



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

**Desarrollo de Ingeniería Eléctrica para un
Ciclo Binario Operado con Geotermia**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Guillermo Miguel Rosas Velázquez

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. Rodrigo Alarcón Flores



Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	9
Objetivo General	10
Objetivos Particulares	10
Introducción	11
Resumen.....	12
1 Geotermia.....	14
1.1 La geotermia.....	14
1.1.1 El gradiente geotérmico.....	16
1.1.2 Clasificación de recursos geotérmicos	16
1.2 Generación eléctrica	19
1.2.1 Plantas de vapor seco o contrapresión.....	21
1.2.2 Plantas flash o de vapor húmedo	22
1.2.3 Plantas de ciclo binario convencional	23
1.3 Panorama de la geotermia en el mundo.....	24
1.4 Panorama de la geotermia en México.....	27
1.4.1 Reservas probadas probables y posibles.....	28
1.4.2 Tecnología ORC en México	29
2 Aspectos eléctricos de un ciclo binario ORC	31
2.1 Etapa de generación.....	31
2.1.1 Generadores	33
2.2 Etapa de rectificación	38
2.2.1 Diodos.....	38
2.3 Etapa de regulación	42

2.3.1	Transistor de Efecto de Campo de Metal Óxido Semiconductor	42
2.4	Etapa de inversión	44
2.4.1	Inversor de corriente.....	45
2.5	Etapa de interconexión a la red eléctrica	46
2.5.1	Esquema de interconexión.....	48
2.5.2	Sistema de medición.....	49
2.5.3	Equipo de telemetría.....	49
2.5.4	Dispositivos de desconexión	49
2.5.5	Requisitos técnicos operativos.....	52
2.5.6	Inspección.....	56
2.6	Etapa de almacenamiento	57
2.6.1	Baterías de ácido – plomo	57
3	Desarrollo de ingeniería eléctrica	60
3.1	Ciclo Binario IDEA 10.....	60
3.2	Desarrollo de ingeniería básica.....	61
3.2.1	Diagrama geográfico	62
3.2.2	Diagramas unifilares simplificados	63
3.2.3	Caracterización del generador eléctrico	66
3.2.4	Memoria técnico-descriptiva	83
3.3	Desarrollo de ingeniería de detalle	96
3.3.1	Equipo en campo	97
3.3.2	Panel eléctrico.....	98
3.3.3	Diagramas unifilares detallados.....	99
4	Pruebas operativas	108

4.1	Operación del ciclo binario.....	109
4.1.1	Reconocimiento del sitio y montaje del panel eléctrico	109
4.1.2	Arranque de generadores	111
4.2	Pruebas operativas	112
4.2.1	Prueba de estabilidad del sistema eléctrico	113
4.2.2	Prueba de interrupción.....	117
4.2.3	Prueba operativa de 8 horas.....	118
4.3	Monitoreo del sistema	122
4.4	Prueba de eficiencia en los generadores	125
4.4.1	Prueba de cargas escalonadas	126
4.4.2	Prueba operativa a diferentes rangos de presión	127
4.5	Conclusiones de pruebas operativas	131
5	Código de red.....	133
5.1	Importancia del código de red en México	134
5.2	Estructura para el cumplimiento.....	136
5.2.2	Procedimientos y manuales regulatorios	137
5.2.3	Criterios técnicos	140
5.3	Estudio de calidad de potencia	143
5.4	Estudio de corto circuito y diagrama unifilar	144
5.5	Plan de trabajo y presentación ante la CRE.....	145
6	Conclusiones	147
7	Nomenclatura.....	150
8	Anexos	151
8.1	Anexo 1 (D.U.S. Ciclo binario IDEA 10)	152

8.2	Anexo 2 (D.U.S. Caracterización del generador).....	153
8.3	Anexo 3 (D.U.D. Caracterización del generador)	154
8.4	Anexo 4 (Parámetros de la prueba 1 para la caracterización)	157
8.5	Anexo 5 (Parámetros de la prueba 2 para la caracterización)	159
8.6	Anexo 6 (Parámetros de la prueba 3 para la caracterización)	162
8.7	Anexo 7 (Ficha técnica del inversor de corriente).....	165
8.8	Anexo 8 (Ficha técnica de baterías East Penn Deka Marine Master)	166
8.9	Anexo 9 (D.U.D. Ciclo binario IDEA 10).....	167
8.10	Anexo 10 (D.U.D. Caracterización de generadores en campo).....	169
8.11	Anexo 11 (Prueba de cargas escalonadas al generador N171003)	172
8.12	Anexo 12 (Prueba de cargas escalonadas al generador N171004)	172
8.13	Anexo 13 (Prueba a diferentes rangos de presión al generador N171003).....	173
8.14	Anexo 14 (Prueba a diferentes rangos de presión al generador N171004).....	173
9	Referencias.....	174

Lista de figuras

Figura 1.	<i>Estructura interna de la tierra.</i>	15
Figura 2.	<i>Diagrama de Lindal.</i>	18
Figura 3.	<i>Uso en cascada de la geotermia</i>	19
Figura 4.	<i>Planta de Vapor Seco</i>	21
Figura 5.	<i>Planta Flash.</i>	22
Figura 6.	<i>Planta de ciclo binario</i>	23
Figura 7.	<i>Usos de la geotermia en el mundo</i>	25
Figura 8.	<i>Zonas geotérmicas de México.</i>	29
Figura 9.	<i>Sistema eléctrico de un Ciclo Binario</i>	31
Figura 10.	<i>Estructura interna de un generador síncrono.</i>	34
Figura 11.	<i>Estructura interna de un generador asíncrono.</i>	35

Figura 12. Escobillas de grafito	36
Figura 13. Circuito eléctrico entre la fuente eléctrica CA y el bobinado	37
Figura 14. El Diodo.....	38
Figura 15. Polarización directa e inversa del diodo.....	39
Figura 16. Circuito rectificador de media onda.....	40
Figura 17. Circuito rectificador de onda completa.....	40
Figura 18. Filtro de circuito rectificador.....	41
Figura 19. Corriente rectificada CA - CD.....	42
Figura 20. MOSFET de canal N.....	43
Figura 21. MOSFET de canal P.....	43
Figura 22. MOSFET de canal N en saturación.....	44
Figura 23. Tipos de ondas	45
Figura 24. Modulación SPWM.....	46
Figura 25. Central eléctrica tipo BT	48
Figura 26. Batería en carga	58
Figura 27. Batería en descarga	59
Figura 28. Ciclo Binario IDEA 10	60
Figura 29. Ubicación de Central Geotérmica Domo San Pedro	62
Figura 30. Diagrama Geográfico.....	63
Figura 31. Diagrama Unifilar Simplificado del Sistema Eléctrico	64
Figura 32. Diagrama Unifilar Simplificado de la Caracterización del Generador.....	66
Figura 33. Pruebas de caracterización	67
Figura 34. Generador Turnigy Rotomax 150 CC.....	68
Figura 35. Resistencias en conexión delta	69
Figura 36. Diagrama Unifilar Detallado de la Caracterización	71
Figura 37. Diagrama Unifilar Detallado de la Caracterización - 12 Deltas	72
Figura 38. Diagrama Unifilar Detallado de la Caracterización - 9 Deltas	72
Figura 39. Prueba 1 a 20Hz.....	74
Figura 40. Prueba 1 a 40Hz.....	74
Figura 41. Prueba 1 a 60Hz.....	75

Figura 42. <i>Prueba 1 a 80Hz</i>	75
Figura 43. <i>Prueba 2 a 20Hz</i>	76
Figura 44. <i>Prueba 2 a 40Hz</i>	76
Figura 45. <i>Prueba 2 a 60Hz</i>	77
Figura 46. <i>Prueba 2 a 80Hz</i>	77
Figura 47. <i>Prueba 3 a 20Hz</i>	78
Figura 48. <i>Prueba 3 a 40Hz</i>	79
Figura 49. <i>Prueba 3 a 60Hz</i>	79
Figura 50. <i>Prueba 3 a 70Hz</i>	80
Figura 51. <i>Gráfico de eficiencias del generador</i>	82
Figura 52. <i>Relación de potencias</i>	83
Figura 53. <i>Inversor de corriente GROWATT SPF 6000T DVM</i>	84
Figura 54. <i>Rectificador de corriente seleccionado</i>	86
Figura 55. <i>Elevador de voltaje Step Up</i>	87
Figura 56. <i>Placa de elevadores de voltaje</i>	88
Figura 57. <i>Arreglo de baterías</i>	89
Figura 58. <i>Proceso de instalación de tierra</i>	96
Figura 59. <i>Panel eléctrico</i>	99
Figura 60. <i>Superficie en metros cuadrados del panel eléctrico</i>	100
Figura 61. <i>Centro de carga con visualización de parámetros</i>	101
Figura 62. <i>Diagrama Unifilar Detallado del Ciclo Binario Parte 1</i>	102
Figura 63. <i>Diagrama Unifilar Detallado del Ciclo Binario Parte 2</i>	103
Figura 64. <i>Superficie en metros cuadrados del Banco de Caracterización</i>	104
Figura 65. <i>Centro de carga con visualización de parámetros – 12 deltas</i>	105
Figura 66. <i>Centro de carga con visualización de parámetros - 9 deltas</i>	106
Figura 67. <i>Diagrama Unifilar Detallado de la Caracterización en Campo</i>	107
Figura 68. <i>Pruebas operativas del Ciclo Binario IDEA 10</i>	108
Figura 69. <i>Operación del sistema geotérmico</i>	109
Figura 70. <i>Montaje del panel eléctrico</i>	110
Figura 71. <i>Programación del inversor para su operación con dos fuentes de demanda</i> ..	111

Figura 72. Ajuste de los elevadores de voltaje	113
Figura 73. Reemplazo del generador N171005	114
Figura 74. Toma de tensiones en vacío de los generadores	115
Figura 75. Demanda de 2kWe usando luminarias	116
Figura 76. Prueba de interrupción.....	117
Figura 77. Demanda de 5kWe al sistema eléctrico	118
Figura 78. Grafica de pruebas operativas de 8 horas.....	120
Figura 79. Demanda proporcionada por luminarias	121
Figura 80. Monitoreo mediante Software Growatt	123
Figura 81. Recarga de baterías	124
Figura 82. Recarga de baterías al 100% de su capacidad.....	125
Figura 83. Pruebas de eficiencia de generadores en campo.....	126
Figura 84. Comparativa de potencias al generador N171003	127
Figura 85. Comparativa de potencias al generador N171004.....	127
Figura 86. Prueba operativa a diferentes rangos de presión.....	129
Figura 87. Aumento gradual de presión en la bomba para el generador N171003	130
Figura 88. Aumento gradual de presión en la bomba para el generador N171004	130
Figura 89. Comportamiento de los generadores a 6300We con 10bar en bomba.....	131
Figura 90. Temas incluidos en el código de red.....	135
Figura 91. Sistema Eléctrico Nacional.....	136
Figura 92. Analizador de calidad de onda Nexus 1500	144
Figura 93. Diagrama Unifilar en ETAP	145
Figura 94. Diseño comercial IDEA 10.....	149

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Potencias en energía geotérmica eléctrica instalada y generada (2015-2020, 2025)</i>	26
Tabla 2. <i>Plantas geotérmicas en México</i>	27
Tabla 3. <i>Centrales eléctricas y sus áreas síncronas</i>	47
Tabla 4. <i>Cables eléctricos y sus características</i>	51
Tabla 5. <i>Distorsión armónica máxima de corriente en porcentaje de la corriente nominal de la Central Eléctrica</i>	53
Tabla 6. <i>Protecciones básicas</i>	53
Tabla 7. <i>Tiempo de respuesta a frecuencias anormales en el Punto de interconexión</i>	55
Tabla 8. <i>Pruebas operativas de la Central Eléctrica</i>	57
Tabla 9. <i>Requisitos operativos para el funcionamiento del inversor</i>	84
Tabla 10. <i>Coordinación de protecciones y conductores principales</i>	91
Tabla 11. <i>Coordinación de protecciones y conductores secundarios</i>	93
Tabla 12. <i>Coordinación de protecciones y conductores del centro de carga</i>	94
Tabla 13. <i>Toma de tensiones del generador N171005</i>	114
Tabla 14. <i>Toma de tensiones en vacío de los generadores</i>	115
Tabla 15. <i>Parámetros de los generadores con carga</i>	116
Tabla 16. <i>Toma de parámetros al sistema eléctrico con 500W de carga</i>	119
Tabla 17. <i>Parámetros de pruebas de 8 horas a 5kW</i>	120
Tabla 18. <i>Comparativa de tensión y corriente de N171003 para determinar velocidades</i>	122
Tabla 19. <i>Comparativa de tensión y corriente de N171004 para determinar velocidades</i>	122
Tabla 20. <i>Entrega de potencia en los generadores</i>	132
Tabla 21. <i>Código de red alrededor del mundo</i>	134
Tabla 22. <i>Procedimientos</i>	138
Tabla 23. <i>Manuales regulatorios</i>	139
Tabla 24. <i>Requerimientos aplicables a los centros de carga</i>	140
Tabla 25. <i>Estudios de calidad de potencia para media y alta tensión</i>	143

Agradecimientos

A mi familia, por apoyarme en todo momento, a mi madre Patricia por siempre escucharme y darme todo el amor que se le puede dar a un hijo, a mi padre Juan por su confianza y formarme como un hombre de buenos valores, a mis hermanos Rolando y Sonia por su apoyo en mi vida personal y académica siendo los dos un ejemplo a seguir y a mi amigo fiel Ody.

A mis amigos, profesores y todas aquellas personas que he conocido y han dejado una marca en mi vida.

Al CeMIE-Geo y Grupo iiDEA proyecto PA-04-1124 "Desarrollo a nivel TRL9 de un Ciclo Binario Modular (CBM) para generación eléctrica de 10kW de potencia operado con geotermia de baja-media entalpía y escalamiento a un CBM de 100kW", por su apoyo en la realización de este proyecto, que fue una enriquecedora y agradable experiencia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y Facultad de Estudios Superiores Aragón por abrirme las puertas, porque mi vida cambio desde que ingrese a la máxima casa de estudios.

Objetivo General

Desarrollar la ingeniería básica y de detalle del sistema eléctrico de un ciclo binario operado con geotermia que permita la operación del sistema aislado, el cual proveerá de energía eléctrica limpia a futuros proyectos de índole geotérmico de Grupo IIDEA de la UNAM, promoviendo la investigación y desarrollo de tecnología mexicana para el desarrollo sostenible de México, prescindiendo así de energía otorgada por fuentes de combustibles fósiles.

Objetivos Particulares

Ampliar el conocimiento de instrumentación eléctrica para sistemas de microgeneración, caracterizando un generador eléctrico y diseñando el panel eléctrico de un sistema de baja potencia.

Realizar un trabajo de investigación que otorgue las bases para el escalamiento de plantas geotérmicas de 100kW y 1MW que llevará a cabo Grupo IIDEA de la UNAM.

Introducción

Los combustibles fósiles han sido las principales fuentes de producción de electricidad en la historia de la humanidad, los cuales contribuyen activamente al calentamiento global y cambio climático, razón por la cual es indispensable que las naciones realicen una transición energética que garantice el acceso a una energía sostenible, segura, moderna y asequible, que permita afrontar la crisis climática y satisfaga las necesidades humanas.

Entre la disponibilidad de las fuentes de energía renovables, una con alto potencial en México para ser explotada es la geotermia, la cual jugará un papel clave para llevar a cabo la anhelada transición energética en el país; para ello es prioritario seguir con investigaciones y desarrollo de tecnologías que permitan explotar esta energía de forma eficiente, por tal motivo, esta investigación tiene la función de desarrollar tecnología mexicana para el aprovechamiento de fuentes residuales de calor en el sector industrial, así como también para la explotación del gran potencial geotérmico de baja entalpía con el que cuenta el país, prescindiendo así de energía otorgada por fuentes de combustibles fósiles; este trabajo será de utilidad para el escalamiento de plantas geotérmicas de 100kW y 1MW que llevará a cabo Grupo IIDEA de la UNAM, además de ampliar el conocimiento de instrumentación eléctrica para sistemas de microgeneración, en el cual se seleccionará, conocerá y predecirá el comportamiento del equipo de generación eléctrica ante diferentes escenarios operativos al someter el sistema a determinadas cargas de potencia.

Resumen

Capítulo 1: Muestra información general referente a la geotermia, así como su clasificación y usos a diferentes niveles de temperatura en baja, media y alta temperatura, seguido de información sobre plantas de vapor seco, flash y ciclo binario para generar energía eléctrica; finalmente este capítulo muestra el panorama de la geotermia en el mundo comparando la energía geotérmica eléctrica instalada y generada de las 10 naciones potencias en geotermia, que para el caso de México se mencionan las plantas instaladas y la cantidad de energía eléctrica generada.

Capítulo 2: Contiene información de los aspectos eléctricos de un ciclo binario, siguiendo la siguiente secuencia: etapa de generación, rectificación, regulación, inversión y almacenamiento, además de información técnica referente a la interconexión de la red; en cada una de estas etapas se describen aspectos muy particulares de los componentes con la finalidad de agrupar la información que mejor explique el sistema.

Capítulo 3: Se presenta el desarrollo de ingeniería básica y de detalle de la investigación; en la ingeniería básica se muestra el diagrama geográfico del proyecto, memorias técnico descriptivas y de cálculo para la selección del equipo en el proyecto, además de diagramas unifilares simplificados para la visualización del panorama en el que se diseñara el panel eléctrico y posteriormente los criterios para la selección del generador eléctrico con su respectiva caracterización en laboratorio, empleando un banco de caracterización con resistencias que brindó la información necesaria para el análisis dinámico del sistema. En la ingeniería de detalle se definen los lineamientos específicos del proyecto, por lo que los diagramas unifilares en este apartado poseen características particulares del desarrollo físico del panel.

Capítulo 4: Este capítulo consta del informe de las pruebas operativas llevadas a cabo en la Planta Geotérmica Domo San Pedro, Nayarit las cuales consistieron en demandar cargas eléctricas, caracterización de los generadores en campo y pruebas de funcionamiento general del sistema eléctrico, en donde se registraron parámetros de voltaje y corriente en distintos puntos del sistema para determinar el comportamiento del sistema eléctrico.

Capítulo 5: El contenido final de esta investigación se centra en el marco legal código de red, que no es aplicable para el proyecto, pero será de vital importancia en los ciclos binarios de

100kW y 1MW que llevará a cabo Grupo IIDEA, por lo que en se explican los procesos a realizar para el cumplimiento de la normativa.



1 Geotermia

1.1 La geotermia

El origen etimológico de la palabra geotermia proviene de dos palabras de origen griego, geos (tierra) y thermos (calor) cuya composición significa el calor de la tierra; el significado de geotermia puede ser usado para referirse a la rama de la geofísica que estudia las condiciones térmicas del interior de la tierra o bien para referirse a los procesos de ingeniería que son llevados a cabo para la explotación de recursos térmicos del interior de la tierra. En la Figura 1 de Santoyo y Torres (2010) se puede observar la estructura interna de la tierra con especificaciones de las capas ubicando sus nombres, composiciones, delimitaciones y las temperaturas a distintas profundidades.

El calor proveniente del interior de la tierra se transmite por medio conducción, convección y radiación que de acuerdo con Prol (2002) estos tres tipos de transmisión de energía tienen un diferente grado de importancia en las distintas capas del planeta: en la corteza la conducción es el medio de transmisión principal del calor, mientras que en el manto la convección y la radiación son los principales mecanismos de transmisión; con la finalidad de comprender mejor un sistema geotérmico a continuación se explicará de manera general estos mecanismos.

La conducción se da por medio de la transferencia de calor por la interacción de la materia, de un cuerpo más caliente a otro más frío. Este mecanismo de transmisión se encuentra presente en la corteza de la tierra, siendo la corteza el cuerpo frío que ha de calentarse y el calor del manto, el cuerpo caliente que ha de transmitir energía térmica.

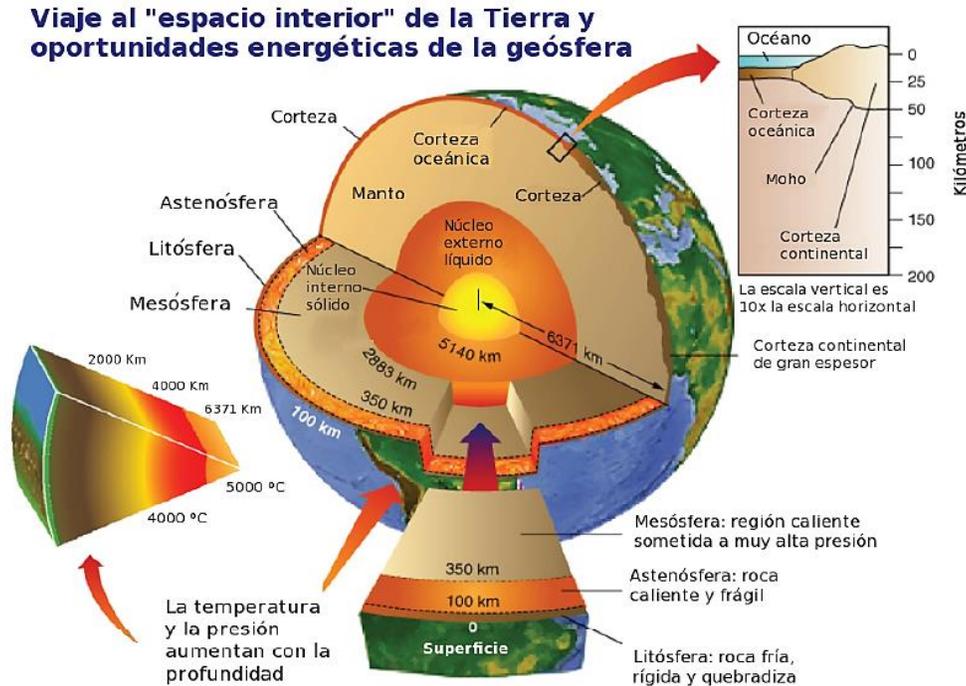
La convección se da en fluidos (líquidos y gases) relacionándose unos con otros o con su mismo tipo de materia, siempre y cuando se encuentren a distintas temperaturas, el transporte del calor por medio del movimiento del fluido se da por corrientes ascendentes y descendentes de forma cíclica. Este mecanismo de transmisión se encuentra presente en el manto y núcleo externo, siendo el manto el fluido caliente que se encuentra en movimiento gracias a los movimientos diferenciales entre el manto y núcleo externo del planeta.

La radiación se da por medio de ondas electromagnéticas generadas por el movimiento térmico que hay en la materia en todos los cuerpos por arriba del cero absoluto (cero grados Kelvin o -273.15°C). Este mecanismo de transmisión se encuentra presente en el núcleo interno y externo los cuales emiten ondas electromagnéticas.

De acuerdo con Llopis y Rodrigo (2008) el origen de la geotermia se debe a 4 hechos.

1. **El calor inicial** que se liberó durante la formación del planeta hace más de 4500 millones de años.
2. **La cristalización del núcleo** que es un proceso que libera calor.
3. **La desintegración de isótopos radiactivos** presentes en la corteza y en el manto terrestre.
4. **Los movimientos diferenciales** entre las diferentes capas que constituyen la tierra, principalmente entre el manto y el núcleo.

Figura 1. Estructura interna de la tierra.



Nota. Adaptado de *Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable*, por Santoyo, E. y Torres, I., 2010, Revista Digital Universitaria, 11(10).

1.1.1 El gradiente geotérmico

Al penetrar en la corteza terrestre de la tierra se observa un cambio en la temperatura que en general aumenta; a esa variación de la temperatura con la profundidad se le llama gradiente geotérmico; en otras palabras, es la variación de la temperatura en función de la profundidad y se expresa en °C/km, cuyo valor varía dependiendo de la zona, de acuerdo con Prol (2002) se han llegado a medir gradientes desde 10°C/km hasta 800°C/km, sin embargo, el promedio en zonas sin anomalías térmicas es de 25 a 35°C/km.

