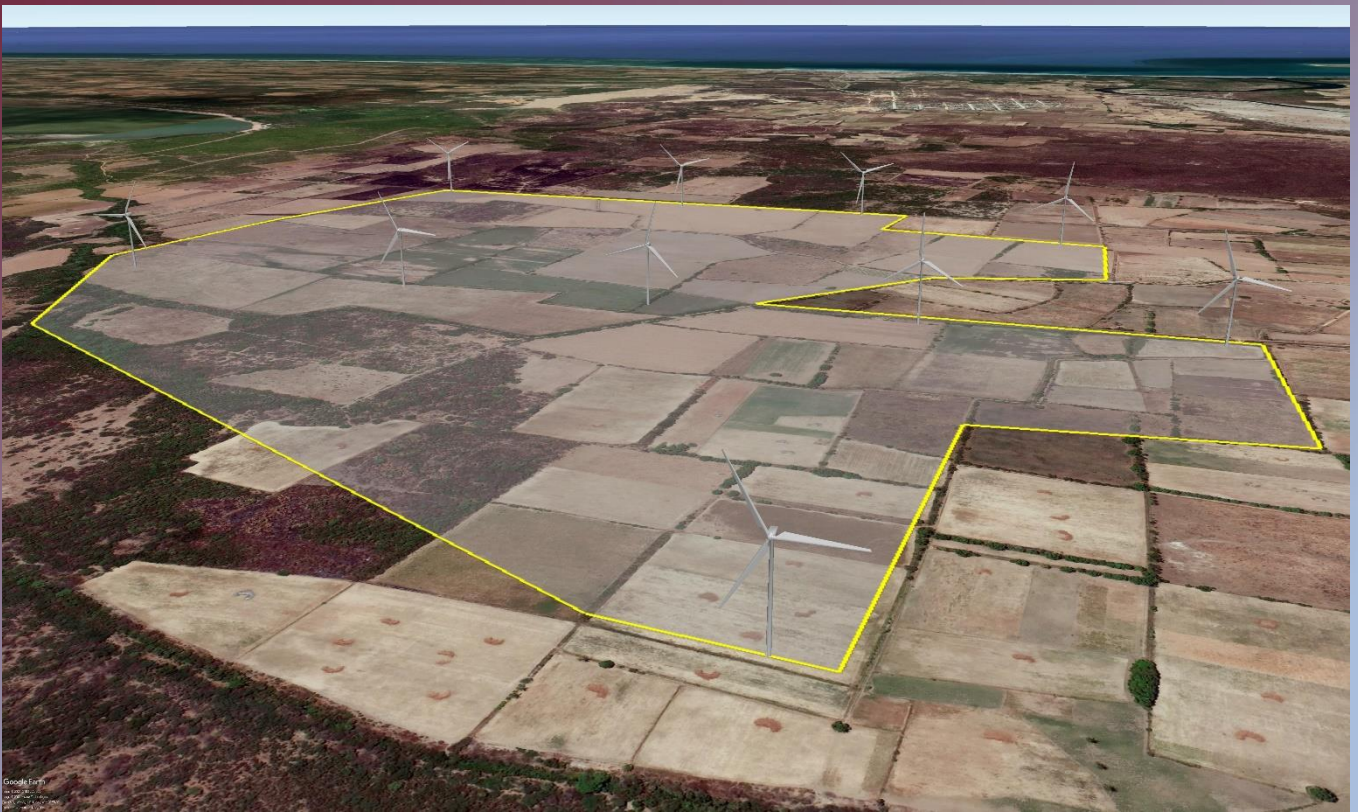


Diseño y planeación de un parque eólico en la comunidad de San Pedro Huilotepec, Oaxaca



Luis Angel De La Rosa Jiménez

Sara Janeth Silva Rodríguez

Reynaldo Iracheta Cortéz

José Rafael Dorrego Portela

**DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UN
PARQUE EÓLICO EN LA
COMUNIDAD DE SAN
PEDRO HUILOTEPEC, OAXACA**

**DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UN
PARQUE EÓLICO EN LA
COMUNIDAD DE SAN
PEDRO HUILOTEPEC, OAXACA**

Luis Angel De La Rosa Jiménez

Sara Janeth Silva Rodríguez

Reynaldo Iracheta Cortéz

José Rafael Dorrego Portela

Acerca de los autores

Luis Angel De La Rosa Jiménez. Realizó sus estudios de Licenciatura en el área de Ingeniería Mecánica (2015-2019) en el Tecnológico Nacional de México TecNM, campus Salina Cruz (ITSAL) en el estado de Oaxaca, México. Maestrante (2020-2022) en el programa de la Maestría en Ciencias en Energía Eólica (MCEE) de la Universidad del Istmo (UNISTMO) campus Tehuantepec perteneciente al PNCP, donde su principal línea de trabajo es el análisis modal experimental, y desempeña interés personal en el modelado de sistemas dinámicos. Durante el periodo como maestrante ha tenido participación en el XII congreso internacional de investigación de la Universidad del Valle de México (UVM) campus Tuxtla Gutierrez Chiapas, presentación de póster en el "2do Workshop Regional-Energías Renovables, Tendencias y Desarrollo Tecnológico" en la Universidad del Istmo, además de estar certificado por Dassault Systèmes Solidworks a nivel internacional en diseño mecánico a nivel asociado, y en los módulos profesional avanzados de sheet metal y surfaces.

Sara Janeth Silva Rodríguez. Realizó sus estudios de Licenciatura en Ingeniería Mecánica, con la especialidad de mantenimiento en plantas (2015-2019) en el Instituto Tecnológico de Salina Cruz, en el estado de Oaxaca. Posteriormente realizó sus estudios de Maestría en Ciencias en Energía Eólica en la Universidad del Istmo (UNISTMO), Campus Tehuantepec, donde su línea de investigación se enfoca al análisis y simulación de la mecánica de fluidos, la Interacción Fluido-Estructura en álabes de aerogeneradores de baja potencia, así como la Dinámica de Fluidos Computacional aplicada. Como maestrante ha sido participante del XII congreso internacional de investigación de la Universidad del Valle de México. Actualmente certificada en Interacción Fluido-Estructura por parte del instituto IESSS y certificación por parte del Grupo SSC y el Instituto Tecnológico Sanmiguelense de Estudios Superiores en Ansys Meshing.

Reynaldo Iracheta Cortéz. El Dr. Iracheta realizó sus estudios de Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Eléctrica (2003) y de Maestría en Ingeniería Eléctrica (2007) en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Realizó sus estudios de Doctorado en Ciencias en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Unidad Guadalajara, 2013. De 2013 a 2016, laboró en la Gerencia de Matemáticas Industriales (GMI) del Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT) desarrollando proyectos de vinculación con la industria. De 2016 a la fecha, el Dr. Iracheta es profesor investigador Cátedras CONACYT adscrito a la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec para el desarrollo del proyecto "Diseño y Construcción de Aerogeneradores de Baja Potencia para su Aplicación en el Istmo de Tehuantepec". Sus principales líneas de investigación son el diseño de generadores síncronos de imanes per-

manentes para aplicaciones en aerogeneradores, el diseño de la infraestructura eléctrica de parques eólicos y su impacto en la interconexión con la red eléctrica, la simulación y el análisis de transitorios electromagnéticos en redes eléctricas, el modelado de elementos de sistemas eléctricos de potencia, la simulación digital de redes eléctricas en tiempo real y el diseño de pruebas de lazo cerrado a relevadores digitales con la herramienta RTDS.

José Rafel Dorrego Portela. Realizó sus estudios licenciatura en Ingeniería Mecánica y su Maestría en Diseño Mecánico, ambos grados obtenidos por la Universidad de Oriente, Cuba. Actualmente es profesor investigador de tiempo completo en la Universidad del Istmo, Oaxaca, México. Sus temas de interés en la investigación están relacionados con la energía eólica y el diseño aerodinámico y estructural de aerogeneradores.

Contenido

Capítulo 1. Introducción.

Capítulo 2. Análisis del recurso eólico.

Capítulo 3. Selección y distribución de aerogeneradores.

Capítulo 4. Infraestructura eléctrica del parque eólico.

Capítulo 5. Análisis económico.

Prefacio

Esta es la primera edición de la aplicación de la metodología de diseño y planeación de parques eólicos por parte de los autores. Se desarrolla la metodología pertinente para el diseño de parques eólicos, específicamente, en esta obra se aborda el diseño de un parque de capacidad de 50 MW de potencia para la comunidad de San Pedro Huilotepec, dentro de la región del Istmo en el estado de Oaxaca, México. Las etapas de estudio principales son:

- análisis del recurso eólico,
- selección y distribución de aerogeneradores,
- infraestructura eléctrica del parque eólico y
- análisis económico.

Dentro de los puntos mencionados, se evalúa el recurso eólico de la zona de emplazamiento al hacer uso de distintas bases de datos, tanto estaciones virtuales como una estación física, con el fin de obtener un estimado promedio del potencial eólico de la zona. Esto permite abrir paso a la selección de aerogeneradores, basándose sus fichas técnicas para modelos comerciales, mismos que al establecer posibles configuraciones de distribución son simulados en el software WAsP para evaluar las pérdidas del parque y estimar el potencial aprovechado, el uso de software especializado en el área eólica permite determinar cual de las configuraciones propuestas es la indicada para el desarrollo de los diagramas unifilares.

La infraestructura básica del parque como transformadores, protecciones y conductores es seleccionado con base en la capacidad del parque eólico, mientras que para los conductores esto es determinado a partir de la evaluación de pérdidas para un par de calibres propuestos y la cantidad necesaria en metros es determinada según la configuración de distribución de los aerogeneradores y las distancias que separan a cada una de las máquinas.

Finalmente el análisis económico se desarrolla desde el punto de vista el retorno de la inversión tomando en consideración los gastos correspondientes al desarrollo del proyecto puesto que para este caso no se utilizó una demanda de energía específica como parámetro de estudio para este punto. Así mismo en los anexos se incluyen todos los casos de análisis realizados para el contenido de este trabajo, como diagramas y tablas de resultados y aunque se emplearon para ciertas graficas generar códigos abiertos de programación, éstos no se incluyen debido a que son muy sencillos y no son de gran relevancia.

Índice general

Acerca de los autores	vi
Contenido	viii
Prefacio	ix
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xvii
Acrónimos	xx
Nomenclatura	xxiii
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Ubicación del emplazamiento	3
1.2.1. Descripción del emplazamiento	3
1.2.2. Dimensiones del proyecto	4
1.2.3. Vías de acceso	5
1.2.4. Líneas de transmisión eléctrica	6
2. Análisis del recurso eólico	8
2.1. Parámetros de medición	8
2.1.1. Funciones de densidad de probabilidad	9
2.1.2. Funciones de distribución acumulada	9
2.1.3. Distribución de Weibull	10
2.1.4. Perfil logarítmico	10
2.1.5. Perfil exponencial	10
2.1.6. Rosa de los vientos	11
2.1.7. Potencia eólica disponible	12
2.2. Equipos de medición de una estación anemométrica	12
2.2.1. Sensores	13
2.2.2. Calibración	16
2.3. Rugosidad y topografía	17
2.4. Evaluación del recurso eólico	19
2.4.1. Evaluación del recurso eólico mediante GWA	19

2.4.2.	Evaluación del recurso eólico mediante ERA-5	22
2.4.3.	Evaluación del recurso eólico datos NASA/ Power data acces viewer	24
2.4.4.	Estación anemométrica ITSAL	25
2.5.	Resultados y conclusiones generales de la evaluación del recurso eólico .	28
2.6.	Conclusiones	28
3.	Selección y distribución de aerogeneradores	30
3.1.	Selección del tipo y clase de aerogenerador	31
3.1.1.	Modelos de aerogenerador a elegir	33
3.2.	Distribución de aerogeneradores	38
3.2.1.	Simulación en WAsP	40
3.2.2.	Conclusiones	46
4.	Infraestructura eléctrica del parque eólico	47
4.1.	Circuitos de aerogeneradores	48
4.2.	Selección de conductores del sistema colector del parque eólico	49
4.2.1.	Cálculo de las pérdidas de potencia en el conductor y caída de tensión	50
4.2.2.	Resultados de cálculos eléctricos del conductor	51
4.3.	Selección de la celda de MT	56
4.3.1.	Esquemas típicos de las celdas utilizadas en los parques eólicos .	56
4.4.	Selección del transformador de potencia	58
4.5.	Selección de protecciones	59
4.5.1.	La función de la protección por relevadores	60
4.5.2.	Protecciones de sobrecorriente, direccional y diferencial	60
4.5.2.1.	Protecciones de sobrecorriente	60
4.5.2.2.	Relevadores direccionales de CA	61
4.5.2.3.	Relevadores diferenciales	62
4.5.3.	Protecciones requeribles para el parque eólico	62
4.6.	Subestación eléctrica	64
4.7.	Resultados de producción anual del parque eólico	65
4.8.	Conclusiones	66
5.	Análisis económico	67
5.1.	Definiciones referentes al análisis económico	67
5.1.1.	Tasa de interés real en México	67
5.1.2.	Costos	68
5.1.3.	Ingresos	69
5.1.4.	Costo total presente neto (NPC)	70
5.1.5.	Valor Actual Neto (VAN)	70
5.2.	Análisis de PML	71
5.3.	Análisis económico del parque eólico	72
5.3.1.	Caso de estudio 2	77
5.3.2.	Caso 3	79
5.3.3.	Caso 4	80
5.4.	Datos de entrada para el software HOMER	81
5.4.1.	Resultados de simulación en HOMER	85
5.4.2.	Resultados generales de simulación para el análisis económico . .	91