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano, 2017 la potencia geotérmica total que llega desde el interior de la tierra es de $4,2 \times 10^{12}$ J, sin embargo, a pesar de ser una cantidad inmensa de energía solo una fracción de ella puede ser utilizada por la humanidad.

1.1.2 Clasificación de recursos geotérmicos

Para determinar el uso que se le dará a un sistema geotérmico para su aprovechamiento se deberán tomar en cuenta sus características, las cuales son:

- La naturaleza del fluido dominante en la parte del yacimiento (agua, sílice, salmuera, etcétera).
- La concentración de componentes químicos en el fluido dominante.
- La descarga superficial de calor (niveles de calor transportado).
- La entalpía (nivel de temperaturas del sistema geotérmico). (Prol, 2002, p. 50)

Si bien estos 4 puntos son importantes de conocer al momento de querer hacer uso de un sistema geotérmico, lo que determinará principalmente el uso que se le dé, será el nivel de entalpía con el que cuentan, a continuación, se mencionan los 3 niveles en que se clasifican los sistemas geotérmicos según su entalpía.

Los rangos de temperatura en los que se clasifican estos sistemas varían según distintos medios y organizaciones; para este texto se tomaron los datos que proporciona el CEMIEGEO.

1.1.2.1 *Baja entalpía*

Si el gradiente geotérmico o temperatura es menor a 100°C, este tipo de energía se clasifica como baja entalpía y sus usos son principalmente de aprovechamiento directo, esto quiere decir que debido a su “baja temperatura” sus usos se limitarán a aplicaciones térmicas en el sector industrial y residencial como calefacción y refrigeración, esto de acuerdo con el SGM (2017), sin embargo, también tienen uso en la balneología, deshidratación de alimentos, acuicultura, etcétera.

1.1.2.2 *Media entalpía*

Si el gradiente geotérmico o temperatura se encuentra entre los 100°C y 180°C, este tipo de energía se clasifica como media entalpía y su uso principal es para la generación de energía eléctrica de baja demanda usando principalmente plantas de ciclos binarios y de vapor seco, pero también se usa para destilación en proyectos de desalinización de agua de mar.

1.1.2.3 *Alta entalpía*

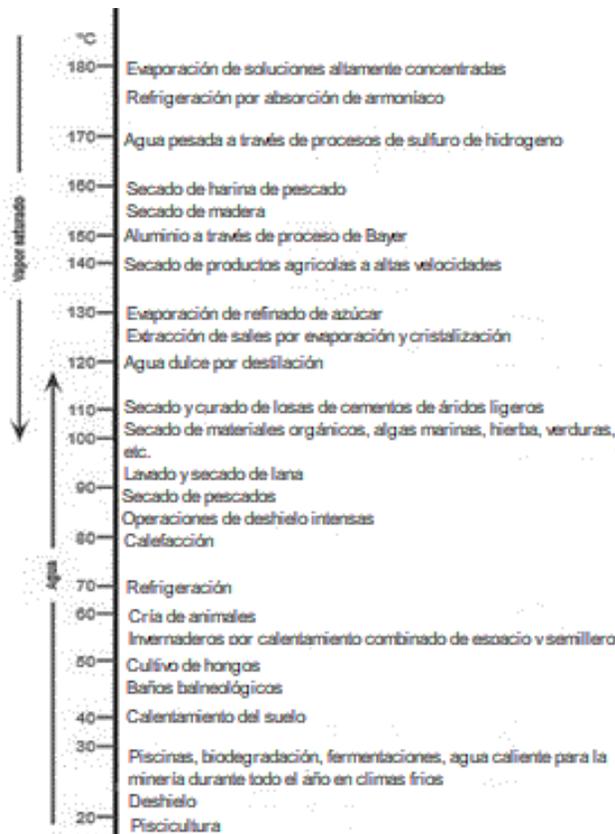
Si el gradiente geotérmico o temperatura es mayor a 180°C, este tipo de energía se clasifica como alta entalpía y su uso va dirigido a la producción de energía eléctrica de alta potencia, utilizando principalmente plantas de tipo flash.

En la Figura 2 se puede observar El Diagrama de Lindal el cual ilustra los usos de la energía geotérmica de acuerdo con su nivel de temperatura.

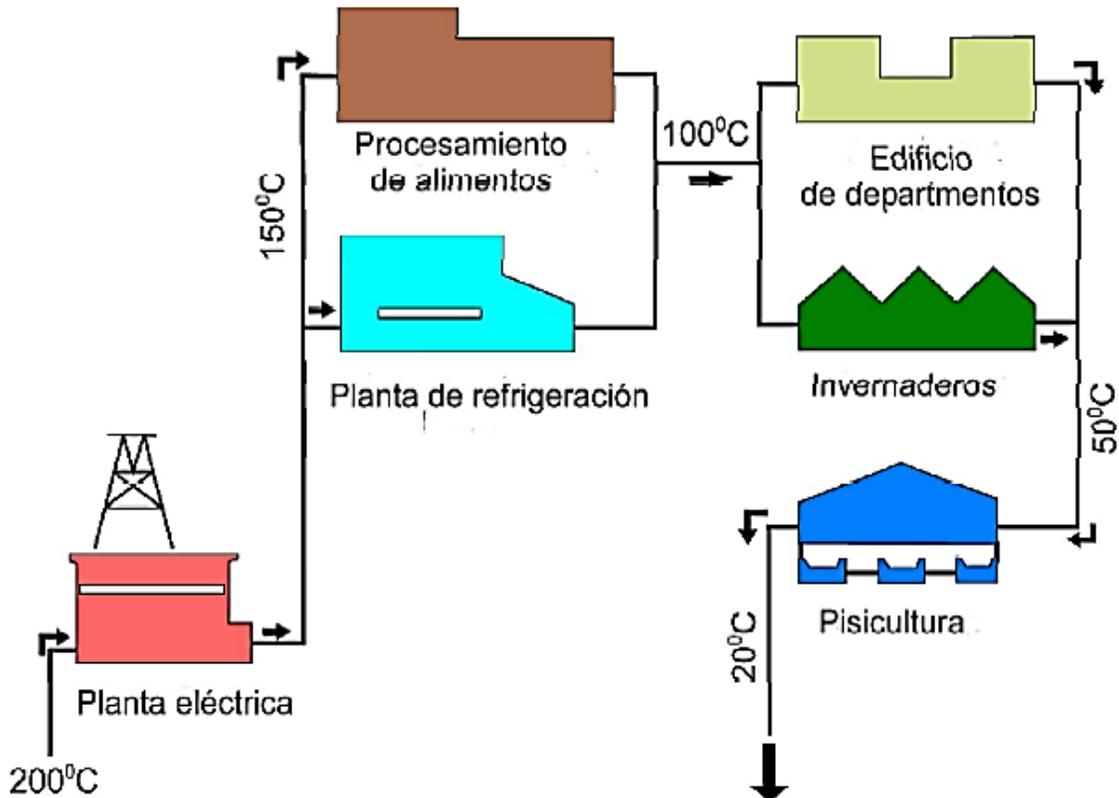
La principal restricción para el uso de la energía geotérmica es su transporte, debido a que cuando es transportada su temperatura disminuye respecto a la distancia por lo que el uso que se le da preferentemente es en la generación eléctrica, sin embargo, de acuerdo con Prol (2002), la energía geotérmica no se aprovecha lo suficiente, por ejemplo, si esta energía eléctrica es utilizada para sistemas de calefacción se tendrían pérdidas de un 50% a diferencia, si se usara de manera directa. En este aspecto gracias al avance del conocimiento en geotermia, actualmente se puede hacer uso eficiente del aprovechamiento de la energía aplicando sistemas en cascada que consisten en utilizar el fluido caliente en más de una aplicación (Figura 3), donde la energía geotérmica se usa en diferentes niveles de temperatura.

De acuerdo con Aviña (2018) el uso de sistemas geotérmicos en cascada donde se manejan temperaturas altas, posterior a donde se dé el uso principal del fluido como por ejemplo producción industrial de cerveza (140°C), tienen energía suficiente para usarse en más sistemas y ser mejor aprovechados como por ejemplo en la deshidratación de productos alimenticios (90 – 100°C), en invernaderos (60 – 80°C) y finalmente en climatización de espacios o balnearios (30 – 50°C).

Figura 2. Diagrama de Lindal



Nota. Adaptado de *Geothermal energy: utilization and technology*, por Dickson, M. y Fanelli, M., 2003, Unesco Publishing.

Figura 3. *Uso en cascada de la geotermia*

Nota. Adaptado de *Potencial de energía geotérmica en las ciudades españolas*, por Instituto Geológico y Minero de España, 2019.

1.2 Generación eléctrica

Para la generación de energía eléctrica es importante determinar el gradiente de temperatura, así como el tipo de recurso térmico en la zona, estos pueden ser sistemas hidrotérmicos, sistemas de roca caliente y sistemas geoprezurizados; de acuerdo con Núñez et al. (2008) los sistemas hidrotérmicos se caracterizan por contener agua a presión, temperaturas altas y almacenarse bajo la corteza de la tierra en roca permeable cerca de una fuente de calor; mientras que los sistemas de roca caliente se caracterizan por formarse por capas de roca impermeable que recubren un foco calorífico y para ser utilizados se necesita de la inyección de agua en su interior, lo que involucra procesos más largos en el desarrollo del proyecto; finalmente tenemos los sistemas geoprezurizados que explican Santoyo y Barragán (2010), son sistemas que contienen

agua y metano disuelto a alta presión (unos 700 bar, unidad de presión) y mediana temperatura (entre 90 y 200 grados centígrados). El uso de sistemas hidrotérmicos es más usado actualmente, debido a que la utilización de un sistema de roca caliente podría no ser económicamente viable por el proceso extra que se requiere para ser utilizado y en un sistema geopresurizado no se cuenta con la tecnología necesaria para obtener una explotación rentable.

A diferencia de otras energías renovables, la energía geotermia puede producir electricidad las 24 horas del día los 7 días de la semana, además de que no es necesario detener la planta para fines de mantenimiento y comparado con otras fuentes de energía renovable tiene el factor de capacidad neta más alto, el cual se encuentra entre el 60 – 90% y en México es muy cercano al 90% (Santoyo y Barragán, 2010).

La razón principal de la falta de explotación en este tipo de energía en comparación con la energía eólica ó la energía solar es debido al alto costo económico inicial que radica principalmente en la perforación de pozos de producción e inyección, las instalaciones de superficie e infraestructura, la planta de energía y la exploración de la zona, que permitirán conocer la viabilidad del proyecto geotermoeléctrico, a pesar de ser proyectos con altos costos iniciales, la operación y mantenimiento es más barato y su vida útil se encuentra entre los 25 y 30 años lo que permite la recuperación de la inversión (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012).

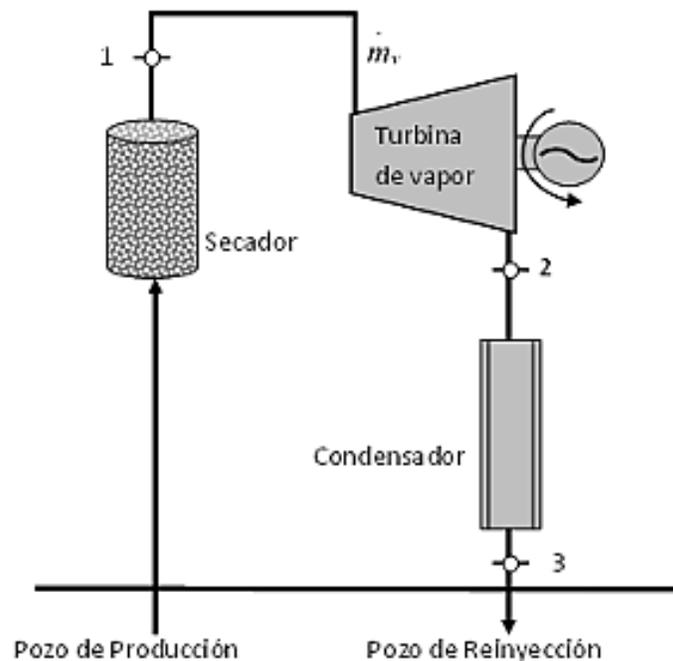
Como ejemplo tenemos las unidades 1 y 2 de Cerro Prieto en México, Eagle Rock y Cobb Creek in The Geysers en EE.UU., y Mak-A y Tiwi-A en Filipinas son centrales que han estado en operación por más de 30 años por lo que la vida útil de centrales geotérmicas eléctricas puede exceder el promedio (Pontificia Universidad Católica de Chile , 2012).

Los tres principales tipos de plantas para generar energía eléctrica de yacimientos geotérmicos, en función de su naturaleza de fluido geotermal y su profundidad son:

1.2.1 Plantas de vapor seco o contrapresión

Emplean vapor en estado de saturación proveniente del yacimiento que llega a la superficie, el cual se dirige directamente a una turbina que acciona un generador para producir electricidad (Figura 4); de acuerdo con Santoyo y Torres (2010) estas plantas requieren fluidos a temperaturas superiores a 250°C y su explotación puede llevarse a cabo mediante un ciclo directo sin condensación en plantas piloto o de baja potencia al tener baja eficiencia energética donde el vapor es expulsado a la atmósfera y mediante ciclo directo con condensación en plantas de alta potencia.

Figura 4. *Planta de Vapor Seco*



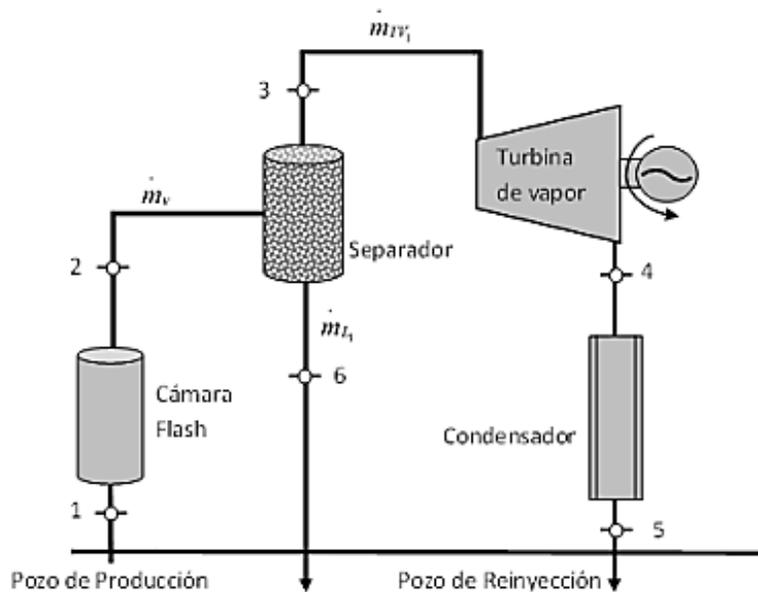
Nota. Adaptado de *Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos*, por Salazar, M., et al., 2017, Dyna, 84(203).

1.2.2 Plantas flash o de vapor húmedo

Estas emplean una mezcla vapor-líquido a presión elevada proveniente del yacimiento que llega a la superficie, posteriormente esta mezcla se dirige a unos separadores vapor/agua, donde el vapor resultante se conduce a la turbina para producir electricidad y el líquido regresa al pozo (Figura 5); de acuerdo con Santoyo y Torres (2010) estas plantas requieren fluidos con temperaturas superiores a 180°C , además, al ser más comunes los yacimientos que producen estos recursos y estar distribuidos de forma más generosa, el número de plantas de este tipo es mayor.

“La disminución de la presión del fluido en interior del pozo o a la salida de éste provoca una evaporación súbita (flasheo) de parte de la fase líquida del fluido para formar vapor, el cual es eficientemente separado del agua en separadores centrífugos. El vapor separado es conducido a turbinas para la producción de electricidad, mientras que la salmuera (agua salada caliente que es separada) puede ser sometida a una segunda separación para un mejor aprovechamiento de su energía remanente. Este vapor secundario es empleado para incrementar la producción de electricidad a través de turbinas de baja presión.” (Santoyo y Torres, 2010, p. 12)

Figura 5. *Planta Flash*



Nota. Adaptado de *Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos*, por Salazar, M., et al., 2017, Dyna, 84(203).

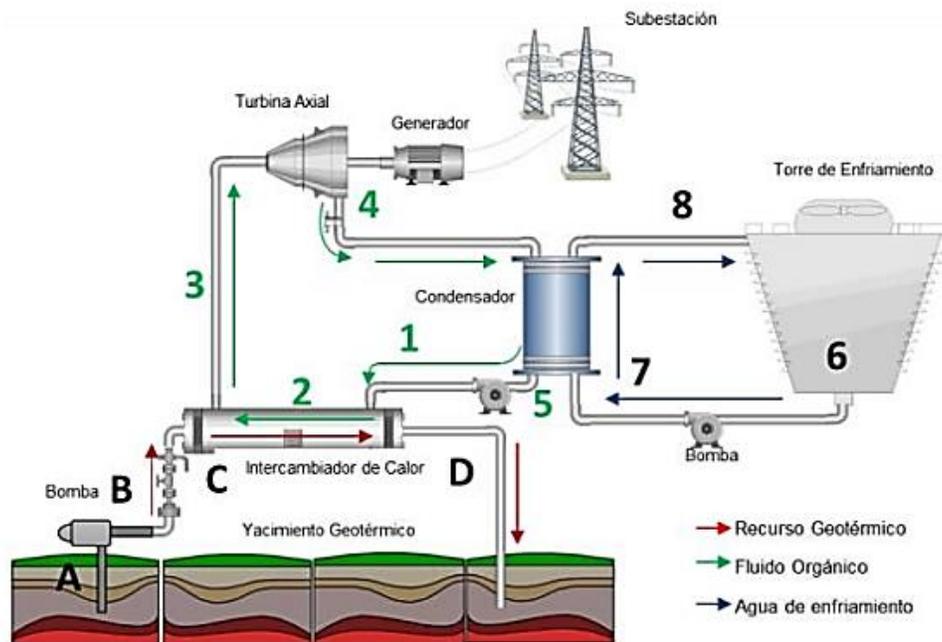
1.2.3 Plantas de ciclo binario convencional

Los Ciclos Binarios ORC se emplean cuando el fluido del yacimiento geotérmico no es tan alto como el de las plantas de vapor seco y tipo flash, o cuando se tienen temperaturas bajas.

Su funcionamiento evita el uso directo del fluido geotermal utilizando un fluido orgánico que tenga bajo punto de ebullición, el cual es bombeado y llevado a un intercambiador de calor que sirve para evaporar el fluido orgánico que posteriormente fluye a alta presión hacia una turbina que acciona un generador eléctrico; finalmente el vapor saliente de la turbina se dirige a un condensador que cambia su estado gaseoso a líquido y de esta manera permite reiniciar su ciclo (Figura 6).

De acuerdo con el Manual de Geotermia del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía y el Instituto Geológico y Minero de España (2008), son plantas principalmente usadas para pequeñas y medianas industrias.

Figura 6. *Planta de ciclo binario*



Nota. Adaptado de *Ciclo Binario de Evaporación Instantánea*, por, Instituto de Ingeniería, s.f..

1.3 Panorama de la geotermia en el mundo

A nivel mundial el uso de energías renovables no supera al de hidrocarburos y combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica, ya que fue una de las primeras formas de explotarla y continuo hasta nuestros días al ver los grandes beneficios que aportaba a las naciones en todo el mundo, sin embargo, la historia ha enseñado que depender de la energía eléctrica con base de hidrocarburos y combustibles fósiles impacta negativamente en todo el mundo acelerando el cambio climático, lo que trae consigo sequías intensas, escasez de agua, incendios graves, aumento del nivel del mar, inundaciones, deshielo de los polos, tormentas catastróficas, disminución de la biodiversidad y daños a la salud pública, es por ello que el mundo debe de tomar las medidas necesarias para limitar el aumento de la temperatura global encaminándose hacia una transición ecológica que incluya un uso sostenible de los recursos de la tierra en modelos de producción y consumo como la economía circular y no el sistema capitalista actual, al cual no le interesa la protección del medio ambiente; además del cambio a energías limpias como solar, eólica, hidráulica, mareomotriz, biomasa, biogás, nuclear y geotérmica.

De acuerdo con la International Geothermal Association (2014) alrededor de 83 naciones alrededor del mundo utilizan la geotermia en usos directos y en generación de energía eléctrica 30 de acuerdo con Huttner (2020), tales países se pueden observar en la Figura 7.

Tabla 1. *Potencias en energía geotérmica eléctrica instalada y generada (2015-2020, 2025)*

Países	MWe Instalados 2015	Energía Generada GWh/año. 2015	MWe Instalados 2020	Energía Generada GWh/año. 2020	Pronóstico MWe para 2025	Incremento MWe desde 2015
Estados Unidos	3,098	16,600	3,700	18,366	4,313	602
Indonesia	1,340	9,600	2,289	15,315	4,362	949
Filipinas	1,870	9,646	1,918	9,893	2,009	48
Turquía	397	3,127	1,549	8,168	2,600	1,152
Kenia	594	2,848	1,193	9,930	600	599
Nueva Zelanda	1,005	7,000	1,064	7,728	200	59
México	1,017	6,071	1,005.8	5,375	1,061	-11.2
Italia	916	5,660	916	6,100	936	0
Islandia	665	5,245	755	6,010	755	90
Japón	519	2,687	550	2,409	554	31
Otros	862.9	5,066.3	1,010.66	5,804.4	1,762	147.76
Total	12,283.9	73,550.3	15,949.66	95,098.4	19,152.01	3,666.56

Nota. Adaptado de *Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*, por Hutterer, G., 2020.

Como se observa 10 naciones tienen una explotación geotérmica muy por encima de otras y si bien es fruto del esfuerzo de cada país, tienen una ventaja geográfica al ubicarse en zonas donde se presentan manifestaciones térmicas con gran potencial de explotación, además de otras como volcanes, pozas de lodo, aguas termales, geiseres, fumarolas y terrazas de sílice; gran parte de estas zonas se encuentra dentro de lo que se conoce como el cinturón de fuego que habitualmente presenta gran actividad sísmica y volcánica.

“El Cinturón se localiza bordeando las costas del Océano Pacífico y tiene una longitud aproximada de 40 mil km, su origen está asociado a las zonas de subducción más importantes del orbe, lo que explica su intensa actividad sísmica y volcánica. Abarca toda la costa del Pacífico, inicia en Chile, pasa por Centroamérica, México, Estados Unidos, recorre las Islas Aleutianas, posteriormente baja por las costas de Rusia, Japón, Taiwán y

Filipinas, hasta llegar a Nueva Zelanda.” (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2020, párrafo 4)

1.4 Panorama de la geotermia en México

El aprovechamiento de la energía geotérmica en territorio mexicano se remonta a antiguos asentamientos humanos que usaban manifestaciones de agua caliente para su desarrollo, sin embargo, no fue sino hasta después de 1950 que se realizaron los primeros estudios para usar la energía geotérmica como fuente de energía eléctrica que resultó en la creación de la primera planta geotermoeléctrica en América, ubicada en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo con una capacidad de 3.5MWe (CEMIEGEO, s.f.).

Debido a la posición geográfica de México no es de extrañar que se encuentre entre los 10 países con mayor capacidad instalada y generada, teniendo 4 campos geotérmicos de tipo hidrotermal operados por la CFE y 1 operado por la empresa privada Grupo Dragón (Tabla 2), de acuerdo con Gutiérrez et al. (2020), en el año 2019 la capacidad total instalada fue de 1,005.8MWe, la cual disminuyó un 1.1% respecto a la reportada en 2015.

Tabla 2. *Plantas geotérmicas en México*

Planta geotérmica	Estado	Encargado	Capacidad instalada (2018)	Potencia neta disponible (2018)
Cerro Prieto	Baja California	CFE	570MWe	570MWe
Los Azufres	Michoacán	CFE	297.5MWe	247.5MWe
Los Humeros	Puebla	CFE	119.8MWe	94.8MWe
Las Tres Vírgenes	Baja California Sur	CFE	10MWe	10MWe
Domo San Pedro	Nayarit	Grupo Dragón	35.5MWe	25.5MWe

Nota. Adaptado de *Geothermal energy in Mexico: update and perspectives*, por Gutiérrez, L., et al., 2020.

En 2015, la CFE recibió trece áreas prospectivas para explorar y desarrollar en empresas del sector Privado y otras trece concesiones en los que se pronosticaba generar 1,670MWe para 2030, además, en el período 2015 – 2019 se gastaron \$369.2 millones de dólares en investigación y desarrollo por parte de CeMIEGeo, GEMex, PRODETES y ENAL, así como también en

perforación exploratoria y construcción en campo por parte de la CFE, ENAL y Grupo Dragón, lo que se entiende como un interés en optar cada vez más por el uso de energía eléctrica por geotermia y así contribuir de manera significativa a las necesidades energéticas de la nación para una soberanía energética (Gutiérrez et al., 2020).

1.4.1 Reservas probadas probables y posibles

De acuerdo con el Programa Especial de la Transición Energética 2017-2018 del DOF (2017), el potencial de generación eléctrica con energía geotérmica en México (GWh) tomado en 2015 fue el siguiente:

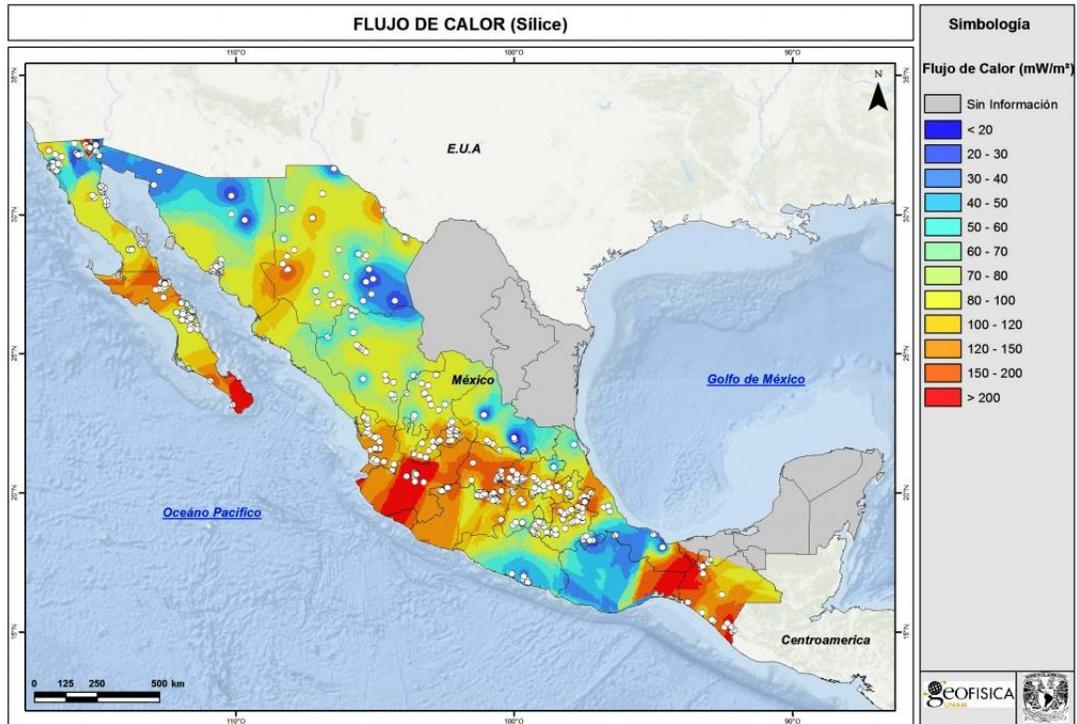
El potencial probado fue de 2,355GWh, el cual cuenta con estudios técnicos y económicos para comprobar la factibilidad de su aprovechamiento.

El potencial probable fue de 45,207GWh, en estos estudios de campo se comprobó la presencia de los recursos que no son suficientes para evaluar una factibilidad técnica y económica de explotación.

El potencial posible fue de 52,013 GWh, en este se investigó el potencial teórico de los recursos, que carece de los estudios necesarios para evaluar la factibilidad técnica y los posibles impactos económicos, ambientales y sociales.

En la Figura 8 se observa un mapa de las zonas de la República Mexicana con posibilidades de explotación geotérmica, el cual fue elaborado por el Instituto de Geofísica de la UNAM y brinda información necesaria principalmente a inversionistas e investigadores para el incremento de inversiones y el desarrollo de nuevas tecnologías. Los puntos blancos representan zonas de manifestaciones geotermiales que fueron muestreadas para medir su concentración de sílice y así poder calcular el flujo de calor y hacer la interpolación para generar el mapa y en el lado derecho se muestra mediante un código de colores, el flujo de calor en miliwatts por metro cuadrado correspondiente a cada zona.

Figura 8. Zonas geotérmicas de México



Nota. Adaptado de *Mapas de gradiente geotérmico y flujo de calor para la República Mexicana*, por Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.

1.4.2 Tecnología ORC en México

Al ser sistemas generalmente de baja entalpía no se les presta el interés suficiente, sin embargo, su investigación es necesaria para ser aplicada como métodos correctivos ante sistemas que han dejado de operar y pueden llevar a cabo una segunda vida al reutilizar los recursos de infraestructura disponibles, además de también ser sistemas de aprovechamiento de remanentes geotérmicos o de fuentes geotérmicas de baja entalpía.

En 2001 la CFE llevó a cabo la inauguración del proyecto experimental de una unidad de ciclo binario ORC instalado en Maguarichi, Chihuahua, cuyo objetivo fue suministrar electricidad de manera aislada a un poblado aprovechando la energía térmica de la zona. Esta unidad modular automática tenía una capacidad nominal de 300kWe y empleaba isopentano como fluido de trabajo

a una temperatura de 150°C, la unidad operó sin conexión con la red eléctrica y distribuía la energía a la comunidad mediante una subestación elevadora (Hiriart, 2011).

Componentes principales del proyecto Maguarichi:

- Turbina: 3600RPM, accionada con vapor de isopentano.
- Generador eléctrico: Síncrono enfriado por aire a 60Hz y 480V.
- Reductor de velocidad: De 3600 a 1800RPM.
- Evaporador: 65t/h de agua a 150°C y una temperatura de descarga de salmuera de 100°C.
- Condensador: 400t/h de agua a una temperatura de enfriamiento de 21°C.
- Subestación elevadora: De 0.48 – 13.2kV y línea de transmisión de 4.8km.
- Torre de enfriamiento.
- Panel de control.

En 2020 La CFE firmó un acuerdo de cooperación con la embajada de Francia en México para expandir el uso de la tecnología de ciclo binario y conocer la factibilidad técnica y económica de implementar esta tecnología para aprovechar el calor residual, con el objetivo de aumentar la capacidad de generación geotérmica (Rodríguez, 2020).

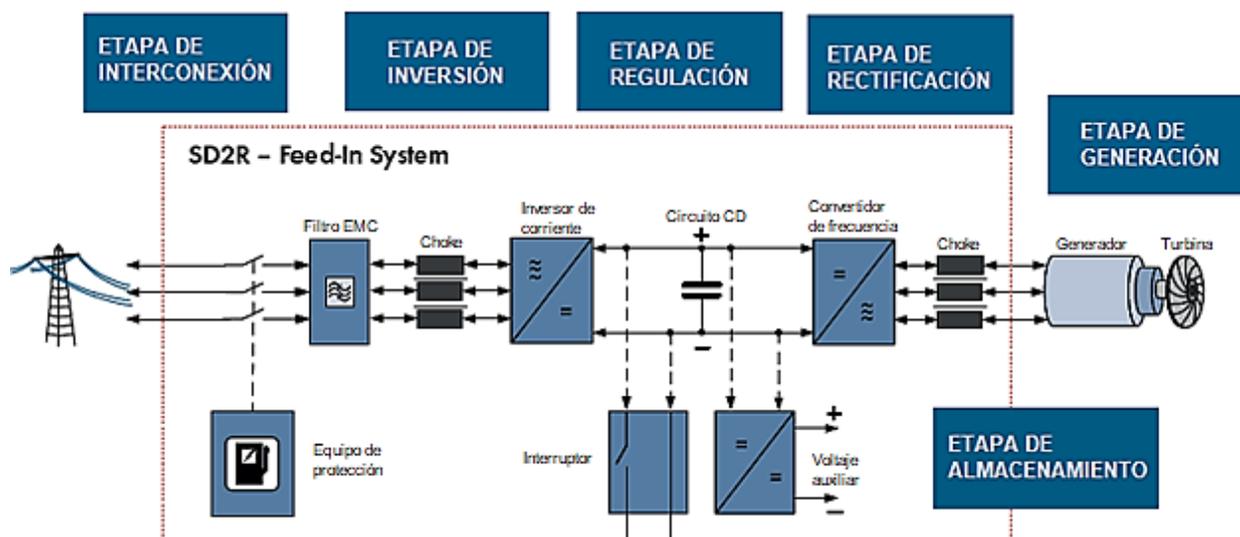
La experiencia acumulada en los últimos años muestra que el uso de ciclos binarios se ha desarrollado de manera eficiente en México y cada vez más instituciones públicas y privadas se interesan en desarrollar esta tecnología.

2 Aspectos eléctricos de un ciclo binario ORC

En el capítulo 1 se vio el funcionamiento general de un ciclo binario del tipo ORC que en resumen es un ciclo termodinámico que aprovecha el calor residual de procesos industriales o de fluidos calientes geotermiales para generar electricidad; en este capítulo se abordará el funcionamiento eléctrico del sistema una vez se accionan los álabes acoplados al generador y los dispositivos eléctricos electrónicos involucrados en su funcionamiento.

El sistema eléctrico del ciclo binario ORC, está dividido en 6 etapas (Figura 9) que se encargan de procesar y transmitir la energía eléctrica generada para su interconexión con la red eléctrica.

Figura 9. Sistema eléctrico de un Ciclo Binario



Nota. Adaptado de *Sistema eléctrico de un Ciclo Binario*, por SIEB & MEYER, 2013.

2.1 Etapa de generación

Esta etapa es la base del sistema e inicia cuando el eje del rotor del generador es girado por los álabes de la turbina, los polos del rotor se mueven produciendo un campo magnético a medida que los polos norte y sur giran a la misma velocidad angular que los álabes de la turbina. Cuando se acciona la turbina por medio del vapor a presión se genera energía mecánica, la cual por medio

de un generador la transforma a energía eléctrica, generando corriente alterna, todo esto bajo el principio de la Ley de Faraday y la Ley de Lenz.

La ley de Faraday dice que, en un circuito cerrado, un flujo magnético que varía con el tiempo es lo que define la fuerza electromotriz que produce el campo magnético y que luego se va a inducir en el bobinado para producir corriente eléctrica. Su ecuación es:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt}$$

donde:

ε = Fuerza electromotriz inducida (f.e.m.).

$d\Phi/dt$ = Tasa de cambio a lo largo del tiempo (dt) del flujo magnético ($d\Phi$).

La ley de Lenz es una consecuencia del principio de conservación de la energía (la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma) aplicado a la inducción electromagnética y establece que la dirección de la corriente inducida siempre es tal que se opone al cambio de flujo que la produce, es decir, se va en dirección opuesta a la original. En términos matemáticos esto se expresa mediante un signo negativo a la ley de Faraday, sin embargo, en la práctica lidiamos con la inducción magnética en espiras múltiples de alambre, donde cada una contribuye con la misma f.e.m., por lo que se agrega el término N para expresar el número de espiras, siendo su ecuación la siguiente:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

donde:

ε = Fuerza electromotriz inducida.

Signo negativo ($-$) = Oposición al cambio del flujo.

N = Número de espiras.

$d\Phi/dt$ = Tasa de cambio a lo largo del tiempo (dt) del flujo magnético ($d\Phi$).

En el generador estos principios se aplican cuando se cambia constantemente la polaridad para que haya movimiento y genere corriente eléctrica, donde el rotor actúa como inductor y el estator como inducido.

2.1.1 Generadores

El generador, es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica, a diferencia del motor que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Su eficiencia está directamente relacionada a su temperatura de operación, que en estado operativo normal puede ser de 50°C por sobre la temperatura ambiente o más, dependiendo del fabricante y sus aislaciones de barniz en los devanados. (Guevara, 2009)

Dependiendo de los requerimientos de potencia, los generadores eléctricos deberán ser síncronos o asíncronos y poseer o no escobillas, que si bien, se basan en los mismos principios físicos, su estructura, rendimiento y control difieren significativamente y dependiendo de los sistemas en los que sean incorporados, será más conveniente usar unos por encima de otros.

2.1.1.1 Síncrono

Los generadores síncronos son de velocidad constante, es decir, que su velocidad se mantendrá a pesar del cambio en la fuerza de giro que se le aplique.

Su estructura mecánica se compone de un rotor (parte móvil) y un estator (parte fija) separados por un entrehierro, además de poseer una carcasa, una base, una caja de conexiones, tapas y cojinetes.

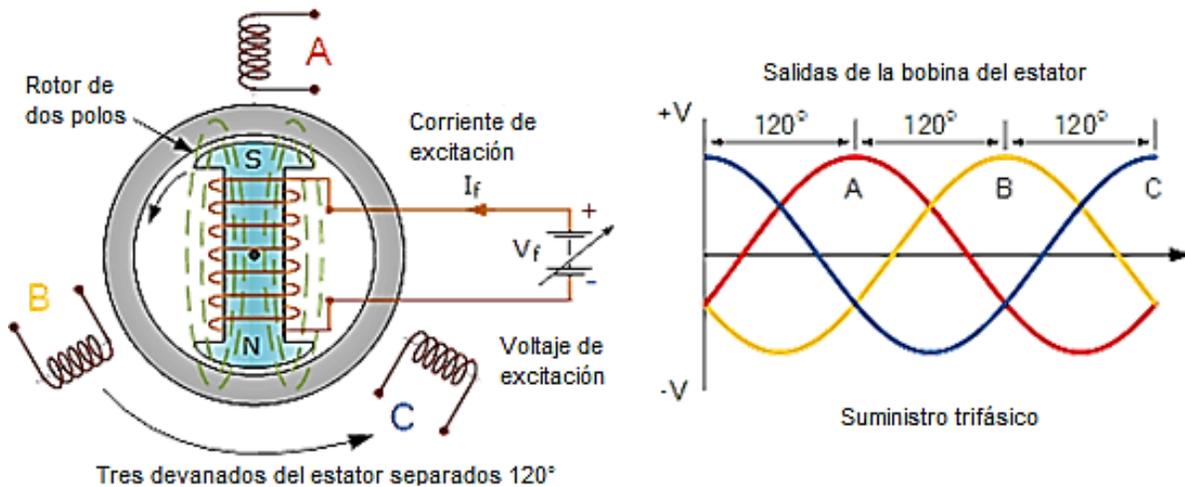
El rotor contiene un devanado de campo (corriente continua) y un devanado de cortocircuito que evita que el generador funcione a una velocidad que no sea síncrona.

El estator no se mueve mecánicamente, sino magnéticamente; está compuesto principalmente por un conjunto de láminas de acero que tienen la capacidad de pasar fácilmente el flujo magnético. (Máquinas Eléctricas Blog, 2016)

En la Figura 10 se muestra la estructura de un generador síncrono el cual se compone de tres bobinas en el estator correspondientes a los devanados A, B y C los cuales están 120°

desfasados los unos de los otros y un rotor bipolar devanado, el cual está conectado a un suministro que produce una corriente de campo I_f , donde el suministro produce un campo electromagnético alrededor de la bobina con polos norte y sur estáticos.

Figura 10. Estructura interna de un generador síncrono.



Nota. Adaptado de *Synchronous Generator*, por Alternative Energy Tutorials, s.f..

Un generador síncrono requiere de excitación en el devanado del rotor, lo cual se realiza mediante el uso de escobillas en su eje, sin embargo, para un generador síncrono la excitación se puede llevar a cabo mediante el uso de imanes permanentes en el rotor por lo que un generador síncrono puede ser encontrado en presentaciones con escobillas o de imanes permanentes, sin embargo, será más frecuente encontrarlo del tipo síncrono sin escobillas (Alternative Energy Tutorials, s.f.).

Entre sus ventajas se destacan los siguientes puntos:

- Pueden ser encontrados o bien fabricados con un alto rendimiento en una amplia gama de velocidades que mejor se ajuste a las necesidades requeridas y de esta manera ofreciendo ahorros de energía al operar bajo las condiciones contempladas.
- No es necesaria la implementación de transformadores, puesto que pueden ser conectados directamente de una red de alta tensión.

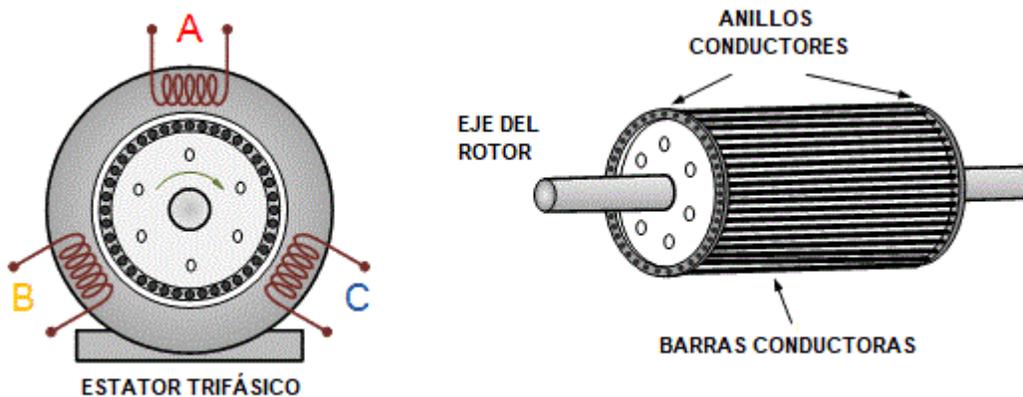
- En caso de existir una velocidad variable, el generador síncrono se mantendrá fijo, sin que influya la carga, puesto que no se ve afectado ante cambios de velocidad, siempre y cuando sean acorde a las limitantes del dispositivo.
- Es un dispositivo recomendado para aplicaciones de alto par y baja velocidad. (Comercial Mendez, s.f.)

2.1.1.2 Asíncrono

Los generadores asíncronos son de velocidad variable, es decir que su velocidad variará con la fuerza de giro que se le aplique. En la práctica, la diferencia entre la velocidad de rotación a potencia máxima y en vacío es muy pequeña, lo que se traduce en menor deslizamiento y desgaste en la caja multiplicadora. Esta es una de las razones más importantes para la utilización de generadores asíncronos, en aerogeneradores conectados directamente a la red eléctrica. (DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION , 2003)

La estructura mecánica del generador asíncrono se compone de un estator fijo y un rotor giratorio; en el estator se encuentran tres bobinas correspondientes a los devanados A, B y C, desfasados 120° los unos de los otros y el rotor tiene el diseño característico de jaula de ardilla, en donde las barras conductoras están incrustadas dentro del cuerpo del rotor y conectadas entre sí en sus extremos mediante anillos en cortocircuito (Figura 11).

Figura 11. Estructura interna de un generador asíncrono.



Nota. Adaptado de *Induction Generator*, por Alternative Energy Tutorials, s.f..

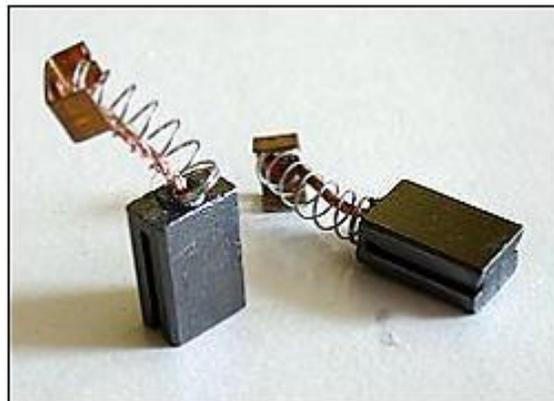
Sus ventajas destacadas son las siguientes:

- Su estructura suele ser más simple y más robusta que la del generador síncrono.
- Su mantenimiento es menos complejo y menos costoso que el del generador asíncrono.
- Es una buena alternativa para centrales eléctricas en donde las velocidades en los álabes de la turbina del turbogenerador varían bastante como por ejemplo en aplicaciones que requieran una potencia variable será conveniente usar generadores de tipo asíncrono, puesto que cuando varía la velocidad, también lo hace la potencia. (Comercial Mendez, s.f.)

2.1.1.3 Con escobillas

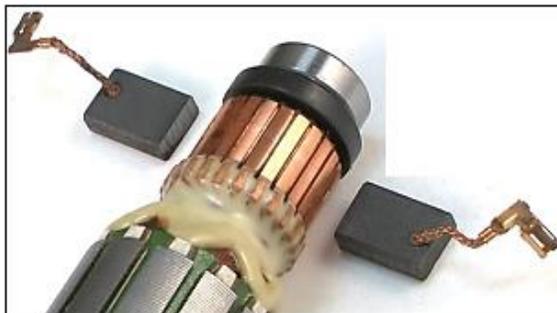
Las escobillas son elementos de grafito en forma cuadrada o rectangular y tienen la función de transmitir electricidad a las bobinas mediante fricción; las escobillas están conectadas mediante resortes que ejercen presión para poder conducir electricidad al bobinado del rotor para polarizar el motor y así producir atracción o repulsión entre el estator y el rotor (Figura 12). Las escobillas hacen contacto mecánico a través de los contactos eléctricos en el rotor formando un circuito eléctrico entre la fuente eléctrica CA y el bobinado (Figura 13). (Vega, 2019)

Figura 12. Escobillas de grafito



Nota. Adaptado de *Comparativa entre Motores Brushed y Brushless*, por Vega, A., 2019.

Figura 13. Circuito eléctrico entre la fuente eléctrica CA y el bobinado



Nota. Adaptado de *Comparativa entre Motores Brushed y Brushless*, por Vega, A., 2019.

La fricción realizada en el generador con escobillas causa un desperdicio de potencia que se pierde en forma de calor, lo que afecta su eficiencia y ciclo de vida útil, que termina siendo menor al de uno sin escobillas, esto se debe porque al realizar la fricción y cambiar de polaridad, se desprende calor y produce chispas, haciendo que las escobillas se deterioren, por lo que sus periodos de mantenimiento suelen ser más regulares que los de un generador sin escobillas, a pesar de esto, el motor con escobillas es más económico que el generador sin escobillas al no necesitar un control electrónico para su funcionamiento. (Vega, 2019)

2.1.1.4 Sin escobillas

Como se mencionó anteriormente, el ciclo de vida útil de los generadores sin escobillas suele ser mayor al de uno con escobillas, al no existir fricción por parte de las escobillas, lo cual evita la necesidad de un mantenimiento regular y le permite una operación continua, además de otras mejoras como la eliminación de ruidos, calentarse menos, evitar chispas que causen fuego en caso de manejarse fluidos inflamables, ser más eficiente al no tener que vencer la resistencia mecánica causada por el rozamiento y poseer un mejor rendimiento al ofrecer una mejor relación entre potencia y tamaño que el del generador con escobillas. (JAES Company, 2021)

Los generadores eléctricos sin escobillas tienen un rotor de imanes permanentes y un estator de electroimanes energizados en el bobinado para poder aumentar los campos electromagnéticos, logrando una densidad de potencia mecánica más elevada, la secuencia de excitación de los electroimanes impone a los imanes permanentes un movimiento angular que siempre estará en la misma dirección de manera constante en secuencia cíclica; esta secuencia de

excitación en los electroimanes es tal que los imanes del rotor son atraídos por los electroimanes y llegan a alcanzarlos, puesto que la activación es únicamente de aquellas bobinas a las cuales aún no ha llegado, cuando fluye la electricidad de la primer bobina, los polos opuestos del estator se verán atraídos, después cuando el rotor se acerca a la primer bobina, la electricidad fluirá por una segunda bobina, para después cuando se acerque a la segunda bobina, la electricidad fluya por la tercer bobina y habitualmente la electricidad fluirá por la primer bobina, pero de manera opuesta y así asegurándose de una rotación constante del rotor. (JAES Company, 2021)

2.2 Etapa de rectificación

Una vez que se ha generado energía eléctrica, esta pasa por la etapa de rectificación, la cual, por medio de circuitos compuestos por diodos rectificadores, convierten la corriente alterna generada en corriente directa, para que pueda ingresar a un inversor de corriente.