6. Conclusiones	92
Anexos	93
A. Gráficos de potencial eólico	93
A.1. GWA	93
A.2. Potencial eólico ERA-5	99
A.3. Evaluación del recurso eólico para NASA/Power data access view	101
A.4. Estación anemométrica ITSAL	102
A.4.1. Perfil diario	104
A.5. Resultados de bases de datos para evaluar el potencial eólico para una altura de 50 m	106
B. Planos del aerogenerador Siemens Gamesa de 5MW	107
B.1. Planos aerogenerador Siemens Gamesa de 5 MW	108
B.1.1. Datos de curva de potencia del aerogenerador Siemens Gamesa SG 5.0-132	110
C. Resultados de simulaciones del WAsP	111
C.1. Simulación de WAsP con datos de la estación anemométrica del ITSAL	111
C.2. Simulación de WAsP con datos anemométricos del GWA	112
C.3. Resultados de algunas simulaciones realizadas con diferentes combinaciones	113
D. Infraestructura eléctrica	115
D.1. Cables MT Viakon	116
D.2. Resultados cálculos eléctricos para calibres de conductores 250 y 350 kcmil	116
D.3. Resultados cálculos eléctricos para calibres de conductores 250 y 350 kcmil (resistividad de cobre a 50°C)	118
D.3.1. Longitud y peso total de los conductores.	119
D.4. Diagrama unifilar de interconexión	120
E. Análisis económico	121
E.0.1. Perfiles diarios de PML mensuales	121
Bibliografía	123

Índice de figuras

1.1.	Zona de emplazamiento, San Pedro Huilotepec. Fuente: Google Earth. . .	3
1.2.	Zona de estudio para la implementación del proyecto.	4
1.3.	Medición del terreno. Fuente: Google Earth.	5
1.4.	Vías de acceso de la zona de emplazamiento. Fuente: Google Earth. . . .	6
1.5.	Diagrama unifilar correspondiente a las subestaciones en Salina Cruz, Oaxaca.	7
1.6.	Distancias entre las subestaciones TEC, SAC, Refinería y el sitio de emplazamiento ubicado en San Pedro Huilotepec, Oaxaca.	7
2.1.	Rosa de vientos.	11
2.2.	Efectos de obstrucción el flujo del aire [3].	13
2.3.	Anemómetros: a) de cazoletas; b) de hélices.	14
2.4.	Veleta, sensor empleado para monitorear la dirección del viento.	14
2.5.	Termómetro empleada para la medición de temperaturas.	15
2.6.	Ejemplo de un Data Logger o Registrador de Datos.	16
2.7.	Anemómetro en el túnel de calibración y el certificado correspondiente. .	16
2.8.	Mapa de rugosidad en el terreno de estudio.	17
2.9.	Mapa de rugosidades con mapa de terreno.	17
2.10.	Mapa de topografía para el terreno seleccionado	18
2.11.	Mapa de rugosidad-topografía.	18
2.12.	Clasificación de la potencia eólica NREL.	19
2.13.	Variación de la velocidad del viento en la zona de medición proporcionada por GWA para la zona de Huilotepec.	20
2.14.	Mapa de velocidades para el terreno de estudio en un radio de 5 km para: a) 10 m; b) 50 m; c) 100 m; d) 150 m y e) 200 m.	21
2.15.	Ubicación de los datos obtenidos por ERA-5.	22
2.16.	Perfil vertical de viento ERA-5.	24
2.17.	Perfil vertical del viento para la base de datos de la NASA.	25
2.18.	Distancia desde la estación anemométrica del ITSAL hasta el sitio de emplazamiento.	26
2.19.	Comportamiento del perfil vertical del viento para una altura de 93 m. . .	27
3.1.	Curva de potencia del aerogenerador Siemens Gamesa SG 5.0-132.	33
3.2.	Curva de potencia del aerogenerador Gamesa G9X-2.0/G90 2 MW.	34
3.3.	Curva de potencia del aerogenerador Vestas V90-2.0.	36
3.4.	Curva de potencia y curva C_T del aerogenerador Siemens Gamesa SG 5.0-132.	37

3.5. Modelado en CAD del aerogenerador Siemens Gamesa SG 5.0-132 desarrollado en Solidworks. Elaboración propia.	37
3.6. Distribución de aerogeneradores recomendada por DWIA [25].	38
3.7. Distribución propuesta. Elaboración propia.	39
3.8. Mapa de rugosidad y topografía tomando en cuenta las zonas de San pedro Huilotepec y el ITSAL.	40
3.9. Segunda configuración de distribución propuesta. Elaboración propia. . .	41
3.10. Distribución de los aerogeneradores en la zona de emplazamiento de acuerdo a las coordenadas mostradas en la Tabla 3.6.	42
3.11. Dirección predominante del viento y pérdidas por efecto estela de la distribución de los aerogeneradores en la zona de emplazamiento de acuerdo a los resultados de la Tabla 3.7.	43
3.12. Distribución de aerogeneradores para la zona de emplazamiento en base a los datos proporcionados por el GWA.	44
3.13. Dirección predominante del viento y pérdidas por efecto estela de la distribución de los aerogeneradores en la zona de emplazamiento de acuerdo a los resultados de la Tabla 3.9.	45
4.1. Circuitos de aerogeneradores propuestos para el parque eólico de Huilotepec, Oaxaca.	48
4.2. Pérdidas de energía en el cable.	55
4.3. Caída de tensión en el cable.	55
4.4. Celdas: a) intermedia 0L+1L+1A, b) final de línea 0L+1A y c) confluencia 0L+2L+1A.	56
4.5. Celdas seleccionadas para el parque eólico: a) intermedia 0L+1L+1A, b) final de línea 0L+1A.	57
4.6. Diagrama unifilar del parque eólico.	57
4.7. Configuración del relé diferencial 87T.	64
4.8. Potencia bruta y neta de producción del parque eólico anualmente.	65
4.9. Energía bruta y neta de producción del parque eólico anualmente.	66
5.1. Tasa de interés real de México. Gráfico realizado con registros del Banco Mundial [56].	68
5.2. PML durante el período del 2020 para el NodoP 02RSC-115 correspondiente a la línea de 115 kV de la Refinería de Salina Cruz, Oaxaca.	71
5.3. Contribución del LCOE a nivel de componentes para el proyecto eólico terrestre de referencia de 2019 de NREL que funciona durante 25 años [62].	73
5.4. Gastos de capital para el proyecto de central eólica de referencia en tierra del NREL [62].	73
5.5. Flujo de caja nominal para el periodo de vida del aerogenerador.	75
5.6. Flujo efectivo acumulado.	76
5.7. Diferencia de flujo de efectivo.	77
5.8. Flujo de caja nominal para el periodo de vida del aerogenerador.	78
5.9. Flujo efectivo acumulado.	78
5.10. Diferencia de flujo de efectivo.	78
5.11. Flujo de caja nominal para el periodo de vida del aerogenerador.	79
5.12. Flujo efectivo acumulado.	79
5.13. Diferencia de flujo de efectivo.	79
5.14. Flujo de caja nominal para el periodo de vida del aerogenerador.	80