2.2.1 Diodos

Los diodos que integran estos circuitos son dispositivos semiconductores de dos terminales que actúan como un interruptor unidireccional que permite el paso de la corriente en una sola dirección. Generalmente, el diodo de unión P – N se forma uniendo material semiconductor de tipo P llamado ánodo (terminal positiva) y de tipo N llamado cátodo (terminal negativa); su símbolo eléctrico se representa por una flecha que apunta a una línea vertical que, a su vez, representa el cátodo y el lado contrario representa el ánodo (Figura 14).

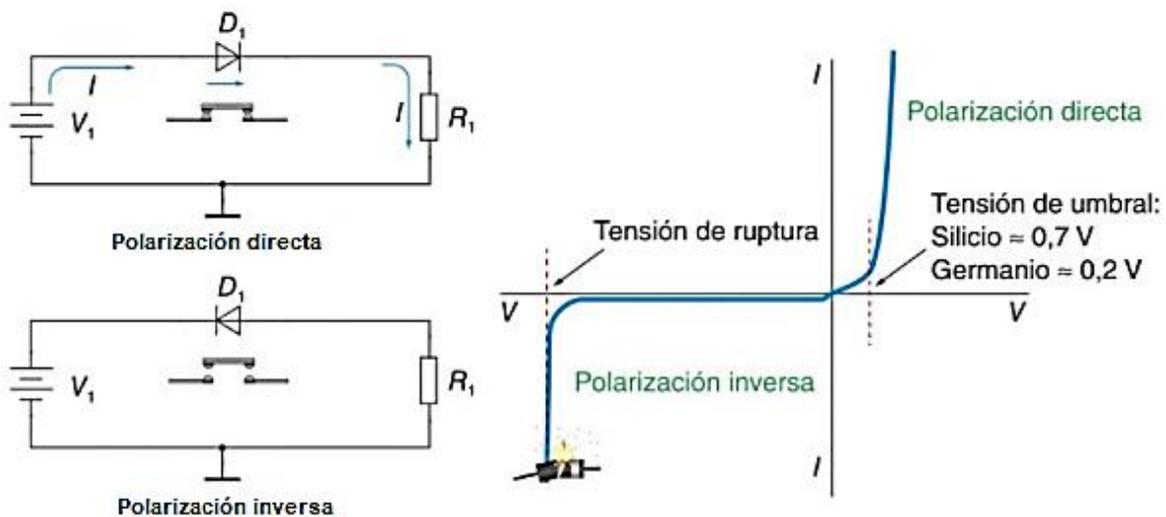
Figura 14. *El Diodo*



Nota. Adaptado de *Electrónica*, por Martín J., 2017.

La polarización del diodo puede ser de forma directa si circula corriente a través de él o de forma inversa si no permite el paso de la corriente, por ejemplo, en la Figura 15, se puede observar que, si en un circuito eléctrico se conecta un diodo de forma que el ánodo esté conectado a la parte positiva del circuito, entonces, dejará pasar la corriente, siempre y cuando la tensión de umbral de sus terminales sea igual o mayor a 0.7V para diodos de silicio y 0.3V para diodos de germanio. Pero si el positivo de la fuente del circuito se conecta en el cátodo, el diodo no permitirá el paso de la corriente y si en este escenario la tensión de los terminales del diodo aumenta de forma considerable y por ende también la corriente, el diodo sufrirá una tensión de ruptura, provocando su destrucción.

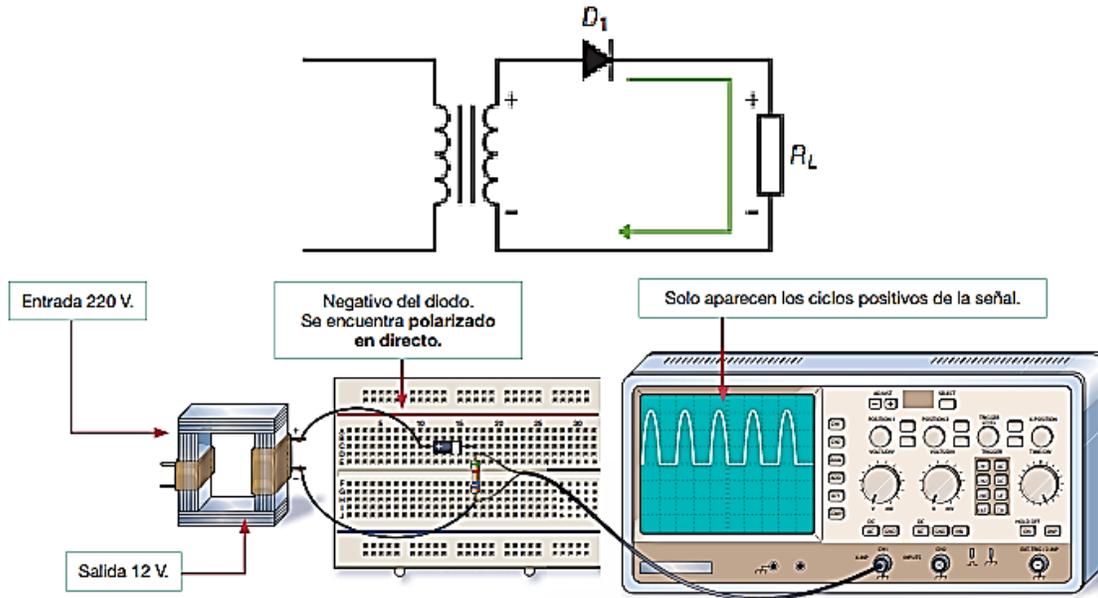
Figura 15. Polarización directa e inversa del diodo



Nota. Adaptado de *Electrónica*, por Martín J., 2017.

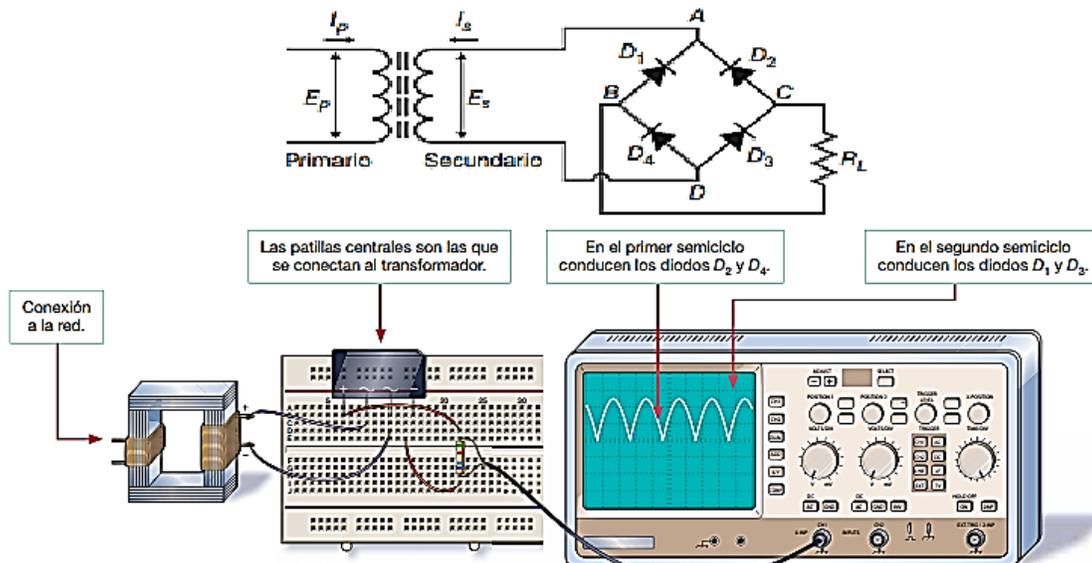
Los circuitos rectificadores pueden ser de media onda (Figura 16) y de onda completa (Figura 17), sin embargo, para la etapa de rectificación del ciclo binario se debe hacer uso de un puente rectificador de onda completa trifásica del tipo puente doble de Graetz, ya que este convierte la totalidad de la forma de onda de entrada en una polaridad constante (positiva y negativa) en la salida, mediante la conducción de los semiciclos positivos y negativos, a través de los diodos que conforman el puente rectificador. No podría ser de media onda debido a que este tipo de circuitos no es muy eficiente al ser un circuito que elimina la mitad de la señal de entrada y en consecuencia la mitad de su tensión de alimentación se pierde.

Figura 16. Circuito rectificador de media onda



Nota. Adaptado de *Electrónica aplicada*, por Carmona G. & Diaz T., 2010.

Figura 17. Circuito rectificador de onda completa

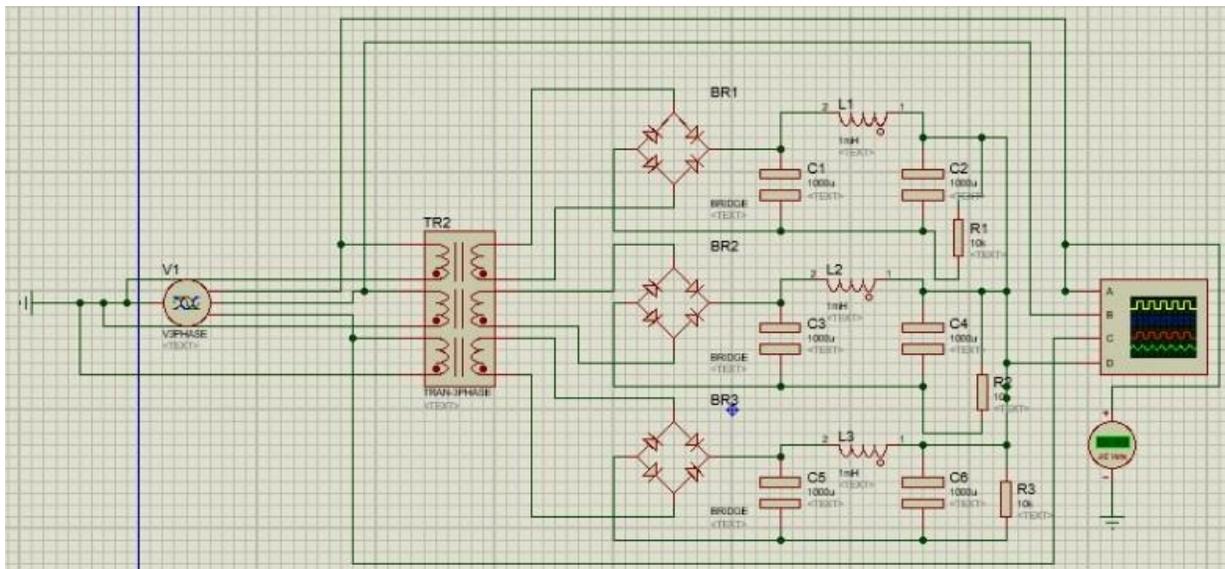


Nota. Adaptado de *Electrónica aplicada*, por Carmona G. & Diaz T., 2010.

Cuando se usa un rectificador se obtiene un rizado en la forma de onda de salida, por lo que casi siempre es necesario el uso de filtros en la salida, en la Figura 18 se muestra un circuito

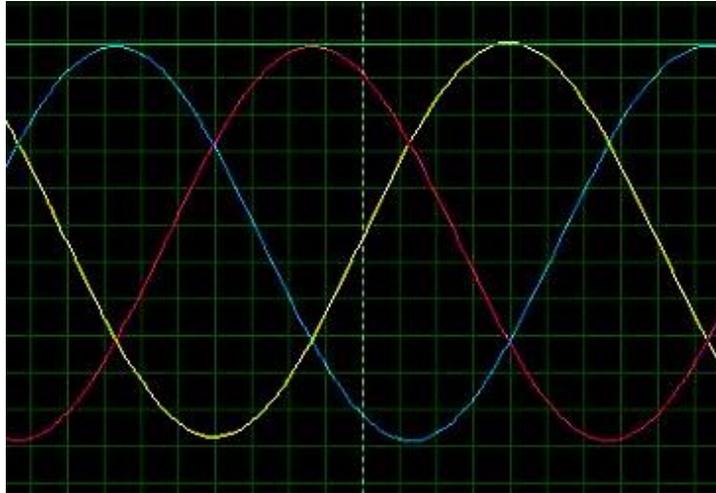
rectificador con filtros, en este la corriente alterna pasa a directa, el circuito está compuesto por dos capacitores electrolíticos en paralelo, con un inductor en serie entre ellos acompañados de una resistencia de descarga; primeramente los capacitores C1, C3 y C5 se cargan durante el aumento del voltaje y almacenan electrones, lo que reduce el efecto de rizado y los capacitores C2, C4 y C5 reducen el rizado restante, estos capacitores se encuentra unidos por un inductor que se opone al cambio de corriente y trata de mantenerla constante, por último, la resistencia frena la corriente almacenada en los capacitores cuando el circuito se apaga para mantenerlo seguro, de esta forma, la corriente trifásica de entrada se convierte en una corriente directa plana en la salida, como se puede observar en la Figura 19, donde esta corriente se identifica con el color verde.

Figura 18. Filtro de circuito rectificador



Nota. Elaboración propia.

Figura 19. *Corriente rectificada CA - CD*



Nota. Elaboración propia.

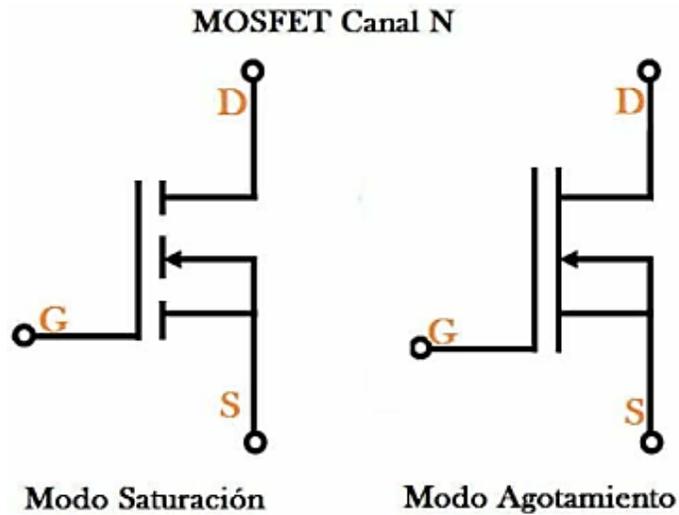
2.3 Etapa de regulación

Esta etapa consiste en la regulación de la salida de la tensión a partir de la tensión de entrada dada por la etapa de rectificación para que pueda alimentar al sistema de inversión.

2.3.1 Transistor de Efecto de Campo de Metal Óxido Semiconductor

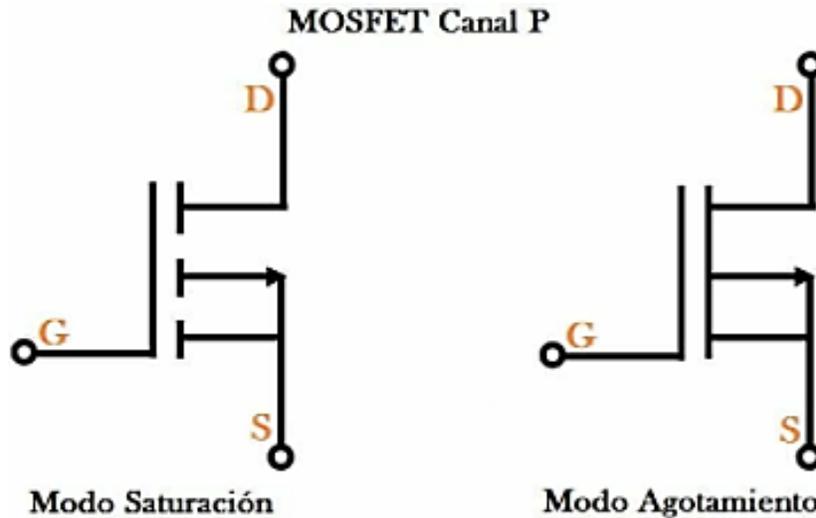
Para llevar a cabo este proceso, uno de los componentes principales a usar es el MOSFET, el cual puede ser de canal N o canal P y estar en estado de saturación o agotamiento (Figuras 20 y 21), a diferencia de los transistores BJT que son controlados por corriente, los MOSFET son controlados por voltaje para ser usados como conmutadores o amplificadores y están compuestos de cuatro terminales llamadas Fuente (Source), Drenador (Drain), Compuerta (Gate) y Substrato (esta última se encuentra conectada de manera interna a la fuente).

Figura 20. *MOSFET de canal N*



Nota. Adaptado de *Principios y Funcionamientos del Mosfet*, por Roch, E., 2021.

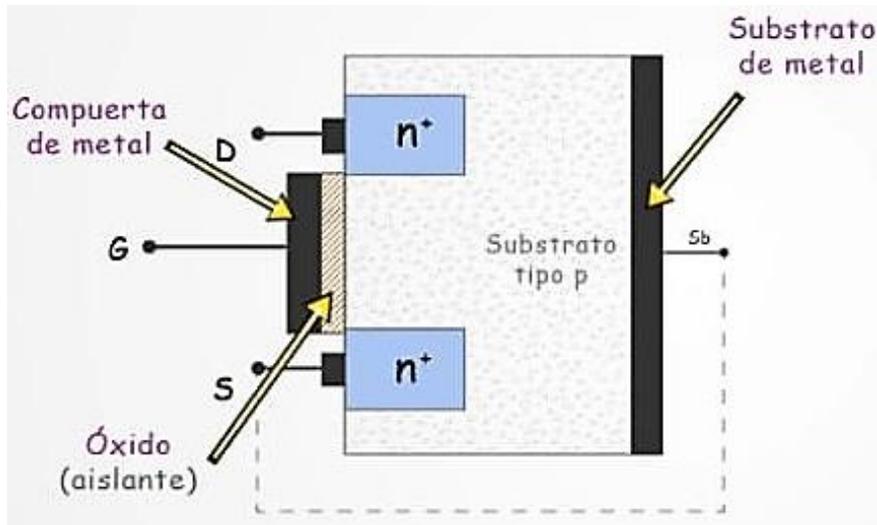
Figura 21. *MOSFET de canal P*



Nota. Adaptado de *Principios y Funcionamientos del Mosfet*, por Roch, E. 2021.

Para poder regular el voltaje de salida y pueda alimentar el sistema de autoabastecimiento (baterías), el MOSFET debe ser de canal N en saturación (Figura 22), este transistor controla el paso de la corriente entre la fuente (S) y el drenador (D) a través del campo eléctrico establecido mediante la aplicación de una tensión en la compuerta (G) (Shiavon, 1997).

Figura 22. MOSFET de canal N en saturación



Nota. Adaptado de *¿Qué es un transistor MOSFET? | Cómo funciona un MOSFET | Transistores de potencia*, por Neheyler Mechatronics, 2021.

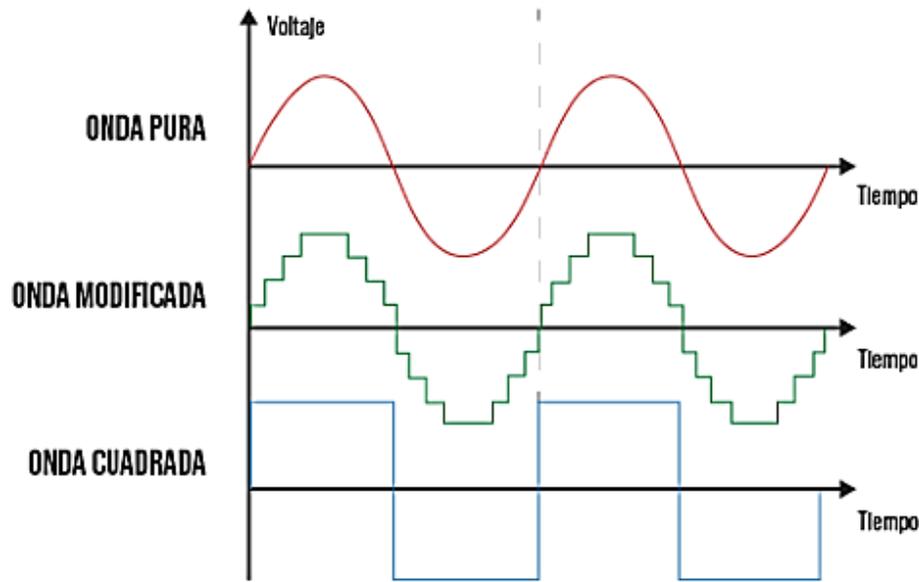
Cabe mencionar que, para el uso de los MOSFET, en aplicaciones que demanden grandes cantidades de corriente, como lo es el de generación eléctrica, es indispensable el acoplamiento de disipadores de calor para proteger los circuitos, además del uso de un inductor toroidal, que ayude a manejar las altas corrientes.

2.4 Etapa de inversión

La inversión de corriente consiste en transformar una tensión de entrada de corriente directa (proveniente de la etapa de regulación o del sistema de autoabastecimiento) a una tensión de salida de corriente alterna de magnitud y frecuencia variable, donde la señal debe tener un flujo senoidal puro, senoidal modificado o cuadrado (Figura 23), sin embargo, para un sistema de inversión de corriente con interconexión a la red eléctrica se debe usar un flujo de salida de onda senoidal pura, ya que esta no cuenta con distorsión armónica o bien es mínima, por lo que puede suministrar parámetros de calidad a la red, además, de que si se usa este tipo de flujo no se estará limitando a trabajar con algunos dispositivos eléctricos, como pasaría con una onda senoidal modificada o cuadrada, siendo que cualquier dispositivo que funcione con corriente alterna podrá hacer uso de esta energía siempre y cuando su tensión de entrada coincida con la tensión de salida

del inversor, de acuerdo con Andueza & Senosiáin, 2012, esta señal eléctrica es más pura que la suministrada por la red eléctrica.

Figura 23. Tipos de ondas



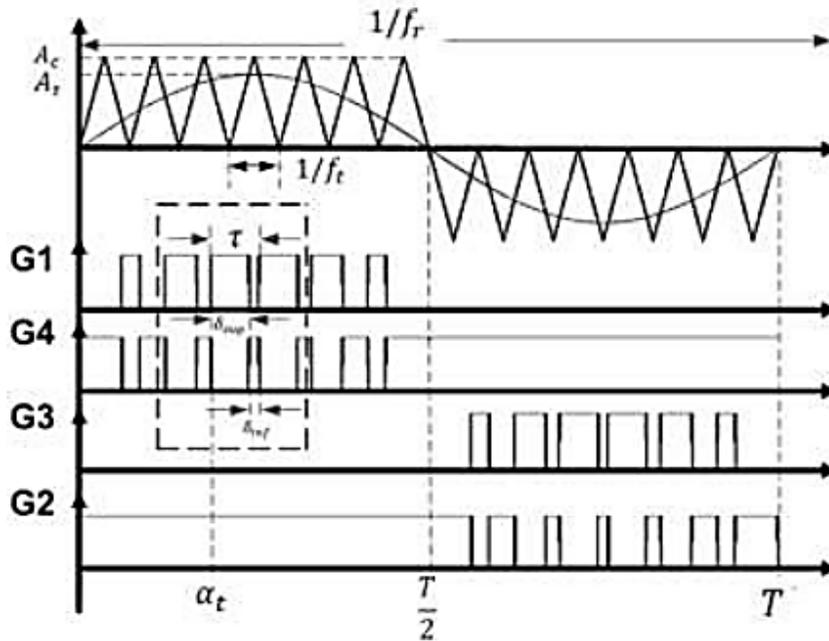
Nota. Adaptado de *¿Cómo son los inversores de onda senoidal?*, por Auto Solar, 2021.

En la inversión de CD a CA se hace uso de los MOSFET de la etapa de regulación junto con un circuito que es una placa de control con salida de onda sinusoidal pura. Los transistores MOSFET, son los que amplifican la tensión de entrada (por ejemplo, 60V) y hacen que se eleve al voltaje de operación que se requiera (por ejemplo 120 o 220V).

2.4.1 Inversor de corriente

Los inversores de corriente se utilizan principalmente en pequeñas fuentes de alimentación eléctrica, pero también en fuentes de alimentación industriales. En el mercado de inversores de corriente una de las modulaciones más usada es la modulación senoidal por ancho de pulso o SPWM, esta consiste en comparar una señal de referencia (senoidal) con una señal portadora (triangular) y de esta comparación, generar un tren de pulsos con ancho variable (Figura 24).

Figura 24. Modulación SPWM



Nota. Adaptado de *Deducción de Pérdidas de Potencia por Conducción en Inversores Modulación Senoidal de Ancho de Pulso, SPWM*, por Gallego, Cano, & Muñoz, 2015, Información Tecnológica, 26 (3).

El tren de pulsos divide su funcionamiento en semiciclos positivos y negativos, siendo que las señales de control G1 y G3 se obtienen a partir de la comparación de la señal de referencia con la señal de la portadora, teniendo valor digital alto cuando la señal senoidal es mayor que la señal triangular para el semiciclo positivo y valor digital alto cuando el valor absoluto de la señal senoidal es mayor que el valor absoluto de la señal triangular. Por otro lado, las señales G4 y G2 son complementos de las señales G1 y G3 respectivamente. (Gallego, Cano, & Muñoz, 2015)

2.5 Etapa de interconexión a la red eléctrica

La interconexión a la red eléctrica es un proceso mediante el cual dos centrales de generación eléctrica sincronizan sus parámetros eléctricos (frecuencia y voltaje) con la finalidad de intercambiar energía eléctrica. En este proceso interviene el proveedor, que es la parte generadora particular (geotermia, solar, eólica, etc.) y el suministrador, que es la parte generadora que ofrece el servicio eléctrico, siendo en el caso de México la CFE.

Para una fuente de energía renovable o un sistema de cogeneración en pequeña escala, es decir, generación de energía eléctrica y térmica, como la del presente trabajo, la central generadora deberá tener una tensión de suministro menor a 1kV y una capacidad de hasta 50kWe si es un sistema trifásico o 30kWe si es un sistema monofásico (CRE, RESOLUCION Núm. RES/054/2010, 2010).

El Sistema Interconectado Nacional del SEN, está conformado por 9 Gerencias de Control Regional, integrados en 4 áreas síncronas y 4 tipos de centrales eléctricas que se clasifican por su nivel de potencia (Tabla 3).

Las especificaciones técnicas generales, aplicables a las centrales eléctricas de generación distribuida y generación limpia distribuida, están dadas por la CRE en su RESOLUCIÓN Núm. RES/142/2017, ANEXO II, por lo que la información mostrada en este tema parte del DOF.

Tabla 3. *Centrales eléctricas y sus áreas síncronas*

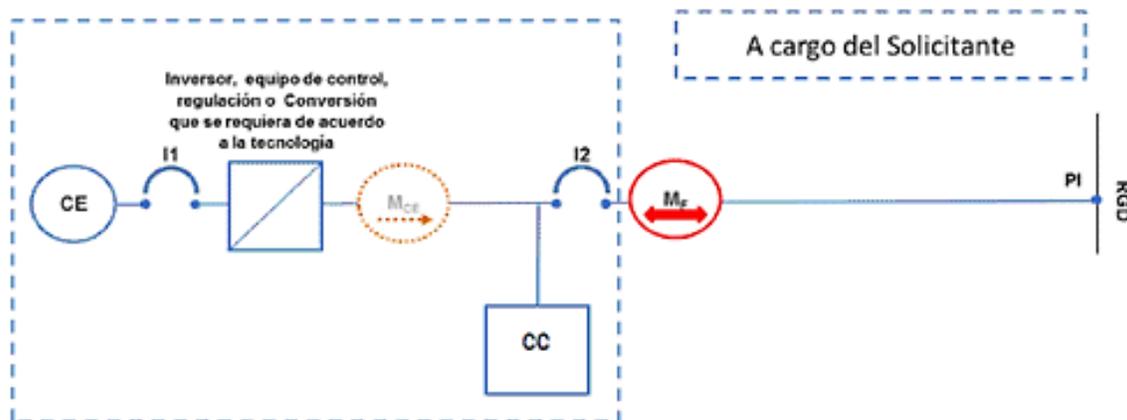
Áreas síncronas	Central Eléctrica Tipo A	Central Eléctrica Tipo B	Central Eléctrica Tipo C	Central Eléctrica Tipo D
Sistema Interconectado Nacional	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$10\text{MW} \leq P < 30\text{MW}$	$P \geq 30 \text{ MW}$
Sistema Baja California	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 5 \text{ MW}$	$5 \text{ MW} \leq P < 20 \text{ MW}$	$P \geq 20 \text{ MW}$
Sistema Baja California Sur	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 3 \text{ MW}$	$3 \text{ MW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$P \geq 10 \text{ MW}$
Sistema Interconectado Mulegé	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 1 \text{ MW}$	$1 \text{ MW} \leq P < 3 \text{ MW}$	$P \geq 3 \text{ MW}$

Nota. Adaptado de *Integrando Energías Renovables en Sistemas de Potencia en Centroamérica*, por Beltrán, H., 2016, Comisión Reguladora de Energía.

2.5.1 Esquema de interconexión

La Figura 25 muestra el esquema de interconexión de baja tensión del sistema eléctrico general de una central eléctrica y los dispositivos principales con que ha de contar.

Figura 25. Central eléctrica tipo BT



Nota. Adaptado de *RESOLUCIÓN Núm. RES/142/2017*, por Comisión Reguladora de Energía, 2017, Diario Oficial de la Federación.

Donde:

- CE: Central eléctrica (Equipo de generación de energía eléctrica).
- CC: Centro de Carga (Tablero).
- MF: Medidor fiscal (Se encarga del registro de energía eléctrica entregada o recibida de la Red General de Distribución).
- MCE: Medidor de la generación de la Central Eléctrica (Se encarga del registro de energía eléctrica generada).
- I1: Interruptor de desconexión de la Central Eléctrica (Interruptor general del sistema).
- I2: Interruptor de desconexión de la Red Particular.
- PI: Punto de Interconexión.
- RGD: Red General de Distribución.

2.5.2 Sistema de medición

El MF se instalará en los puntos que deban ser medidos, de acuerdo con el esquema de interconexión previamente visto y deberá ser instalado en el límite del predio del solicitante, sin obstáculos físicos para garantizar la toma de lecturas. Cuando se trate de una Central Eléctrica de Generación Limpia Distribuida que comparta energía eléctrica con la red, se deberá hacer uso de un medidor bidireccional, el cual, es un dispositivo capaz de llevar el registro de la energía eléctrica importada y exportada por la central.

2.5.3 Equipo de telemetría

Las Centrales Eléctricas con capacidad menor a 0.5MWe al ser sistemas BT, no requieren de telemetría en tiempo real, por lo que no recibirán instrucciones de despacho en el mercado de tiempo real, sin embargo, si el CENACE determina que se requiere modelarlas directamente para contribuir a preservar la confiabilidad del SEN se deberán incluir tecnologías de información y comunicaciones para el envío de información y datos, las cuales deberán cumplir con los requerimientos de interoperabilidad y seguridad de la información que se indiquen en el Código de Red y en la regulación aplicable.

2.5.4 Dispositivos de desconexión

Son aquellos dispositivos de protección que permiten la desconexión de la central o de los equipos que se encuentren conectados a cargas eléctricas mediante cables, estos dispositivos protegen a los equipos ante sobrecorrientes, sobretensiones, cortocircuitos y al personal ante descargas eléctricas; los interruptores termomagnéticos, son los principales desconectores en sistemas de BT y deben seleccionarse acorde a las características del tipo de central eléctrica instalada, el tipo de corriente en el punto en donde se instalen y de acuerdo a la NOM-001-SEDE-2012, "Instalaciones Eléctricas (Utilización)".

2.5.4.1 *Interruptor termomagnético*

Es un dispositivo de protección de circuitos eléctricos capaz de interrumpir la corriente eléctrica cuando sobrepasa determinados valores máximos bajo condiciones térmicas cuando existe una sobrecarga o magnéticas cuando existe un cortocircuito.

De acuerdo con la página web, Control para la industria, s.f., la selección del interruptor termomagnético debe cumplir las siguientes condiciones:

- Que la tensión nominal del interruptor termomagnético (V_n) sea mayor o igual a la tensión de la red (U).
- Que la corriente nominal de corte del interruptor termomagnético (I_n) sea mayor o igual a la corriente máxima que circulará en situación de trabajo (I_B).
- Que la corriente nominal de corte del interruptor termomagnético (I_n) sea menor o igual a la corriente admisible por el cable (I_z).
- La corriente de cortocircuito que pueda soportar el interruptor termomagnético (corriente de cortocircuito nominal (I_{cn})) sea mayor a la corriente de cortocircuito de la instalación (I_{cc}).
- El tipo de protección deberá seleccionarse de acuerdo con el rango de la corriente que provoca el accionamiento de la protección magnética, ya sea de tipo Z para corriente de 2 a 3 veces I_n , B para corriente de 3 a 5 veces I_n , C para corriente de 5 a 10 veces I_n , D para corriente de 10 a 20 veces I_n , K para corriente de 8 a 12 veces I_n y S para corriente de 13 a 17 veces I_n .
- La clase de protección deberá seleccionarse de acuerdo con la energía que la protección deja pasar a la carga en una situación de cortocircuito antes del relevo, ya sea de clase 1, 2 o 3 (menos energía transfiere a la carga en cortocircuito).

2.5.4.2 *Cable*

Directamente dependiente del interruptor termomagnético se tiene el cable de conexión, el cual es un conductor eléctrico cuyo material más común es el cobre o aluminio y esta recubierto de

un material aislante; para la selección del cableado adecuado de una instalación se debe considerar lo siguiente:

- Calibre: Es el diámetro del conductor, identificado con el estándar estadounidense AWG, para tamaños de conductores de metal no ferrosos.
- Tipo de aislante: El tipo de aislante se selecciona de acuerdo con las características del medio de instalación, las cuales son:
 - T (Thermoplastic): Aislamiento termoplástico.
 - H (Heat resistant): Resistencia al calor (hasta 75°C).
 - HH (Heat resistant): Resistencia al calor (hasta 90°C).
 - W (Water resistant): Resistencia al agua y humedad.
 - LS (Low smoke): Cable de baja emisión de humos y bajo contenido de gases contaminantes.

Tabla 4. *Cables eléctricos y sus características*

Tipo de aislante	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2
Nivel de temperatura	60°C	75°C	90°C
Calibre del cable	Amperaje soportado		
14 AWG	15A	15A	15A
12 AWG	20A	20A	20A
10 AWG	30A	30A	30A
8 AWG	40A	50A	55A
6 AWG	55A	65A	75A
4 AWG	70A	85A	95A
3 AWG	85A	100A	115A
2 AWG	95A	115A	130A
1 AWG	110A	130A	145A
1/0 AWG	125A	150A	170A
2/0 AWG	145A	175A	195A
3/0 AWG	165A	200A	225A
4/0 AWG	195A	230A	260A

Nota. Adaptado de *Protecciones Termomagnéticas*, por Control Para la Industria s.f..

2.5.5 Requisitos técnicos operativos

La interconexión de las centrales eléctricas de generación distribuida no debe causar desbalances en los circuitos de distribución o ser fuente de perturbaciones eléctricas en el circuito o con los usuarios, por lo que se deberán cumplir los siguientes requisitos técnicos de operación con el objetivo de garantizar las condiciones de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del SEN, sin embargo, el proyecto realizado en esta investigación entregará parámetros en baja tensión, por lo que si bien los siguientes aspectos se tomarán en cuenta para conseguir una energía de calidad, no serán variables que afecten a la red o usuarios, puesto que el sistema estará aislado de la red y al trabajar a baja tensión, estos problemas serán solucionados por medio de un inversor de corriente.

- Sincronía: La central eléctrica de generación distribuida entrará en paralelo con las redes generales de distribución sin causar fluctuación de tensión mayor a $\pm 5\%$ de los niveles de tensión de las redes generales de distribución en el punto de interconexión.
- Energización del circuito de distribución: La central eléctrica no debe energizar el circuito de distribución cuando dicho circuito se encuentre desenergizado o fuera de servicio.
- Factor de potencia: La central eléctrica de generación distribuida en media tensión deberá operar con factor de potencia en el rango de 0.95, en atraso o en adelanto.
- Calidad: El valor máximo permitido de distorsión armónica total en la forma de onda de corriente es de 5%, sin superar de manera individual los límites definidos en la Tabla 5.

Tabla 5. Distorsión armónica máxima de corriente en porcentaje de la corriente nominal de la Central Eléctrica.

Orden individual de armónica h (armónicas impares)	Orden					Distorsión de demanda total (TDD)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
Porcentaje (%)	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

Nota. Adaptado de *RESOLUCIÓN Núm. RES/142/2017*, por Comisión Reguladora de Energía, 2017, Diario Oficial de la Federación.

Los armónicos pares en los rangos de la Tabla 5 deben ser menores en magnitud que el 25% del límite del armónico impar correspondiente.

- Inyección de corriente directa: La inyección de corriente directa en el punto de interconexión debe ser $< 0.5\%$ de la corriente nominal de salida de la central eléctrica.
- Protecciones: Las centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MWe, tanto asíncronas como síncronas, deben cumplir con las protecciones indicadas en la Tabla 6.

Tabla 6. *Protecciones básicas*

Protección	Capacidad < 500 kWe
Dispositivo de desconexión de las redes generales de distribución	✓
Sobre – corriente	✓
Dispositivo de desconexión del generador	✓
Disparo por sobre tensión	✓
Disparo por baja tensión	✓
Disparo por sobre y por baja tensión	✓
Sincronismo (automático preferentemente)	✓
Anti – isla	✓

Nota. Adaptado de *RESOLUCIÓN Núm. RES/142/2017*, por Comisión Reguladora de Energía, 2017, Diario Oficial de la Federación.

- Tensión: La central eléctrica de generación distribuida no deberá regular la tensión en el punto de interconexión, tampoco deberá causar que la tensión en el punto de interconexión salga de los límites operativos normales de acuerdo con el Código de Red.
- Frecuencia: Cuando la frecuencia del sistema se encuentre en los rangos dados en la Tabla 7, la protección en el punto de interconexión deberá operar dentro de los tiempos de desconexión indicados en la misma.

Tabla 7. Tiempo de respuesta a frecuencias anormales en el Punto de interconexión

Capacidad de la Central Eléctrica	Rango de frecuencia (Hz)	Tiempo de operación (s)	Tiempo de desconexión (s)	
		Mínimo	Máximo	
Central Eléctrica Asíncrona	$f > 61.2$	-	0.16	
	$\leq 30\text{kWe}$	$57.0 \leq f < 61.2$	Operación permanente	
		$f < 57.0$	-	0.16
	$> 30\text{kWe}$	$f > 62$	-	0.16
		$61.2(1) < f \leq 62$	-	300(1)
		$58.8(2) < f \leq 61.2(1)$	Operación permanente	
$57.0 < f \leq 58.8(2)$		30	300(2)	
	$f < 57.0$	-	0.16	
Central Eléctrica Síncrona	$f > 61.2$	-	0.16	
	$\leq 30\text{kWe}$	$58.8 \leq f < 61.2$	Operación permanente	
		$f < 58.8$	-	0.16
	$> 30\text{kWe}$	$f > 61.2$	-	0.16
		$58.8(3) \leq f < 61.2$	Operación permanente	
		$58.0 \leq f < 58.8(3)$	-	15(3)
$f < 58.0$		-	0.16	

Nota. Adaptado de RESOLUCIÓN Núm. RES/142/2017, por Comisión Reguladora de Energía, 2017, Diario Oficial de la Federación.

- Re-conexión: Después de un disturbio, la central eléctrica no deberá reconectarse hasta que la tensión en el punto de interconexión esté dentro de los límites operativos normales de acuerdo con el Código de Red y la frecuencia este entre 59.3Hz y 60.5Hz. El sistema de interconexión de la central eléctrica deberá incluir un retardo de tiempo ajustable (o fijo a 5 min.) para retardar la re-conexión un mínimo de 5 min, después de

que la tensión y la frecuencia se hayan restablecido dentro de los límites indicados anteriormente.

- Operación en Isla: Para una operación en isla no-intencional, en la que la central eléctrica alimenta una parte del circuito de distribución en el punto de interconexión, la central eléctrica deberá detectar esta condición y desconectarse del circuito de distribución en un tiempo no mayor a 0.5 segundos.

2.5.6 Inspección

Este apartado consiste en llevar a cabo la inspección de las obras en la central realizando pruebas operativas mediante el estándar UL1741 "Inverters, Converters, Controllers and Interconnection Systems Equipment for use with Distributed Energy Resources" o el IEEE 1547.

En caso de no llevarse a cabo las pruebas antes mencionadas, como no existe una especificación técnica general o norma oficial emitida por la CRE para llevar a cabo pruebas operativas que avalen el correcto funcionamiento en una central eléctrica de generación distribuida o generación limpia distribuida, según lo estipulado en el punto 6.2.1. del ANEXO II de la RESOLUCIÓN Núm. RES/142/2017 pueden llevarse a cabo las pruebas operativas de la Tabla 8, en su totalidad o algunas de ellas por una unidad de inspección o laboratorio certificador.

Tabla 8. *Pruebas operativas de la Central Eléctrica*

Prueba tipo
Factor de potencia
Distorsión armónica
Inyección de corriente directa
Variación en la tensión y frecuencia del suministro
Reconexión con retardo
Anti – isla
No exportación de energía (si aplica)
Corriente Energización (si aplica)
Capacidad del aislamiento contra sobretensiones
Sincronización

Nota. Adaptado de *RESOLUCIÓN Núm. RES/142/2017*, por Comisión Reguladora de Energía, 2017, Diario Oficial de la Federación.

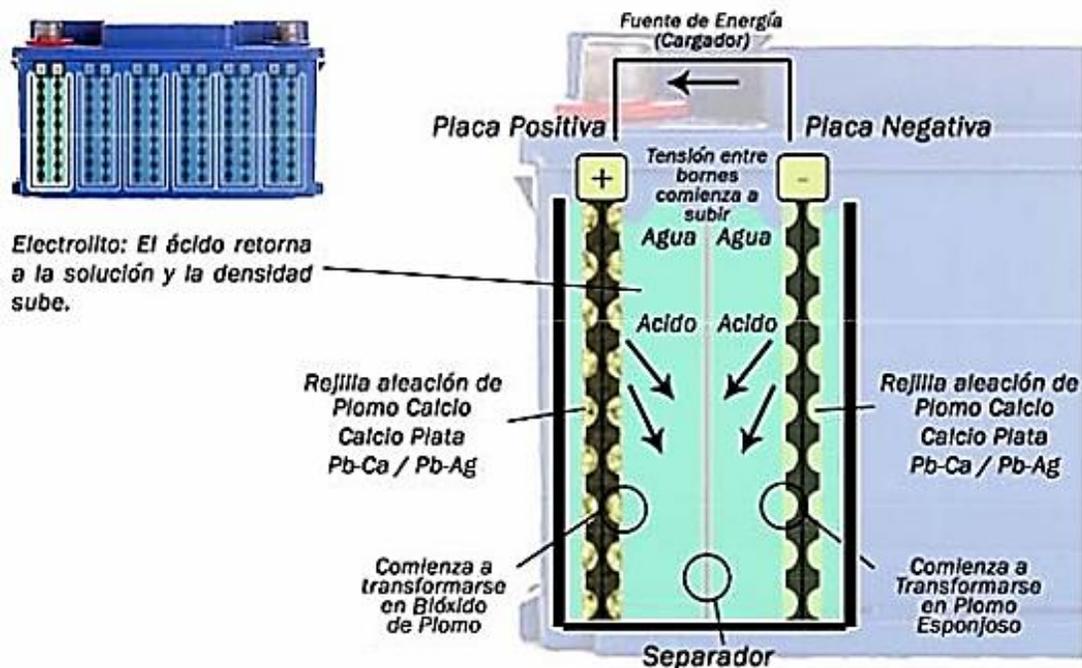
2.6 Etapa de almacenamiento

Esta etapa consiste en el respaldo de energía del sistema y si bien su función principal es la de ser una fuente de energía eléctrica auxiliar en casos donde el generador no este proporcionando energía eléctrica al inversor, también tiene la tarea de servir como un sistema de amortiguamiento de cargas cuando se arranca el generador y se requiere de un esfuerzo para hacer funcionar el sistema eléctrico.

2.6.1 Baterías de ácido – plomo

El sistema de almacenamiento está compuesto por un arreglo de baterías de ácido – plomo, las cuales se componen de celdas electroquímicas, estas convierten la energía química almacenada a energía eléctrica de corriente continua y dependiendo de la batería, este proceso puede ser reversible por medio de la recarga (Figura 26), donde se puede restablecer la composición química de la batería, pero hasta una determinada cantidad de veces, las cuales dependen de su vida útil dada por los ciclos de carga – descarga.

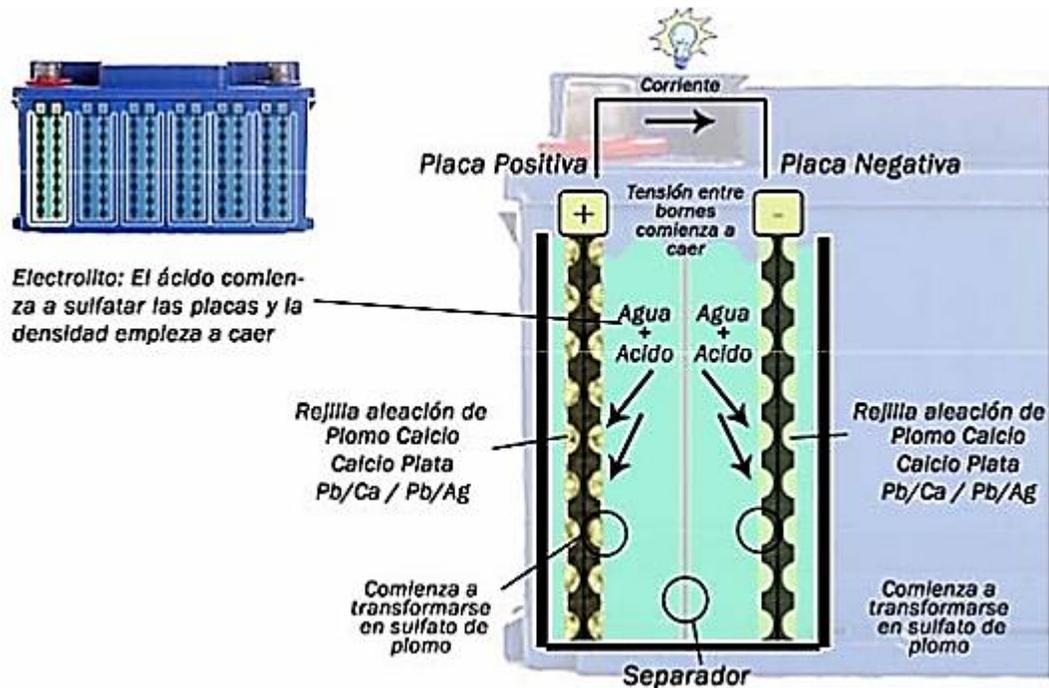
Figura 26. Batería en carga



Nota. Adaptado de *Manual de baterías de arranque*, por Van Zandweghe Hnos, s.f..