5.15. Flujo efectivo acumulado.	80
5.16. Diferencia de flujo de efectivo.	80
5.17. Entorno HOMER.	81
5.18. Sistema HOMER del parque eólico.	82
5.19. Entorno “Wind Turbine Imputt” en HOMER.	82
5.20. Entorno “Create New Wind Turbine” en HOMER.	83
5.21. Costos totales ingresados al programa HOMER.	84
5.22. Datos del recurso eólico importados al programa HOMER.	84
5.23. Datos del los PML importados al programa HOMER.	85
5.24. Resultados de flujo de caja nominal para el primer caso. Fuente: HOMER.	86
5.25. Resultados de flujo de caja acumulativo para el primer caso. Fuente: HOMER.	86
5.26. Resultados de flujo de caja nominal para el segundo caso. Fuente: HOMER.	87
5.27. Resultados de flujo de caja acumulativo para el segundo caso. Fuente: HOMER.	88
5.28. Resultados de flujo de caja nominal para el tercer caso. Fuente: HOMER.	88
5.29. Resultados de flujo de caja acumulativo para el tercer caso. Fuente: HOMER.	89
5.30. Resultados de flujo de caja nominal para el cuarto caso. Fuente: HOMER.	90
5.31. Resultados de flujo de caja acumulativo para el cuarto caso. Fuente: HOMER.	90
A.1. Rosa de vientos: a) frecuencias; b) potencia y c) velocidades.	93
A.2. Frecuencias de velocidades del viento promedio mensuales durante el 1979-2020.	99
A.3. Rosa de los vientos calculada para el periodo de 1979-2020.	99
A.4. Rosa de frecuencias de energía para el periodo de 1979-2020.	100
A.5. Distribución de Weibull del viento promedio durante el periodo de 1979-2020.	100
A.6. Frecuencias de velocidades del viento promedio a una altura de 93 m . . .	101
A.7. Distribución de Weibull.	101
A.8. Frecuencias de velocidades del viento promedio en el ITSAL.	102
A.9. Rosa de energía predominante en el ITSAL.	102
A.10. Rosa de vientos ITSAL.	103
A.11. Distribución de Weibull del viento promedio en la zona del ITSAL. . . .	103
A.12. Perfiles de viento dirunos obtenidos por la estación anemométrica del ITSAL (enero-agosto).	104
A.13. Perfiles de viento dirunos obtenidos por la estación anemométrica del ITSAL (septiembre-diciembre).	105
B.1. Modelado en CAD del aerogenerador Siemens Gamesa (SG 5.0-132). . .	107
B.2. Plano del modelo cad del aerogenerador Siemens Gamesa.	108
B.3. Plano del perfil aerodinámico del aerogenerador Siemens Gamesa 5 MW. . .	109
C.1. La dirección predominante del viento se encuentra hacia el norte en la zona de San Pedro Huilotepec, Oaxaca de acuerdo a la distribución utilizando los datos de la estación anemométrica del ITSAL.	111
C.2. Dirección de la velocidad predominante del viento y densidad de potencia en cada uno de los aerogeneradores en el sitio de emplazamiento.	112

D.1. Distribución e interconexión de aerogeneradores	115
D.2. Tabla de cables Media Tensión XLPE-35 kV [33].	116
D.3. Distribución e interconexión de aerogeneradores	120
E.1. Perfiles de precios marginales locales mensuales (Enero-Agosto).	121
E.2. Perfiles de precios marginales locales mensuales (Septiembre-Diciembre).	122

Índice de tablas

1.1. Coordenadas en estudio en la zona de emplazamiento.	4
2.1. Valores de α para diferentes clases de terreno	11
2.2. Resultados obtenidos por GWA en WAsP.	20
2.3. Densidad de potencia y velocidades a todas las alturas proporcionadas por GWA.	21
2.4. Parámetros de Weibull obtenidos por WAsP para los datos de GWA a 5 alturas con 5 clases de rugosidad.	22
2.5. Parámetros de Weibull para una altura de 93 m, datos proporcionados por ERA-5.	23
2.6. Parámetros de Weibull para una altura de 93 m, datos proporcionados por NASA.	24
2.7. Parámetros de Weibull para una altura de 93 m, datos proporcionados por la estación anemométrica del ITSAL.	27
2.8. Resumen de resultados de las diferentes bases de datos para la evaluación del recurso eólico de la zona de San Pedro Huilotepec, Oaxaca. para una altura de 93 m.	28
2.9. Resumen de resultados de las diferentes bases de datos para la evaluación del recurso eólico de la zona de San Pedro Huilotepec, Oaxaca. para una altura de 50 m.	29
3.1. Clases de aerogeneradores según la IEC-61400-2 [9].	30
3.2. Especificaciones técnicas del aerogenerador Siemens Gamesa SG 5.0-132 de 5 MW [14].	34
3.3. Especificaciones técnicas del aerogenerador Gamesa G9X-2.0/G90 de 2.0 MW [15].	35
3.4. Especificaciones técnicas del aerogenerador Vestas V90-2.0 de 2.0 MW [16].	36
3.5. Coordenadas para la distribución de los aerogeneradores.	39
3.6. Coordenadas para la distribución de los aerogeneradores empleada con la base de datos del ITSAL.	41
3.7. Resultados de la distribución de los aerogeneradores empleada con la base de datos del ITSAL.	42
3.8. Resumen de datos de la distribución de los aerogeneradores empleada con la base de datos del ITSAL.	43
3.9. Resultados obtenidos para la distribución de aerogeneradores mediante la base de datos GWA y la configuración de la Tabla 3.5.	44