El principio de funcionamiento de la descarga en las baterías (Figura 27) se basa en el proceso químico reducción – oxidación (redox), en donde una de las sustancias químicas de la batería pierde electrones (se oxida) y la otra los gana (se reduce); en este proceso las sustancias químicas solo cambian su estado.

Figura 27. Batería en descarga



Nota. Adaptado de *Manual de baterías de arranque*, por Van Zandweghe Hnos, s.f..

Los diseños de baterías de plomo contienen un electrodo positivo de dióxido de plomo (PbO_2) y un electrodo negativo de plomo metálico (Pb) y el material en ambas placas es altamente poroso para maximizar el área de superficie. (Cueva, Lucero, Guzmán, Rocha, & Espinoza, 2018)

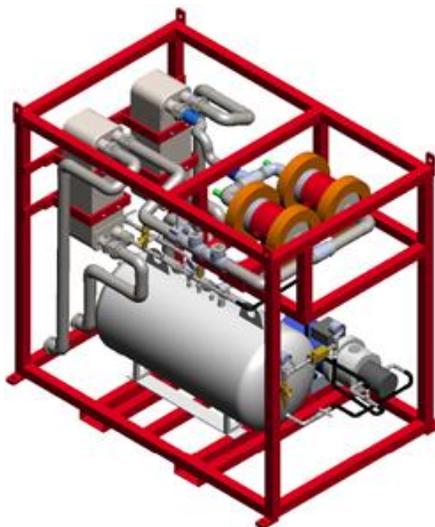
3 Desarrollo de ingeniería eléctrica

El presente capítulo muestra el desarrollo de ingeniería básica y de detalle del sistema eléctrico del Ciclo Binario IDEA 10 elaborado en laboratorios del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

3.1 Ciclo Binario IDEA 10

La relevancia de la inserción de los ciclos binarios en México, en especial para la explotación del gran potencial geotérmico de baja entalpía con el que cuenta México, así como para el aprovechamiento de fuentes residuales de calor en el sector industrial, ha impulsado al grupo IIDEA de la UNAM a diseñar y experimentar con sistemas ORC de baja potencia, siendo el Ciclo Binario IDEA 10 (Figura 28) el proyecto con el cual se incursione en la generación eléctrica empleando geotermia, sentando las bases para el desarrollo a futuro de Ciclos Binarios de media y alta potencia que puedan ser comerciables tanto en México como en el extranjero, además de servir como fuente de energía eléctrica para diversos proyectos del grupo y de esa manera dejar de depender de fuentes de energía fósil.

Figura 28. *Ciclo Binario IDEA 10*



Nota. Adaptado de Planos de diseño de nuevas líneas de tubería de módulo de ciclo binario IDEA 10, por Encarnación, J., 2021.

IDEA 10 está compuesto por un tanque de almacenamiento, un intercambiador de calor de placas planas, una placa orificio, un separador de flujos bifásicos, una bomba dosificadora, 2 turbogeneradores (generadores con álabes), accesorios y conexiones flexibles con un diseño para producir hasta 10kWe, usando calor residual como fuente energética y agua de enfriamiento como sumidero del proceso; el proceso evita el uso directo del fluido geotermal, por lo que toma el fluido de trabajo R245fa, el cual es bombeado y llevado al intercambiador de calor que transfiere el calor para evaporar el fluido de trabajo que posteriormente fluye a alta presión hacia los álabes de los generadores; los cuales producirán corriente alterna, finalmente el vapor saliente de la turbina se dirige a un condensador que cambia su estado gaseoso a líquido y de esta manera permite reiniciar su ciclo. El ciclo opera con un flujo de 1kg/s, una presión de entrada a los turbogeneradores de 13bar y 2.4bar en presión a la salida.

El apartado eléctrico del Ciclo Binario está compuesto por varios dispositivos eléctrico-electrónicos encargados de transportar, procesar y distribuir la corriente alterna para su consumo, dicha corriente es otorgada por los generadores y mediante líneas de distribución pasa al apartado de rectificación y regulación para convertirla en corriente directa y nivelarla a los niveles de tensión admisibles para el inversor de corriente en el panel eléctrico, el cual se encargara de convertir la corriente directa en corriente alterna de onda sinusoidal pura, que es segura para alimentar equipos electrónicos a diferencia de la primer corriente alterna generada.

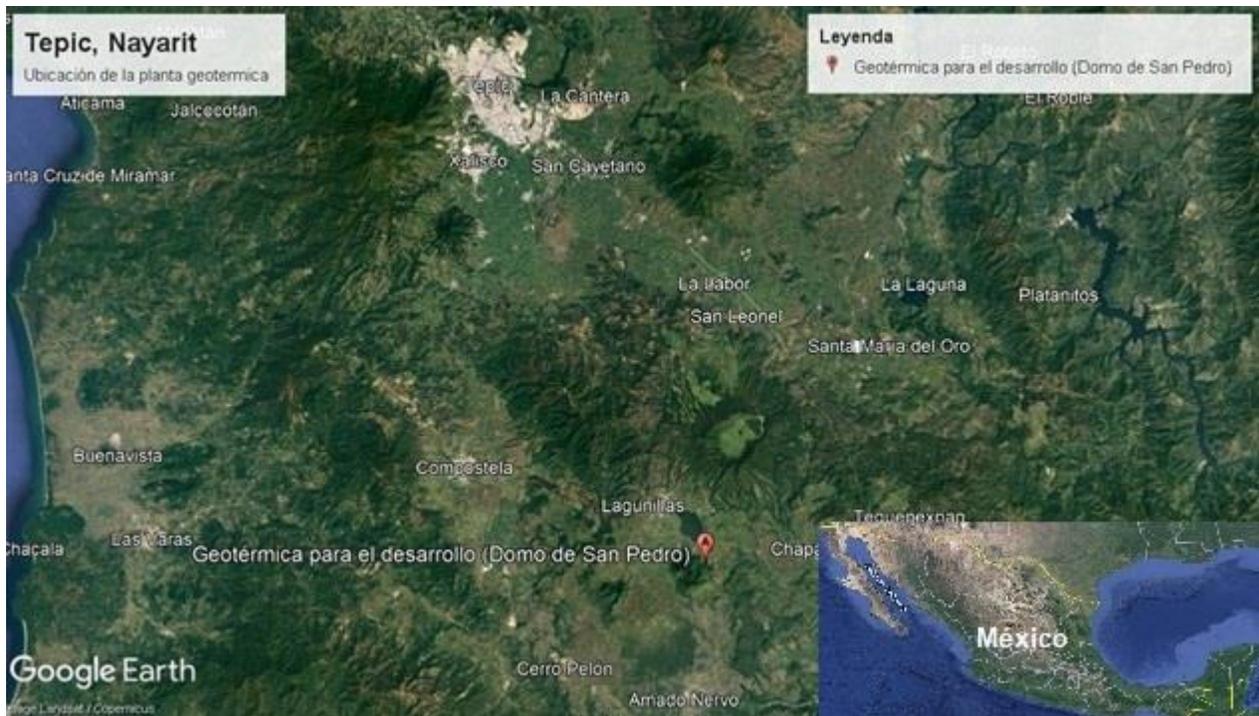
3.2 Desarrollo de ingeniería básica

El desarrollo de la ingeniería básica define los lineamientos generales de un proyecto, teniendo como objetivo principal recopilar información que permita definir los procesos, equipos y demás especificaciones para las fases de ingeniería de detalle, por lo tanto, se llevó a cabo la elaboración de un diagrama geográfico, la caracterización del generador eléctrico, memorias técnico – descriptivas y memorias de cálculo para diseñar el panel eléctrico del ciclo binario, identificando diversos parámetros operativos que permitieron obtener información para la elaboración de diagramas unifilares.

3.2.1 Diagrama geográfico

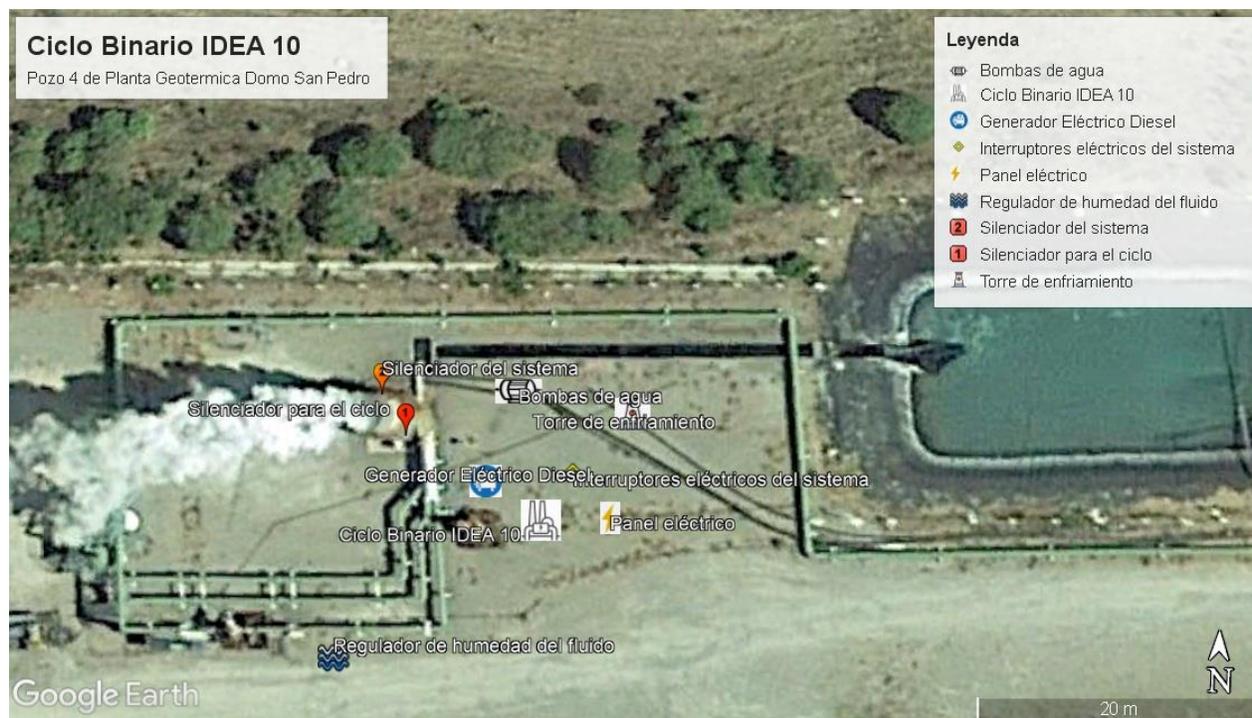
El ciclo binario IDEA 10 fue instalado en el pozo 4 de la Central Geotérmica Domo San Pedro en Tepic, Nayarit, perteneciente a Grupo Dragón (Figura 29); el diagrama geográfico de la Figura 30 muestra la localización de la central eléctrica, indicando sus coordenadas geodésicas (latitud: 21° 11' 18.24" N y longitud: 104° 43' 44.08" O) y la ubicación del equipo involucrado en el proyecto.

Figura 29. Ubicación de Central Geotérmica Domo San Pedro



Nota. Adaptado de *Google Earth*, por Google Earth, 2022.

Figura 30. Diagrama Geográfico



Nota. Adaptado de *Google Earth*, por Google Earth, 2022.

3.2.2 Diagramas unifilares simplificados

El diagrama unifilar simplificado muestra de forma general la instalación eléctrica e incluye información básica de los equipos con la finalidad de ser una guía para la dirección del proyecto. La realización de este diagrama fija las bases para el desarrollo de un diagrama unifilar detallado, en el que se encontraran términos más específicos para los equipos del sistema.

De acuerdo con el Manual para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga de la Secretaría de Energía, 2018, el diagrama unifilar deberá realizarse en el software AutoCAD y siguiendo las indicaciones de la NOM-001-SEDE-2012, además de usar normas internacionales como IEEE 315 (Graphic symbols for electrical and electronic diagrams), ANSI Y32 (American National Standard Graphic Symbols for Electrical Wiring and Layout Diagrams Used in Architecture and Building Construction) y CSA Z99 (Canadian Standard Association for Graphic symbols for electrical and electronic diagrams), las cuales eliminan todo

riesgo de confusión y facilita el estudio, la puesta en servicio y el mantenimiento de las instalaciones.

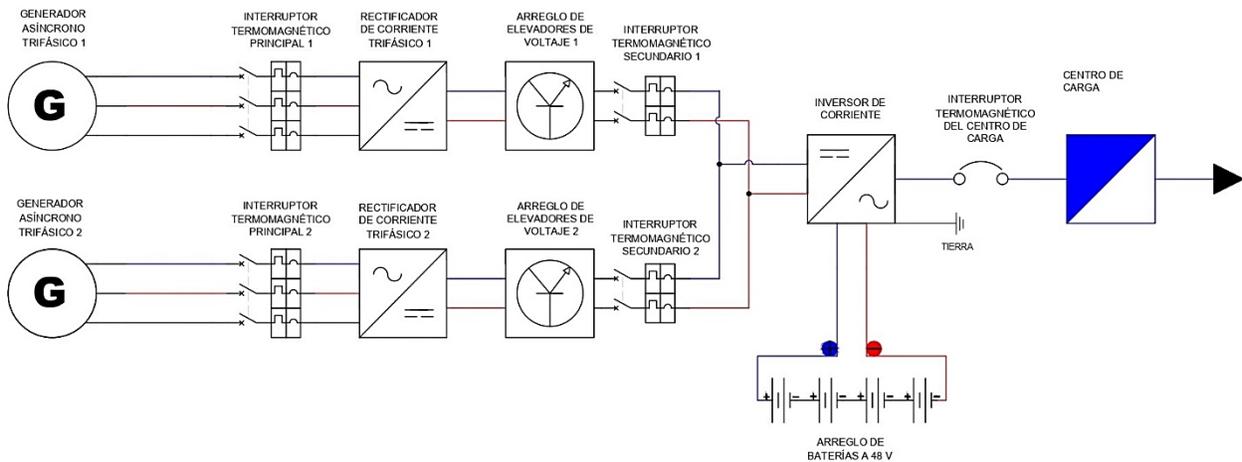
Considerando estos aspectos se realizaron los diagramas unifilares del sistema eléctrico y de la caracterización de los generadores en laboratorio.

3.2.2.1 Diagrama Unifilar Simplificado del Sistema Eléctrico

Mediante este diagrama unifilar se realiza la coordinación de todo aquel componente que se encuentre conectado a otro dispositivo y plantea el equipo a usarse en la instalación eléctrica.

El diagrama unifilar de la Figura 31 muestra el sistema eléctrico general; en él pueden observarse las etapas del procesamiento de corriente para un Ciclo Binario con dispositivos interconectados entre sí y sus respectivas protecciones. La realización de este diagrama marca el alcance de cada dispositivo, con lo que se logra establecer el punto de partida para realizar la selección de cada equipo y componente.

Figura 31. Diagrama Unifilar Simplificado del Sistema Eléctrico



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

Nota. El diagrama unifilar simplificado puede ser consultado en el Anexo 1.

3.2.2.2 *Diagrama Unifilar Simplificado de la Caracterización del Generador*

Para llevar a cabo la caracterización y determinar las características peculiares del generador, es necesaria la integración de dispositivos y componentes que sometan al generador a distintas condiciones de trabajo. La realización del diagrama unifilar tiene el objetivo de marcar las conexiones entre el módulo de potencia, módulo de carga y módulo de medición para su posterior armado y puesta en marcha.

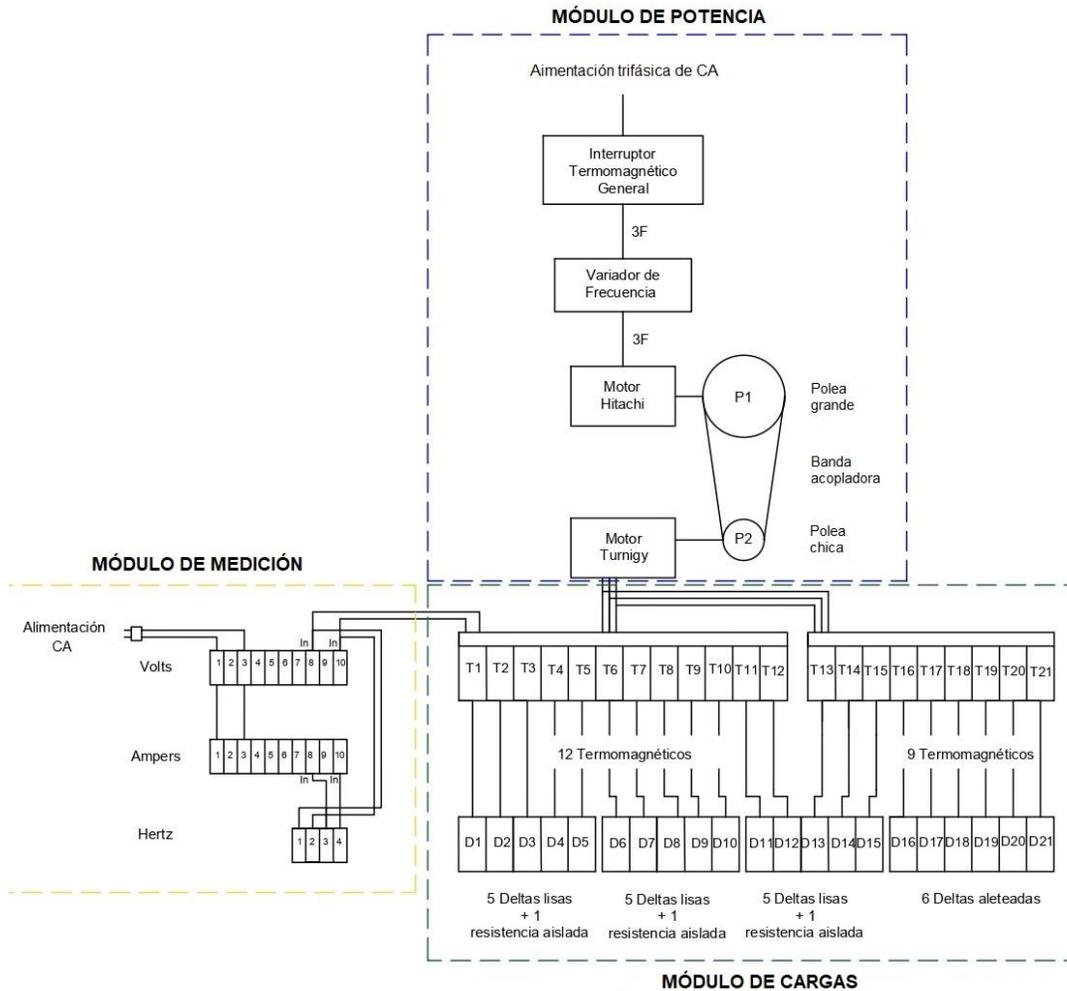
El diagrama unifilar de la Figura 32 expone el sistema de caracterización con datos técnicos generales que sirven para comprender el proceso de obtención de parámetros. La realización de este diagrama marca el alcance de cada dispositivo, con lo que se logra establecer el punto de partida para realizar la selección de cada equipo y componente que permita someter al generador a condiciones operativas óptimas para su caracterización.

Módulo de potencia: La fase inicia al alimentar un variador de frecuencia encargado de la activación de un motor de inducción a distintos niveles de frecuencia, posteriormente el motor de inducción proporciona giro al rotor del generador a caracterizar, mediante un arreglo de poleas.

Módulo de carga: Consiste en simular la demanda de carga de dispositivos electrónicos. La potencia generada será proporcional a la demanda de carga y velocidad de giro en el generador. El módulo de carga está conformado por un arreglo de resistencias en configuración delta e interruptores de activación.

Módulo de medición: Su finalidad es monitorear los parámetros de tensión, corriente, velocidad y temperatura mediante un voltímetro, amperímetro, tacómetro y termómetro infrarrojo.

Figura 32. Diagrama Unifilar Simplificado de la Caracterización del Generador



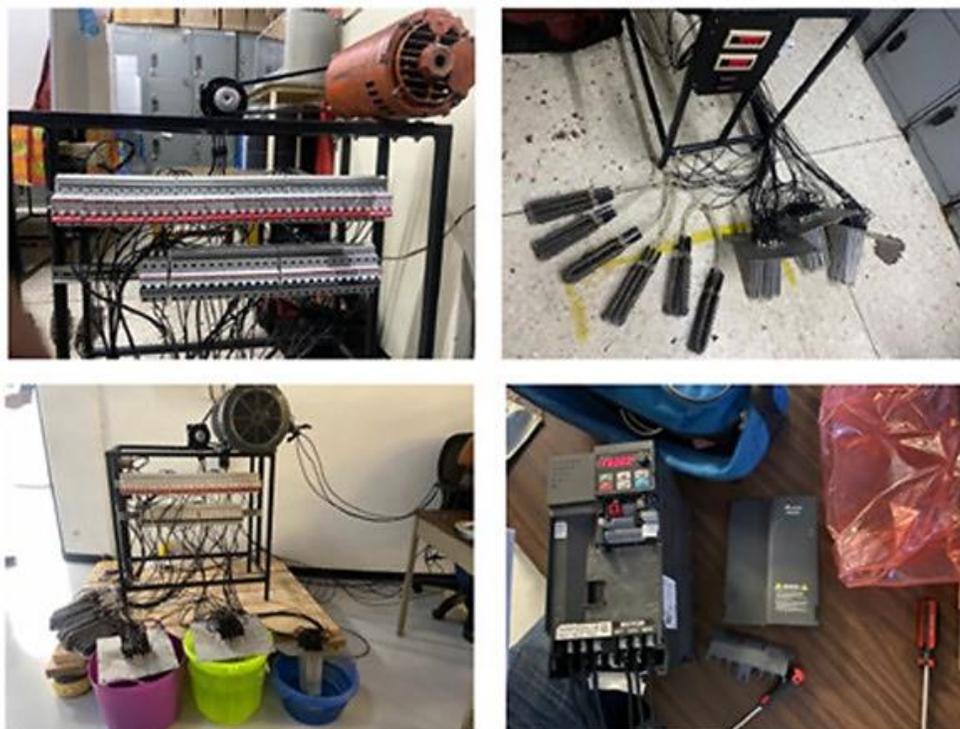
Nota. El diagrama unifilar simplificado puede ser consultado en el Anexo 2 (AutoCAD).

3.2.3 Caracterización del generador eléctrico

En el sistema eléctrico de un ciclo binario cada uno de los dispositivos que lo conforman son indispensables para su correcto funcionamiento, sin embargo, es el generador eléctrico el corazón del sistema, ya que a partir de la corriente eléctrica otorgada por este, se derivarán las especificaciones técnicas del resto de equipos, que permitan determinar parámetros de tensión y corriente máxima admisible, por tal motivo, la caracterización del generador eléctrico tiene el objetivo principal de identificar los parámetros de tensión y corriente a distintas cargas

demandadas, considerando su temperatura y factor de potencia, posteriormente dichos parámetros servirán para calcular la potencia activa, aparente y reactiva, con las que se podrán establecer los valores máximos de potencia admisible para la selección del inversor de corriente y el resto de componentes.

Figura 33. *Pruebas de caracterización*



Nota. Fotografías propias.

3.2.3.1 *Módulo de potencia*

Este apartado cuenta con una alimentación trifásica de 220VCA que suministra energía en primera instancia a un variador de frecuencia de la marca BENSRAW de 10HP a 220VCA y 11.8A de entrada, dicho dispositivo tiene la capacidad de variar la frecuencia desde 0.01 hasta 400Hz, con lo que se podrá someter al motor de inducción HITACHI (4HP, 220VCA) a altas velocidades que permitan realizar un giro al generador Turnigy (12,000RPM máximo), mediante un arreglo de poleas de 8-10plg para el motor de inducción y de 2plg para el generador, que estarán unidas por una banda de acoplamiento tipo V.