3.10. Resumen de datos de la distribución de los aerogeneradores empleada con la base de datos del GWA.	45
4.1. Ubicación de la subestación eléctrica del parque eólico.	49
4.2. Especificaciones de cables seleccionados.	52
4.3. Características eléctricas de cable de media tensión 35 kV.	52
4.4. Resultados de cálculos eléctricos y pérdidas para los circuitos C1 y C2 empleando conductores 4/0 AWG y 300 kcmil.	52
4.5. Resultados de cálculos eléctricos y pérdidas para los circuitos C1 y C2 empleando conductores 4/0 AWG y 300 kcmil con resistividad de cobre a 50°C.	53
4.6. Pérdidas totales por conductores 4/0 AWG y 300 kcmil.	54
4.7. Pérdidas totales por conductores 4/0 AWG y 300 kcmil (resistividad de conductor a 50°C).	54
4.8. Peso y longitud total de los conductores seleccionados.	54
4.9. Características técnicas y eléctricas de la celda seleccionada [41].	58
4.10. Especificaciones del transformador seleccionado [47].	59
5.1. Costos de financiamiento del proyecto del parque eólico de San Pedro Huilotepec, Oaxaca.	74
5.2. Casos de estudio.	75
5.3. Flujo de efectivo nominal.	76
5.4. Flujo de efectivo nominal	77
5.5. Casos de estudio.	85
5.6. Resultados de simulación para el primer caso con HOMER.	86
5.7. Resultados de simulación para el segundo caso con HOMER.	87
5.8. Resultados de simulación para el tercer caso con HOMER.	89
5.9. Resultados de simulación para el cuarto caso con HOMER.	89
5.10. Comparación de resultados para los casos evaluados	91
A.1. Propiedades de la distribución Weibull a 10 metros de altura para rugosidad: a) clase 0; b) clase I; c) clase II; d) clase III y e) clase IV.	94
A.2. Propiedades de la distribución Weibull a 50 metros de altura para rugosidad: a) clase 0; b) clase I; c) clase II; d) clase III y e) clase IV.	95
A.3. Propiedades de la distribución Weibull a 100 metros de altura para rugosidad: a) clase 0; b) clase I; c) clase II; d) clase III y e) clase IV.	96
A.4. Propiedades de la distribución Weibull a 150 metros de altura para rugosidad: a) clase 0; b) clase I; c) clase II; d) clase III y e) clase IV.	97
A.5. Propiedades de la distribución Weibull a 200 metros de altura para rugosidad: a) clase 0; b) clase I; c) clase II; d) clase III y e) clase IV.	98
A.6. Parámetros de Weibull para una altura de 50 m, datos proporcionados por NASA Power Data.	106
A.7. Parámetros de Weibull para una altura de 50 m, datos proporcionados por ERA-5	106
A.8. Parámetros de Weibull para una altura de 50 m, datos proporcionados por la estación anemométrica ITSAL	106
B.1. Datos de potencia eléctrica en kW del aerogenerador Siemens Gamesa SG 5.0-132	110

C.1. Resultados obtenidos para la distribución de aerogeneradores mediante la base de datos de la estación anemométrica del ITSAL y la configuración de la Tabla 3.5.	113
C.2. Resumen de datos de la distribución de los aerogeneradores empleada con la base de datos de la estación anemométrica del ITSAL y la configuración de la Tabla 3.5.	113
C.3. Coordenadas para la distribución de los aerogeneradores empleada con la base de datos del ITSAL, brindando como resultado una pérdida por efecto estela de 6.35 %.	113
C.4. Resultados obtenidos para la distribución de aerogeneradores mediante la base de datos de la estación anemométrica del ITSAL y la configuración de la Tabla C.3.	114
C.5. Resumen de datos de la distribución de los aerogeneradores empleada con la base de datos de la estación anemométrica del ITSAL y la configuración de la Tabla C.3.	114
D.1. Resultados de cálculos eléctricos y pérdidas para los circuitos C1 y C2 empleando conductores 4/0 AWG y 250 kcmil.	116
D.2. Resultados de cálculos eléctricos y pérdidas para los circuitos C1 y C2 empleando conductores 4/0 AWG y 350 kcmil.	117
D.3. Pérdidas totales por conductores 4/0 AWG y 250 kcmil.	117
D.4. Pérdidas totales por conductores 4/0 AWG y 350 kcmil.	117
D.5. Resultados de cálculos eléctricos y pérdidas para los circuitos C1 y C2 empleando conductores 4/0 AWG y 250 kcmil con resistividad a 50°C. . .	118
D.6. Resultados de cálculos eléctricos y pérdidas para los circuitos C1 y C2 empleando conductores 4/0 AWG y 350 kcmil con resistividad a 50°C. . .	118
D.7. Pérdidas totales por conductores 4/0 AWG y 250 kcmil con resistividad de cobre a 50°C.	118
D.8. Pérdidas totales por conductores 4/0 AWG y 350 kcmil con resistividad de cobre a 50°C.	119
D.9. Longitud y peso total de conductores 4/0 AWG y 250 kcmil.	119
D.10. Longitud y peso total de conductores 4/0 AWG y 350 kcmil.	119

Acrónimos

AICA	Área Importante para la Conservación de las Aves.
EIA	Evaluación del Impacto Ambiental.
CENACE	Centro Nacional de Control de Energía.
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas.
INEEL	Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.
ENRE	Ente Nacional Regulador de la Electricidad.
SE	Subestación Eléctrica
STC	Subestación de Transformación Central
AT	Alta Tensión.
MT	Media Tensión.
BT	Baja Tensión.
MBT	Muy Baja Tensión.
CA	Corriente Alterna.
CD	Corriente Directa.
KV	Kilo Volts.
KVA	Kilo Volts Ampere.
MW	MegaWatts.
FDP	Función de Densidad de Probabilidad.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional.

GWA	Atlas Eólico Mundial.
WAsP	Programa de Análisis y Aplicación del Atlas Eólico.
NASA POWER	Predicción de la NASA de los recursos energéticos mundiales.
ITSAL	Instituto Tecnológico de Salina Cruz.
MMC	Método de Mínimos Cuadrados.
MMP	Método de Máxima Probabilidad.
PAE	Producción Anual de Energía
WPD	Densidad de Potencia disponible en el Viento
DFIG	Generador de Inducción Doblemente Alimentado.
DWIA	Asociación Danesa de la Industria Eólica.
IGBT	Transistor Bipolar de Puerta Aislada.
PML	Precios Marginales Locales.
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
TP	Transformador de Potencia.
TC	Transformador de Corriente.
MVA	Megavolt Ampere.
NOM	Norma Oficial Mexicana.
XLPE	Material Sintético de Polietileno Reticulado.
EPR	Material Sintético de Etilenopropileno.
IACS	International Annealed Copper Standard.
AWG	Calibre de Alambre Americano.
Kcmil	Mil milésimas circulares.
ONAN	Sistema de Ventilación de Aire Natural.
ONAF	Sistema de Ventilación de Aire Forzado.

COE	Costo nivelado de la energía.
NPC	Costo Presente Neto.
SIG	Sistema de Información Geográfico.

Nomenclatura

V_{prom}	Velocidad promedio del viento (m/s).
V_{ref}	Velocidad del viento a una altura de referencia (m/s).
v_{hub}	Velocidad del viento a la altura del buje (m/s).
z_2	Altura de extrapolación (m).
z_{ref}	Altura de referencia (m).
z_0	Rugosidad del emplazamiento (m).
α	Exponente de Hellman.
σ	Desviación estándar.
$f(v)$	Función de densidad (%).
c	Parámetro de escala (m/s).
k	Parámetro de forma.
n	Número de observaciones realizadas.
E_c	Energía cinética (J).
A	Área de barrido (m^2).
ρ	Densidad del aire (kg/m^3).
\dot{m}	Flujo másico (kgm/s).
P_d	Potencia eólica disponible (kW).
C_P	Coefficiente de potencia (%).
I_n	Corriente nominal (A).
P_n	Potencia nominal (W).
V_n	Caída de tensión nominal (V).
P_{cu}	Pérdida de potencia eléctrica (kW).
N_{ph}	Número de fases.

$R_{nconductor}$ Resistencia del conductor por longitud (Ω/km).

ΔV Caída de tensión (V).

$\Delta V(\%)$ Caída de tensión en %.

ρ_T Resistividad del conductor a una temperatura T (Ωm).

α_c Coeficiente de temperatura del conductor ($1/^\circ C$).

T Temperatura ($^\circ C$).

Capítulo 1

Introducción

La evolución en la generación de energía eléctrica en el país se hace presente cuando la demanda nacional busca además de modernizar e incrementar la infraestructura creciente, diversificar las opciones de generación de energía al adoptar e instalar centrales con nuevas tecnologías, así como las modalidades de inversión y operación para la generación de electricidad.

Los atractivos para el aprovechamiento de la energía eólica en la región del Istmo de Tehuantepec son los siguientes: el desarrollo se encuentra a nivel de tierra, evitando los altos costos que implica instalar aerogeneradores dentro del mar o en la cima de las montañas; la cantidad de horas al año con vientos; la dirección del viento es sensiblemente fija, una temporada larga de Norte a Sur y una temporada corta de Sur a Norte; clase de viento considerado como excelente por los expertos. La región del Istmo de Tehuantepec se localiza al sureste de la República Mexicana, siendo la porción más angosta del país. En esta parte, el Océano Pacífico y el Golfo de México están separados por sólo 215 kilómetros. La región está conformada por los distritos de Juchitán y Tehuantepec y colinda, al Norte, con el istmo veracruzano; al Sur con el Océano Pacífico; al Oeste con la Sierra Juárez y con la Sierra Madre del Sur, y al Este con el estado de Chiapas.

En el presente proyecto se pretende realizar el diseño de un parque eólico bajo la modalidad de Obra Pública Financiada (OPF) en la zona de San Pedro Huilotepec, Oaxaca, México, donde previamente se realizará el estudio eólico de la zona tomando en cuenta el impacto ambiental, mostrando de igual manera el desarrollo de planeación del mismo bajo aspectos estructurales y de viabilidad económica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Realizar la planeación y diseño del parque eólico en San Pedro Huilotepec con capacidad de 50 MW bajo la modalidad de Obra Pública Financiada (OPF).

1.1.2 Objetivos específicos

- Analizar mediante distintas bases de datos diversos parámetros para la evaluación del recurso eólico en la zona de San Pedro Huilotepec, Oaxaca.
- Seleccionar el sitio de emplazamiento de estudio en base a las características climáticas de la zona, inspeccionando la orografía y rugosidad, así como puntos de acceso y líneas de transmisión eléctrica.
- Realizar el análisis del recurso eólico y la estimación de producción de energía del parque eólico.
- Realizar un análisis técnico de los equipos e infraestructura que se propone utilizar para la operación del parque.
- Realizar el estudio económico y de viabilidad del proyecto.

1.2 Ubicación del emplazamiento

San Pedro Huilotepec, es un municipio que se encuentra en la región del Istmo de Tehuantepec, a una altura de 20 m sobre el nivel del mar. La superficie total del municipio es de 18.71 km^2 , se localiza en las coordenadas $16^\circ 15' 21.32''$ hacia el Norte y $95^\circ 7' 47.68''$ al Oeste.

El sitio de emplazamiento limita al norte con los municipios de Juchitán de Zaragoza y San Blas Atempa; al sur con los municipios de Salina Cruz y San Mateo del Mar; al oriente con los municipios de Santo Domingo Tehuantepec, San Blas Atempa y Salina Cruz; al poniente con el municipio de San Mateo del Mar.



Figura 1.1: Zona de emplazamiento, San Pedro Huilotepec. Fuente: Google Earth.

1.2.1 Descripción del emplazamiento

Para ubicar con mayor precisión la ubicación del emplazamiento, en este caso sus coordenadas del sector, es necesario utilizar el programa de uso libre Google Earth, que es un programa informático que muestra un globo terráqueo virtual que permite visualizar múltiple cartografía, basado en imágenes satelitales. El mapa de Google Earth está compuesto por una superposición de imágenes obtenidas por imágenes satelitales, fotografías aéreas, información geográfica proveniente de modelos de datos SIG (Sistema de Información Geográfico) de todo el mundo y modelos creados por computadora.

Primeramente, se toma en cuenta la ubicación del sitio de emplazamiento $16^\circ 15' 21.80''$ hacia el Norte y $95^\circ 7' 46.18''$ al Oeste.

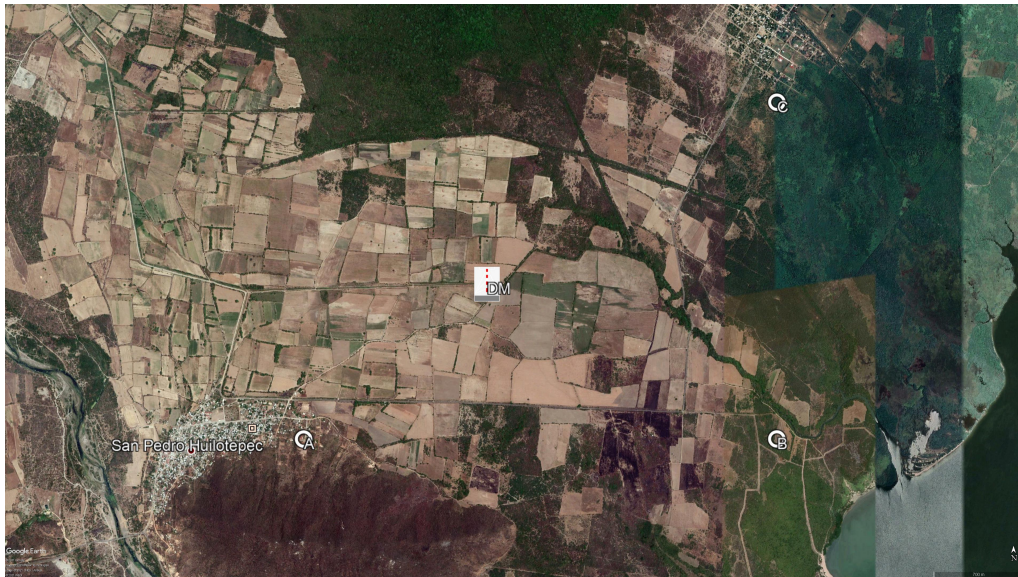


Figura 1.2: Zona de estudio para la implementación del proyecto.

La zona de estudio del proyecto será la que esté determinada por los tres puntos circundantes al sitio de emplazamiento (puntos A, B y C). Los cuales cuentan con las siguientes coordenadas:

Tabla 1.1: Coordenadas en estudio en la zona de emplazamiento.