El generador empleado fue el Turnigy Rotomax 150cc (Figura 34), un motor eléctrico asíncrono sin escobillas usado para dar giro a las hélices de aviones de radiocontrol. Las condiciones operativas previstas, indican que la presión del fluido de trabajo que proporciona el giro en los álabes del generador es variable, ya que no siempre se otorgarán los mismos niveles de fluido de las fuentes residuales de calor, por lo que el uso de una máquina asíncrona es indispensable. Al no poseer escobillas, no podrán provocar un calentamiento mayor y chispas que causen inflamación, además de evitar la necesidad de un mantenimiento regular, ya que es un sistema que deberá operar por largos periodos de tiempo.

Para la caracterización de los generadores se empleó un banco de cargas eléctricas, conformado por resistencias térmicas, las cuales simularán ser dispositivos de demanda de potencia.

Figura 34. *Generador Turnigy Rotomax 150 CC*



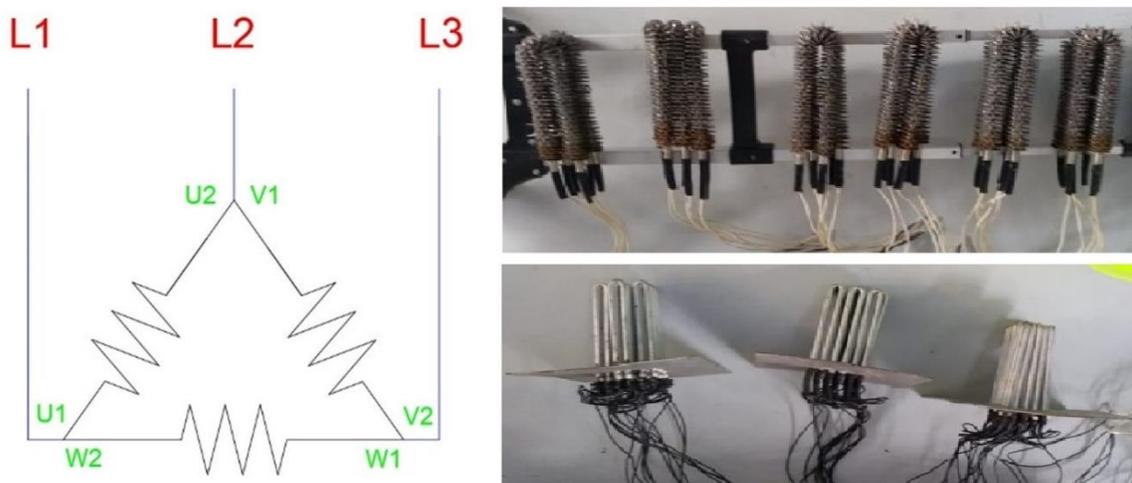
Nota. Fotografía propia.

3.2.3.2 Módulo de carga

Lo integraron un banco de cargas eléctricas conformado por 21 interruptores termomagnéticos trifásicos (I_n : 40A, V_n : 230/400V I_{cn} : 6kA, F: 50/60Hz), acoplados a un bus de hilos conductores y 21 módulos de resistencias en configuración delta, cuyos valores por resistencia son 50V, 300W y 11Ω .

Las deltas fueron conformadas por tres resistencias que unen sus extremos con las otras resistencias, formando tres nodos que van conectados a un cable por donde fluye la corriente de cada fase proveniente de los interruptores (Figura 35). La función de los interruptores termomagnéticos fue permitir el paso de la corriente proveniente del generador a los arreglos en delta y estos se accionaran manualmente cada que se requiriera aumentar o disminuir la demanda de carga.

Figura 35. Resistencias en conexión delta



Nota. Elaboración (AutoCAD) y fotografías propias.

3.2.3.3 Módulo de medición

Los dispositivos que lo conformaron fueron un voltímetro y un amperímetro, los cuales tomaron tensiones y corrientes respectivamente en el bus de hilos conductores de los interruptores, por otro lado, el tacómetro y el termómetro infrarrojo tomaron velocidades y temperaturas a una distancia de aproximadamente 5cm del generador en estado operativo.

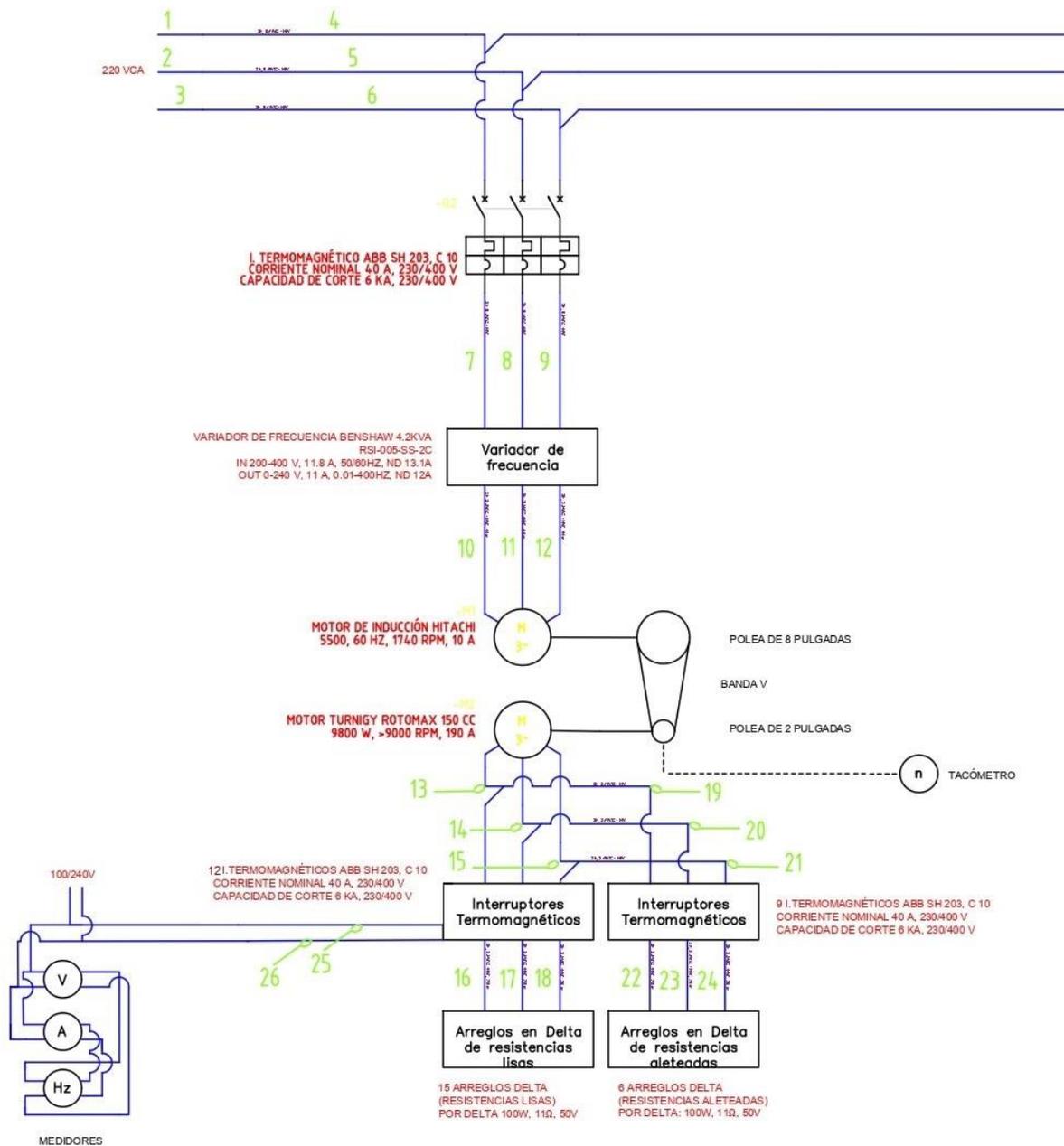
3.2.3.4 Diagrama Unifilar Detallado de la Caracterización

El desarrollo de este diagrama toma de principal referencia al diagrama unifilar simplificado y lo descrito en los módulos de potencia, cargas y medición de la caracterización, en donde se determinan los dispositivos y componentes necesarios para la obtención de parámetros, en este diagrama se muestran aspectos particulares, que permiten la fácil interpretación de cada dispositivo y componente del sistema, además de ser el plano final para el armado del sistema de caracterización, al ser un sistema para realizar pruebas, solo tiene la finalidad de ser un documento de referencia para la explicación del proceso de caracterización.

Datos de instalación:

- Motor Turnigy Rotomax 150CC.
- Motores trifásicos de inducción de 2 y 4HP, 220V.
- Banda de acoplamiento tipo V.
- Polea de 10plg de diámetro.
- Polea de 8plg de diámetro.
- Polea de 2plg de diámetro.
- Variador de frecuencia 10HP, 220V.
- Todo conductor del sistema cuenta con cableado calibre 8 AWG (50A).
- 22 interruptores termomagnéticos trifásicos, In: 40A, Vn: 230/400V Icn: 6kA, F: 50/60Hz.
- 21 arreglos de resistencias en delta 50V, 300W e 12Ω .
- Bus de hilos conductores.
- Módulo de medición (Voltaje, corriente, frecuencia, temperatura, velocidad).
- Tensión de la red U: 220VCA.
- Tensión nominal de interruptores termomagnéticos Vn: 230/400VCA.
- Corriente nominal de corte del interruptor termomagnético In: 40ACA.
- Corriente máxima en situación de trabajo IB: 11.8A.
- Corriente admisible por el cable Iz: 50A.
- Corriente de cortocircuito nominal Icn: 6kA.
- Corriente de cortocircuito de la instalación Icc: 0.2116kA.

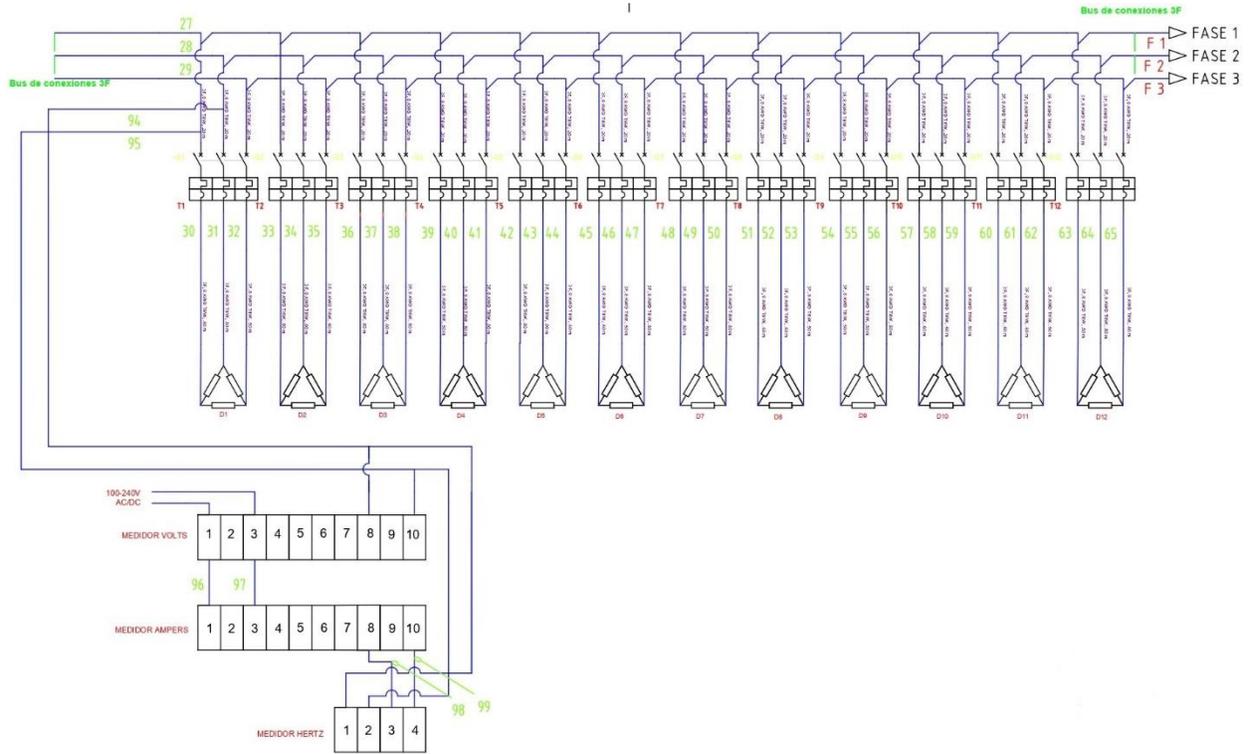
Figura 36. Diagrama Unifilar Detallado de la Caracterización



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

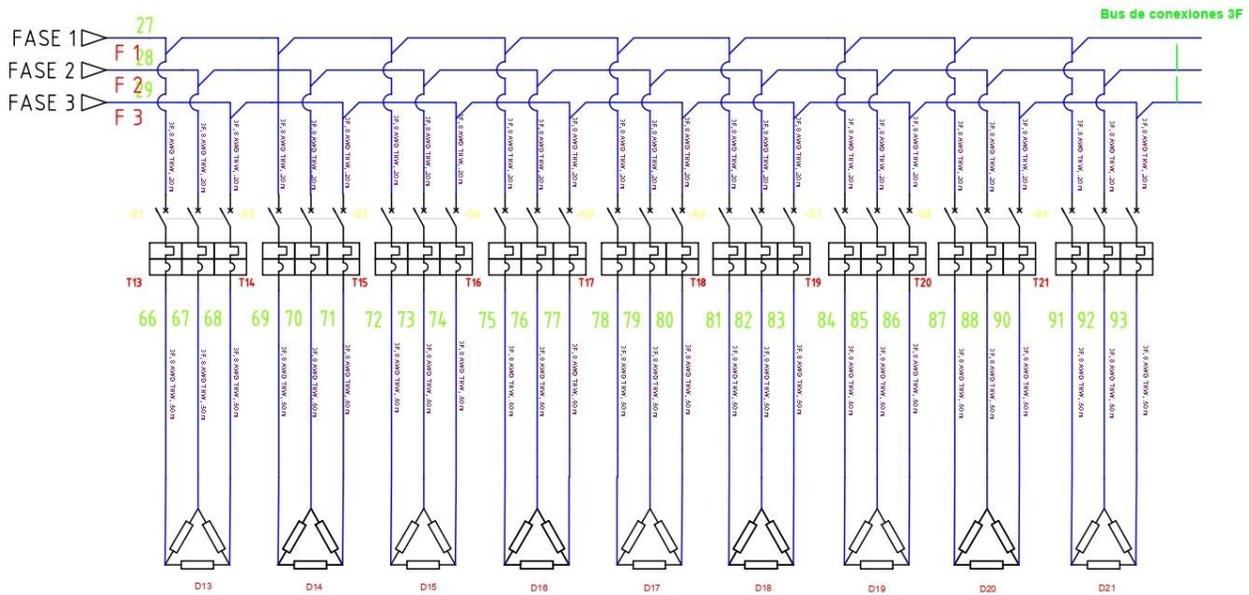
Nota. El diagrama unifilar detallado puede ser consultado en el Anexo 3.

Figura 37. Diagrama Unifilar Detallado de la Caracterización - 12 Deltas



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

Figura 38. Diagrama Unifilar Detallado de la Caracterización - 9 Deltas



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

3.2.3.5 Pruebas

Las pruebas se realizaron en las instalaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM y se compusieron por 4 pruebas. Las pruebas 1, 2 y 3 sirvieron para visualizar el estado de funcionamiento general del sistema y corregir fallas para la correcta medición de los parámetros. El banco de cargas permitió medir corrientes, tensiones, temperaturas y velocidades, mediante la conexión de cargas resistivas.

Antes de conectarse a la toma de corriente se realizó el acople de un interruptor termomagnético de seguridad al variador de frecuencia, este dispositivo se encargó de variar la velocidad del motor de inducción que proporcionó el giro al generador mediante una banda de acople V unida a las poleas de las máquinas. Cada cable saliente del generador fue conectado a un bus de hilos conductores que conectaron con los interruptores termomagnéticos correspondientes a cada uno de los arreglos delta, que se posicionaron en contenedores de agua.

3.2.3.6 Prueba 1

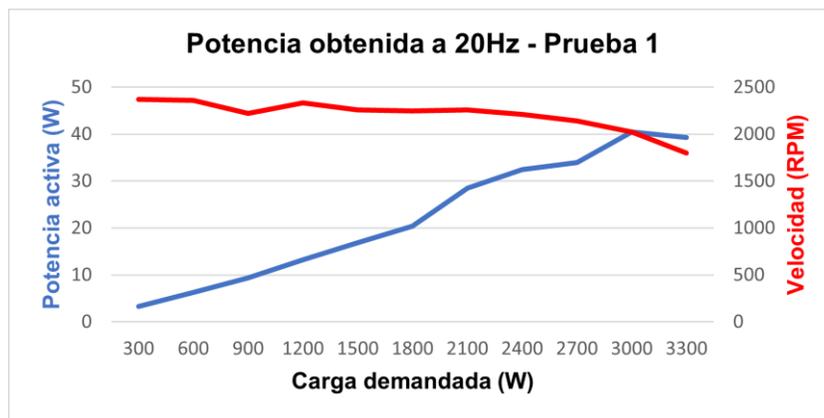
Primeramente, se verificó que todas las entradas y salidas de los distintos dispositivos estuvieran correctamente conectadas, posterior a esto, se alimentó el sistema mediante una fuente de 220V y se activó el variador de frecuencia a 20Hz el cual accionó al motor de inducción de 2HP; una vez que el motor de inducción comenzó a trabajar, la transmisión de trabajo se llevó a cabo mediante la banda de transmisión que dio giro al rotor del generador y en consecuencia generó corriente eléctrica, que pasó al interruptor general del banco, el cual se accionó, dejando pasar la corriente al bus de hilos conductores y por ende a la entrada de los interruptores, posteriormente se activaron uno por uno dejando pasar corriente hacia las deltas y se realizó la toma de mediciones de corriente y tensión por medio de un multímetro, la temperatura con un termómetro infrarrojo digital y la velocidad con la ayuda de un tacómetro, una vez llevada a cabo la toma de mediciones, se cortó el suministro de corriente hacia las deltas mediante los interruptores y se ajustó la velocidad de giro del generador a 40, 60 y 80Hz, para repetirse la misma toma de parámetros hasta un máximo de 3300We de potencia, finalmente, se cerraron cada uno de los interruptores, se detuvo el funcionamiento del variador y se desconectó la fuente de poder.

En las Figuras 39, 40, 41 y 42 se muestran los gráficos de la caracterización del generador a determinada carga demandada y se observa que en la prueba 1 a 20Hz se alcanzó la potencia activa máxima a 3000We de demanda. En los 4 escenarios planteados, la velocidad del sistema tiende a disminuir de forma gradual conforme aumenta la potencia activa obtenida.

La potencia activa durante esta prueba fue muy baja y no cumplió con lo esperado, debido a que el motor de inducción de 2HP no proporcionó un torque suficiente al generador.

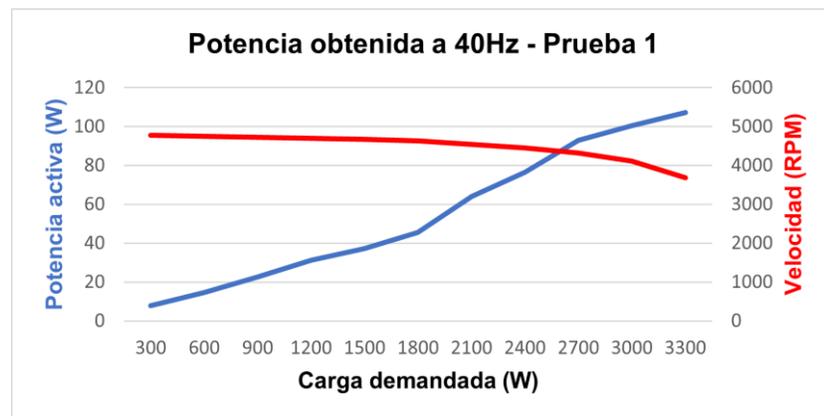
NOTA: Los parámetros registrados para esta prueba se encuentran en el Anexo 4.

Figura 39. Prueba 1 a 20Hz



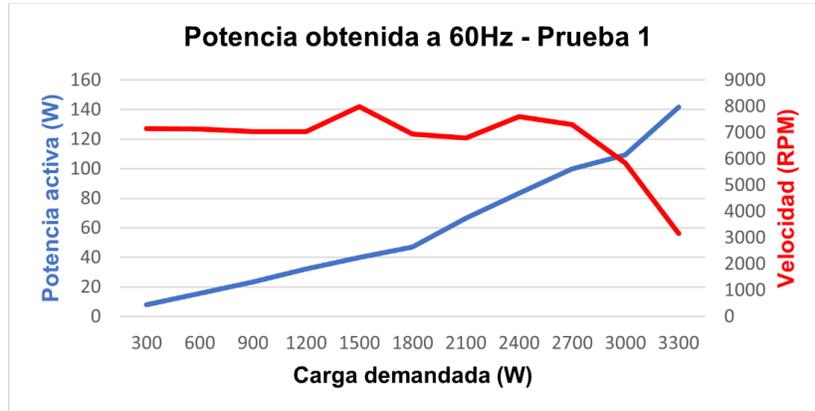
Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 40. Prueba 1 a 40Hz



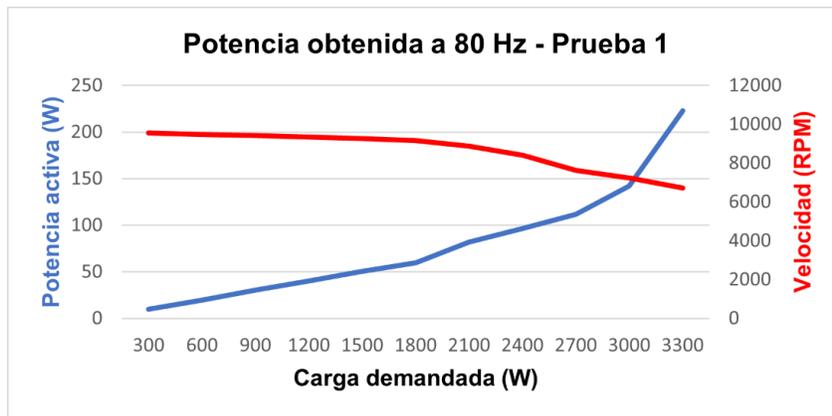
Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 41. Prueba 1 a 60Hz



Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 42. Prueba 1 a 80Hz



Nota. Elaboración propia (Excel).

3.2.3.7 Prueba 2

Siguiendo los mismos pasos que en la prueba 1, se llevó a cabo la segunda prueba, cambiando el motor de inducción de 2HP por uno de 4HP a manera de proporcionar una mayor velocidad al generador y por ende, pudiera alcanzar niveles de entrega de potencia mayores.