Punto A	16°14'42.06" N
	95°8'33.50" O
Punto B	16°14'42.06" N
	95°6'35.45" O
Punto C	16°16'2.60" N
	95°6'35.45" O

1.2.2 Dimensiones del proyecto

1. Superficie total: Se pretende abarcar un área de 11, 261. 011 m^2 , con un perímetro aproximado de 13.9 km.

2. Superficie a afectar: 11, 261. 011 m^2 , que corresponde a zonas de cultivo y pastizal y pertenecientes a ejidales.

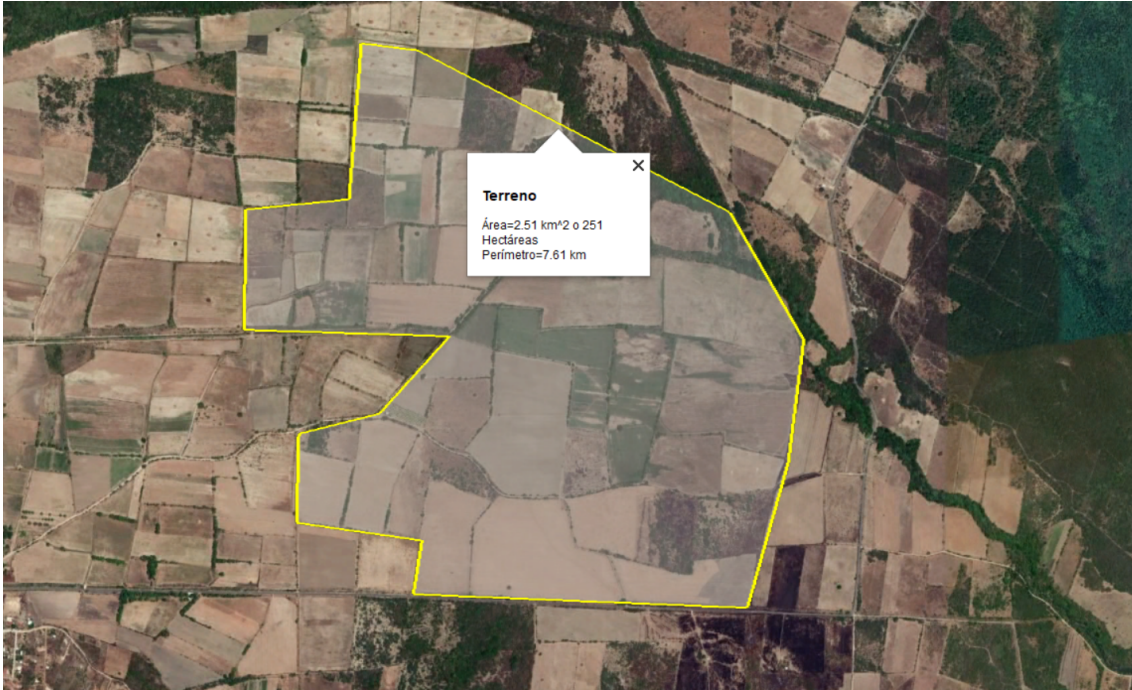


Figura 1.3: Medición del terreno. Fuente: Google Earth.

1.2.3 Vías de acceso

La ubicación de un proyecto para el sector eólico se basa en muchas cuestiones técnicas y políticas. Los sitios se seleccionan por las fuerzas disponibles de viento, distribución de energía, y las cuestiones de arrendamiento de tierras, pero no con condiciones de favorables de tierras para los caminos de acceso. Por ello es de vital importancia conocer las rutas de traslados de todos los equipos y herramientas que serán utilizados para la instalación y posteriormente para cuando se requiera mantenimiento.

En el caso del proyecto del parque eólico en la zona de Huilotepec, se contempla que es una zona en donde la mayoría de su terreno es destinado al cultivo y pastizal; por lo cual, se tienen que planear estrategias para rutas de acceso como se muestran en la figura 1.4.

Se tendrán en cuenta dos posibles vías de acceso carretero:

- Vía de acceso carretero 1: Donde la ruta para el acceso carretero proviene desde San Pedro Huilotepec y San José del Palmar hasta San Antonio Monterrey para después tomar trayectoria hacia la carretera Transísmica, en esta vía de acceso se contempla una distancia aproximada de 11 km.
- Vía de acceso carretero 2: Se contempla como la ruta más transitable, ya que los pobladores del sitio la frecuentan. La ruta empieza desde San Pedro Huilotepec, accediendo hacia la avenida concurrida llamada “Av. Oleoducto” puesto que es cercana a la refinera “Ing. Antonio Dovalí Jaime” ubicada en la ciudad y puerto de

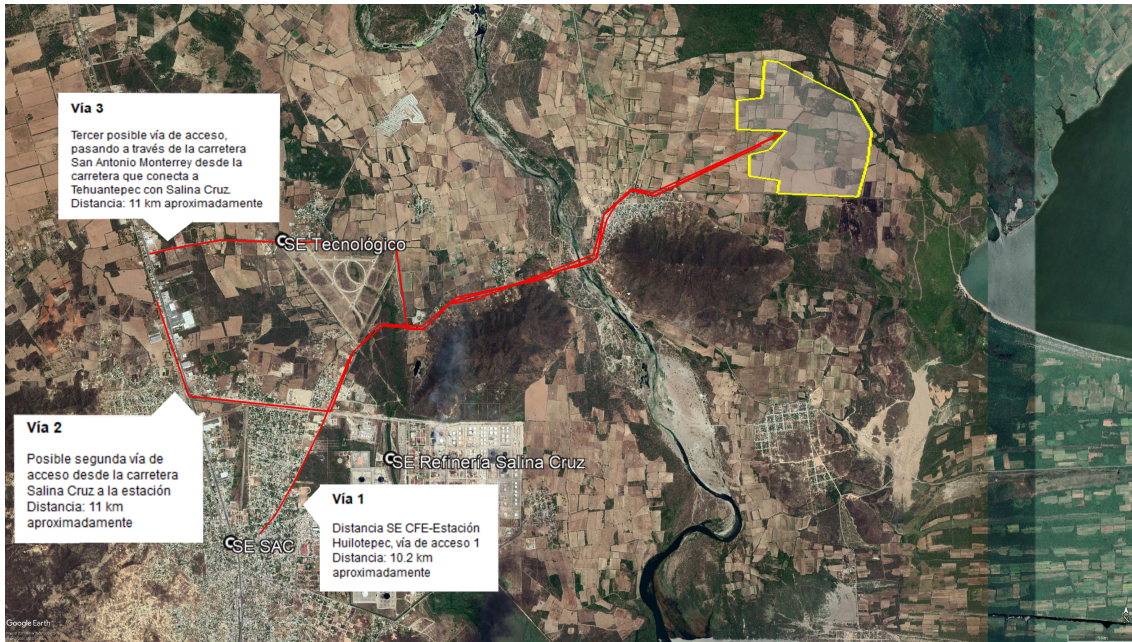


Figura 1.4: Vías de acceso de la zona de emplazamiento. Fuente: Google Earth.

Salina Cruz, Oaxaca; finalizando hacia la carretera Transísmica. En esta vía de acceso se contempla una distancia aproximada de 10.2 km.

1.2.4 Líneas de transmisión eléctrica

Para la selección de la línea de transmisión que conectará el diseño del parque eólico deberán considerar aquellas subestaciones que se encuentren en las cercanías de los alrededores del terreno de estudio. Para este caso de acuerdo a las coordenadas que corresponden al sitio de San Pedro Huilotepec, Oaxaca, existen tres subestaciones en los alrededores, los cuales son:

- Salina Cruz (SAC), NodoP 02SAC-115
- Tecnológico (TEC), NodoP 02TNL-115
- Refinería Salina Cruz, NodoP 02RSC-115 [10]

Estas responden a líneas de 115 kV y se encuentran situadas en la parte Oriental. Identificando la zona de Salina Cruz Oaxaca, se muestra parte del diagrama unifilar de la región del Istmo en la figura 1.5.

En relación al diagrama unifilar de esta figura, se aprecia que efectivamente el sistema corresponde a líneas de 115 kV, se aprecian los alimentadores correspondientes a cada subestación y para la central de la refinería, en esta última se encuentran dos transformadores de 20 MVA, en la subestación TEC se cuenta con un transformador de distribución de 20 MVA a 13.8 kV. En Salina Cruz el transformador de distribución responde a 9.4 MVA que posterior a la barra de 115 kV se encuentra un capacitor a 12 MVAR.

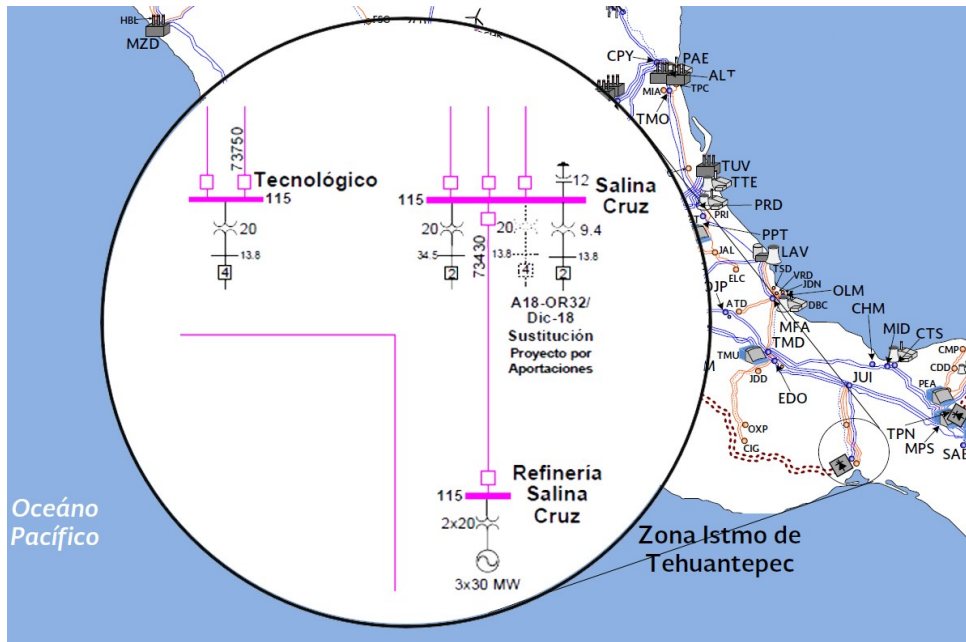


Figura 1.5: Diagrama unifilar correspondiente a las subestaciones en Salina Cruz, Oaxaca.

En la figura 1.6 se muestran las ubicaciones de las subestaciones en Google Earth y la distancia correspondiente a cada una desde su punto de ubicación hasta la ubicación del terreno de estudio.

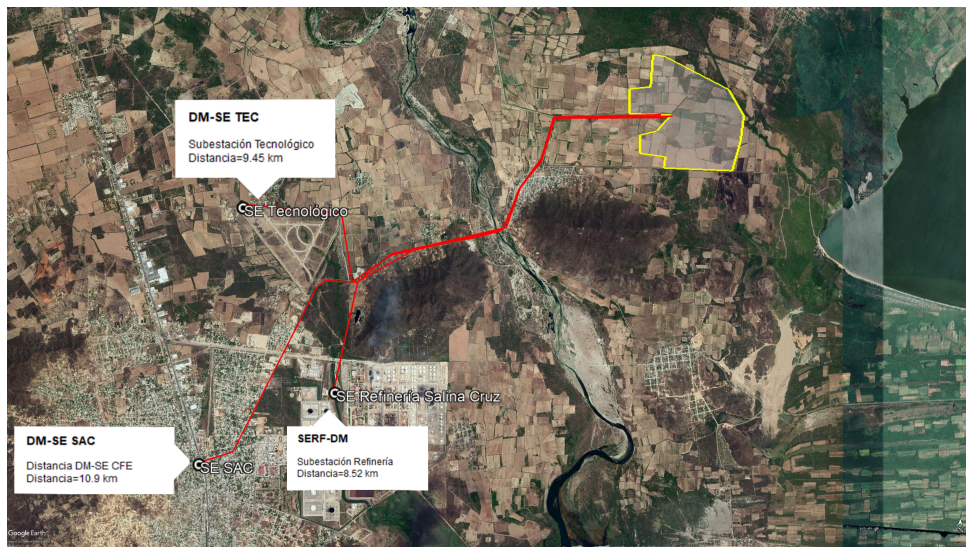


Figura 1.6: Distancias entre las subestaciones TEC, SAC, Refinería y el sitio de emplazamiento ubicado en San Pedro Huilotepec, Oaxaca.

A grandes rasgos las distancias indican que la subestación más cercana es la central eléctrica de la refinería de Salina Cruz “Ing. Antonio Dovalí Jaime”, esto generando las rutas por trayectorias correspondientes, por otro lado, si se trazasen las distancias únicamente como rectas desde el terreno de estudio hasta cada subestación las distancias serían distintas y por ende, la subestación TEC sería la más cercana.

Diseño y planeación de un parque eólico en la comunidad de San Pedro Huilotepec, Oaxaca

En la presente obra se dan a conocer las fases que conforman el proceso de diseño de los parques eólicos, en este caso específico, se aborda el diseño de un parque de 50 MW para la comunidad de San Pedro Huilotepec, localizada en el estado de Oaxaca México, dentro de la región del Istmo. Las principales etapas abordadas comprenden lo siguiente:

1. Estudio de la zona de emplazamiento.
2. Evaluación del recurso eólico de la zona.
3. Selección y distribución de aerogeneradores.
4. Análisis técnico de equipos e infraestructura eléctrica propuesta para la operación del proyecto.
5. Análisis de pérdidas en conductores eléctricos y estimación de producción anual.
6. Estudio económico y viabilidad del proyecto conforme al retorno de inversión.

Dentro de los anexos se incluyen distintos casos de análisis, por ejemplo, para distintas configuraciones de distribución de los aerogeneradores, se tiene la evaluación de producción y pérdidas, se incluyen los circuitos de distribución de aerogeneradores, análisis de pérdidas para distintos calibres de conductores a distintas temperaturas de operación, datos técnicos y todos los gráficos generados dentro del estudio del recurso eólico.