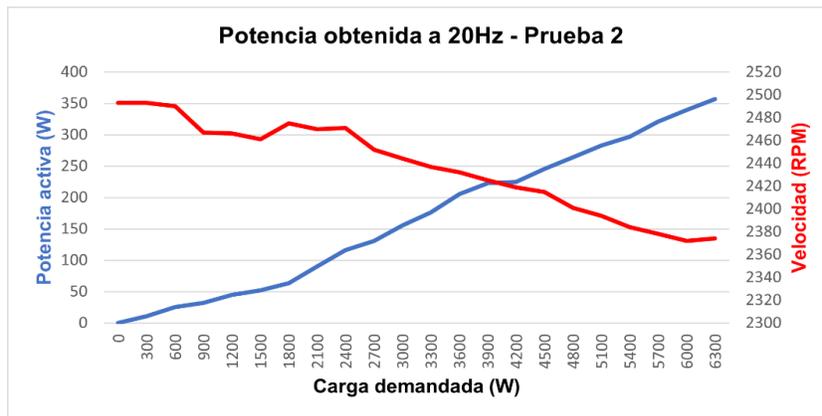
Para velocidades de 20 y 40Hz se demandó una carga máxima de 6300We, para 60Hz se demandaron 3600We y para 80Hz se demandó un total de 2700We; el motivo por el cual la carga

demandada fue disminuyendo fue porque la banda de transmisión V presentó gran inestabilidad a través del tiempo, por lo que se decidió no someter el sistema a cargas más altas.

En las Figuras 43, 44, 45 y 46 se muestran los gráficos de la caracterización del generador a determinada carga demandada; observando el mismo comportamiento de la relación potencia activa – velocidad que en la prueba 1, además, durante esta prueba se observó que el sistema presento un comportamiento más óptimo a 80Hz.

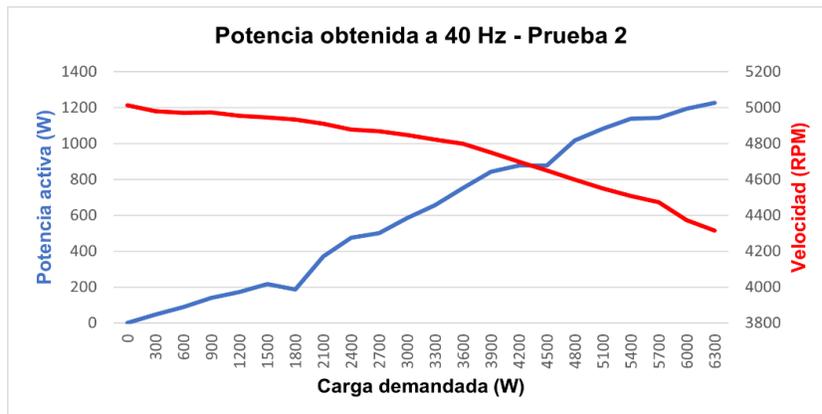
NOTA: Los parámetros registrados para esta prueba se encuentran en el Anexo 5.

Figura 43. Prueba 2 a 20Hz



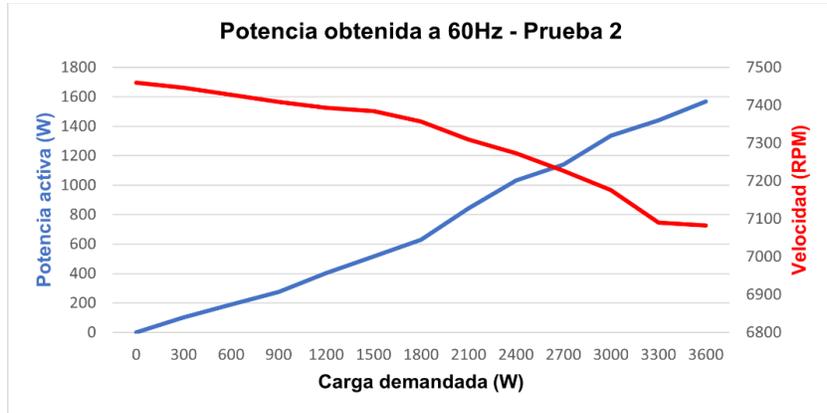
Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 44. Prueba 2 a 40Hz



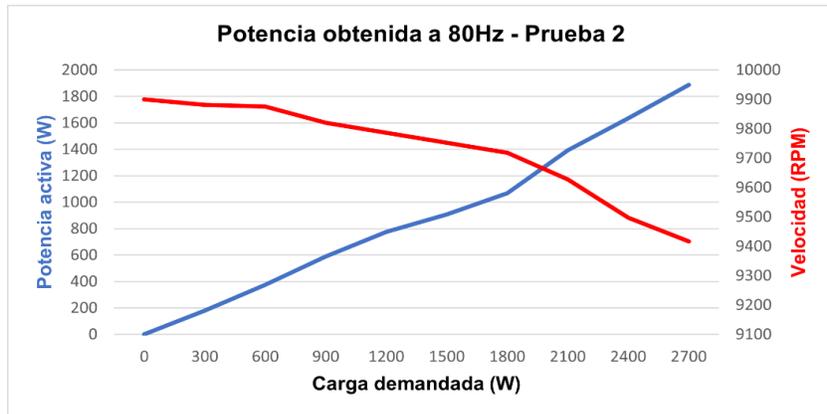
Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 45. Prueba 2 a 60Hz



Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 46. Prueba 2 a 80Hz



Nota. Elaboración propia (Excel).

3.2.3.8 Prueba 3

Siguiendo los mismos pasos que en las pruebas anteriores, se llevó a cabo la tercera prueba, esta vez cambiando la polea del motor de inducción por una de 10plg (anteriormente 8plg) y conservando la de 2plg del generador con la finalidad de obtener un mayor torque y conservar una buena estabilidad en la banda de transmisión.

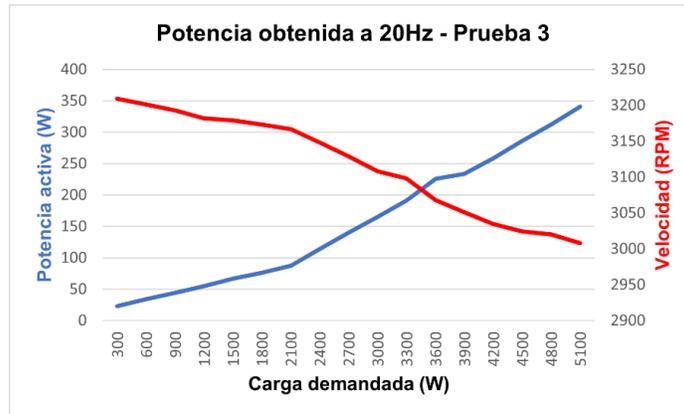
Para velocidades de 20 y 40Hz se demandó una carga máxima de 5100We, para 60Hz se demandaron 4800We y para 70Hz se demandó un total de 3300We; el motivo por el cual la carga

demandada disminuyó, fue porque el generador eléctrico no debía superar una temperatura mayor a 60°C, siendo este parámetro la indicación para no exceder al generador a más carga.

En las Figuras 47, 48, 49 y 50 se muestran los gráficos de la caracterización del generador a determinada carga demandada; en las imágenes se observa un comportamiento similar al de las pruebas anteriores con la particularidad de que en esta, la potencia activa generada fue más grande e igualmente, ante la frecuencia mayor sometida se obtuvieron los parámetros óptimos, sin rebasar los límites de temperatura y velocidad a los que se encontró restringido el generador.

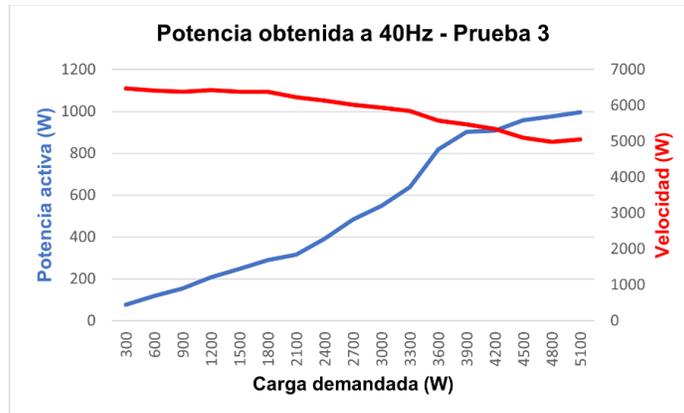
NOTA: Los parámetros registrados para esta prueba se encuentran en el Anexo 6.

Figura 47. Prueba 3 a 20Hz



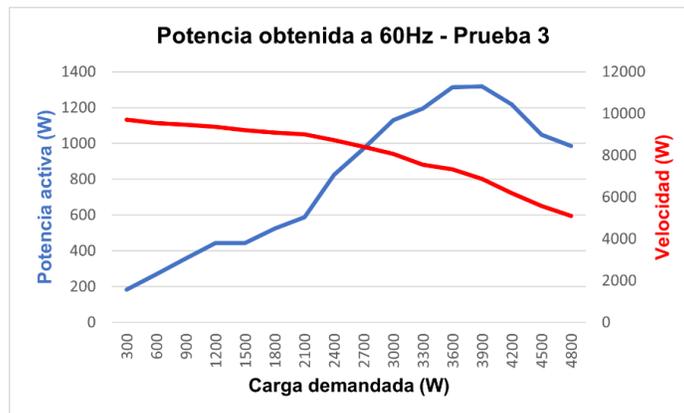
Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 48. Prueba 3 a 40Hz



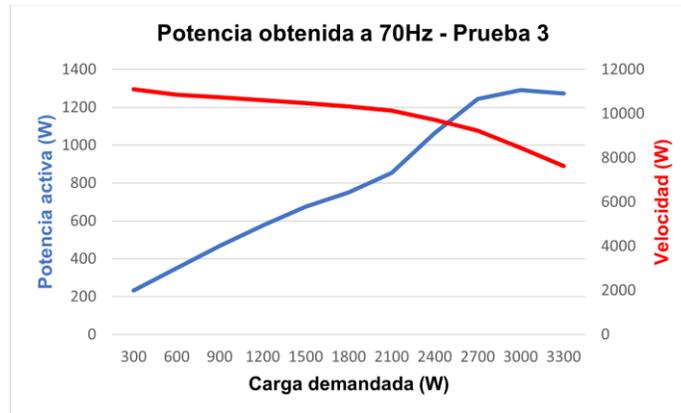
Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 49. Prueba 3 a 60Hz



Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 50. Prueba 3 a 70Hz



Nota. Elaboración propia (Excel).

3.2.3.9 Análisis general de pruebas operativas

Los resultados se determinaron en base a la carga demandada y la obtención de la potencia activa (P) que es la potencia que en proceso de transformación en energía eléctrica se aprovecha como trabajo y representa la potencia generada, la potencia reactiva (Q), que es la que se intercambia de manera continua entre fuente – carga y, por último, la potencia aparente (S), que es la que parece ser suministrada a la carga si se ignoran las diferencias de ángulo de fase entre el voltaje y la corriente.

Potencia activa:

$$P = \sqrt{3} * VL * IL * \cos \theta [W]$$

Donde:

P = Potencia activa generada

V_L = Voltaje de línea

I_L = Corriente de línea

$\cos \theta$ = f.p. (Factor de potencia del generador)

Potencia reactiva:

$$Q = \sqrt{3} * VL * IL * \sen \theta [var]$$

Donde:

Q = Potencia reactiva

V_L = Voltaje de línea

I_L = Corriente de línea

$\text{sen } \theta$ = Ángulo de impedancia de la carga

Potencia aparente:

$$S = \sqrt{3} * V_L * I_L [VA]$$

Donde:

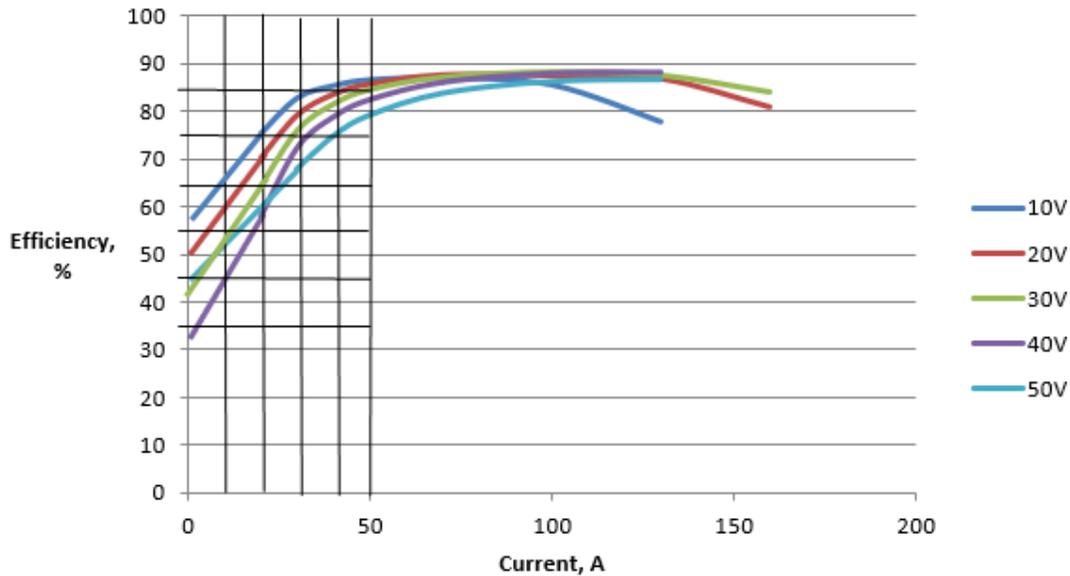
S = Potencia aparente

V_L = Voltaje de línea

I_L = Corriente de línea

En la Figura 51 se muestra el gráfico de eficiencia ante voltaje y corriente del generador, perteneciente a pruebas hechas por Hobby King, donde se observa que los mejores rangos de eficiencia del generador se encuentran entre 86 y 88% a voltajes de 10 a 40V y corrientes de 80 a 100A.

Figura 51. Gráfico de eficiencias del generador

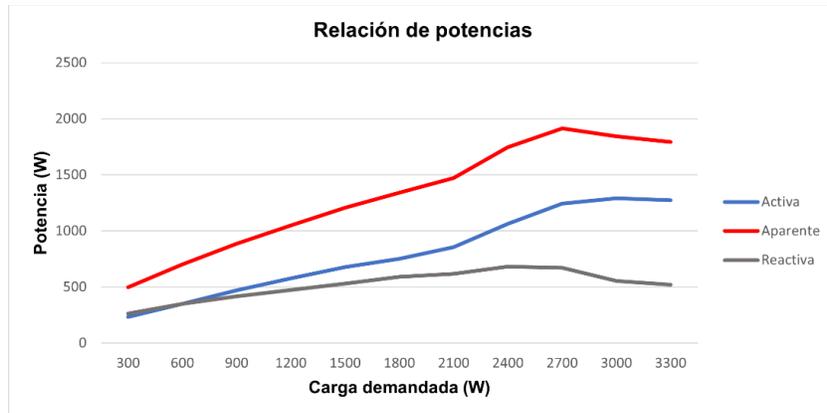


Nota. Adaptado de Characterisation of the Turnigy 150cc equivalent brushless out runner DC motor, por Hobby King, 2014

Los parámetros de respuesta del generador caracterizado bajo condiciones escalonadas, mostraron un mejor desempeño a frecuencias altas, lo que puede traducirse a altas velocidades de operación. El mejor escenario en estas pruebas se obtuvo a 70Hz al demandar 3000We, obteniendo una tensión de 39V y una corriente de 27.3A con una temperatura estable de 60°C y una potencia activa generada de 1290We, en una eficiencia de 70% y potencia aparente de 1844We a la que se podría acercar bajo condiciones operativas mejores.

Si bien, dentro del sistema eléctrico de un ciclo binario todos sus componentes son importantes, el generador eléctrico es el dispositivo sobre el que recaerá la mayor parte de la responsabilidad, por ser el dispositivo encargado de entregar la corriente eléctrica generada al resto del sistema eléctrico para el diseño de su respectivo panel eléctrico que se encargará de realizar la transmisión, rectificación, regulación e inversión de la corriente eléctrica generada para su uso.

La Figura 52 muestra la relación de potencias ante el mejor escenario realizado, donde se observa un máximo desempeño a 3000We de demanda con 1290We de potencia activa.

Figura 52. *Relación de potencias*

Nota. Elaboración propia (Excel).

3.2.4 Memoria técnico-descriptiva

La memoria técnico-descriptiva del sistema eléctrico del Ciclo Binario IDEA10 reúne información sobre la descripción de la instalación, como su ubicación, equipos, procedimientos, memorias de cálculo (dimensionamiento de conductores, coordinación de protecciones, sistema de tierra) y diagramas unifilares.

3.2.4.1 Selección de inversor de corriente

La demanda de carga máxima para el ciclo binario será de 6kWe, empleando dos generadores en una configuración en paralelo, por lo que el sistema de inversión de corriente deberá soportar dicha demanda y realizar la conversión de corriente directa a corriente alterna que sea de onda sinusoidal pura y garantice la sincronización con la red a fin de garantizar una energía de calidad.

El dispositivo que cumple con estas características es el inversor de corriente Growatt modelo SFP 6000T DVM (Figura 53), es un equipo diseñado para sistemas fotovoltaicos al que se le pueden demandar hasta 6kWe, posee un compartimiento para una alimentación de una fuente principal y una fuente secundaria, además de una entrada de baterías de 48VCD; el dispositivo entrega parámetros programables en una onda sinusoidal pura de 104-110-115-120 / 208-220-230-240VAC a 50/60Hz con una frecuencia de +/- 0.3Hz y es capaz de realizar una sincronización con

la red eléctrica acoplándose a lo que dicte el CENACE y la CFE. Los requisitos operativos para el funcionamiento de dicho dispositivo son los siguientes:

Tabla 9. *Requisitos operativos para el funcionamiento del inversor*

	Fuente principal de alimentación (CD)	Fuente secundaria de alimentación (CA)
Rango de voltaje de funcionamiento	60 – 145VCD	184 – 272VCA(UPS); 154 – 272VAC(APL)
Corriente máxima de carga	80ACD	60ACD
Rango de frecuencia		60Hz

Nota. Adaptado de *SPF 4000-12000T DVM/-MPV*, por Growatt, 2021.

Nota. La ficha técnica de este dispositivo puede ser consultada en el Anexo 7.

Figura 53. *Inversor de corriente GROWATT SPF 6000T DVM*



Nota. Fotografía propia.

3.2.4.2 Selección de rectificadores de corriente

Considerando los parámetros de entrega máximos por dos de los generadores caracterizados, se obtienen 39V y 27.3A RMS, con picos de 110.3V, por lo que la resistencia mínima necesaria en el circuito rectificador para que pueda operar sin riesgo alguno tendría que ser mayor a este. El equipo seleccionado que cumplió con dichas características operativas fue un puente rectificador trifásico de onda completa de 600V y 100A de marca genérica (Figura 54), el cual cumple la función de convertir la totalidad de la forma de onda de entrada en una polaridad constante en la salida, es decir, una corriente directa y es usado para control de automatización industrial y sistemas en general que requieran convertir una CA en CD.

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

$$V_p = V_{rms} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_p = 39V_{rms} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_p = 55.15V$$

$$V_{pp} = V_p \cdot 2$$

$$V_{pp} = 55.15V \cdot 2$$

$$V_{pp} = 110.3V$$

Figura 54. *Rectificador de corriente seleccionado*



Nota. Fotografía propia.

3.2.4.3 *Selección de elevadores de tensión*

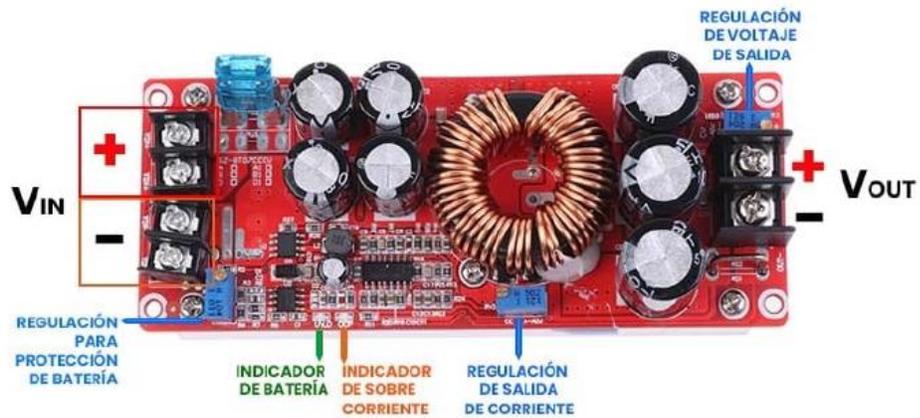
A partir de la tensión directa otorgada en los rectificadores, se realiza la selección de elevadores de tensión de paso alto o step up, los cuales deberán regular la tensión otorgada en el sistema de rectificación a una tensión aceptable para el sistema de inversión, el cual requiere un mínimo de 60V para funcionar. Los elevadores de paso alto seleccionados para cumplir con dicha tarea son usados en electrónica para corrientes directas y poseen un diseño de 1200We, 20A (Figura 55), estos reciben la corriente directa de los rectificadores y eliminan el rizado de la onda, para entregar una corriente directa de mejor calidad y como su nombre lo indica elevar la tensión a la salida a costa de disminuir la corriente.

El ensamblado de los elevadores constó de dos placas, una para cada generador con 7 elevadores conectados en paralelo (Figura 56) con la capacidad de conducir hasta 60V, 20A por cada elevador; la decisión se realizó considerando que el ciclo binario es un sistema de operación

continua, por lo que los elevadores de tensión deberán dividir la corriente que pasa por cada uno de ellos a un valor bajo y así se evite un sobrecalentamiento en los circuitos.

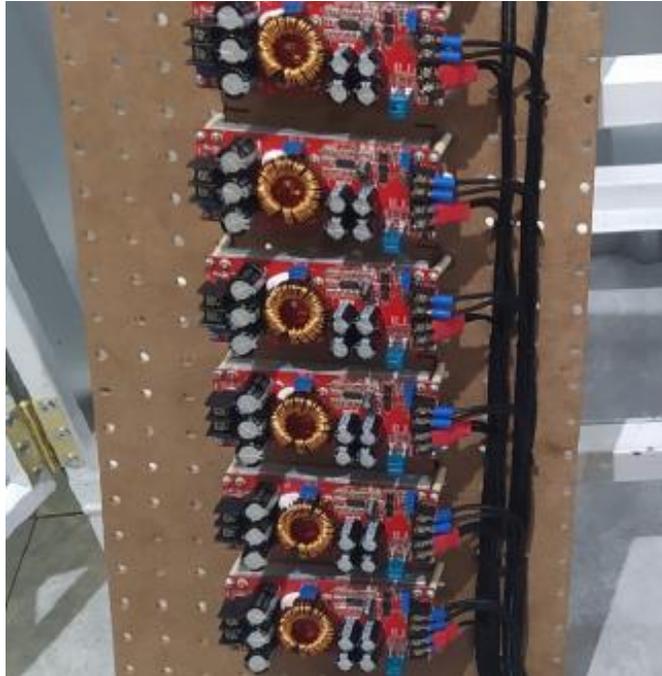
El diseño de esta etapa incluye componentes electrónicos que garantizan que el voltaje se mantenga en un parámetro fijo, siendo que para el inversor de corriente a usar se necesitarán 70V para evitar su apagado en caso de una variación de tensión que caiga por debajo de los 60V mínimos que requiere para funcionar.

Figura 55. Elevador de voltaje Step Up



Nota. Adaptado de *Elevador de Voltaje Step Up 1200W 20A*, por UNIT ELECTRONICS, s.f..

Figura 56. *Placa de elevadores de voltaje*



Nota. Fotografía propia.

3.2.4.4 *Selección del sistema de almacenamiento/amortiguamiento*

El uso de energía eléctrica para las pruebas a realizarse en el ciclo binario será alto, lo que hace necesario el uso de baterías como sistema de almacenamiento que le suministren energía, en caso de algún paro en los generadores y de amortiguamiento, al momento de llevar el encendido de los generadores. Este sistema deberá entregar un voltaje de 48VCD al inversor de corriente para poder ser compatible. Para lograr el criterio de compatibilidad se realizó un arreglo de 4 baterías de ciclo profundo en serie de 12V, 105Ah ($12V \times 4 = 48V$), considerando que en las pruebas a realizarse se llevarían a cabo repetidos ciclos de carga y descarga (Figura 57).

Nota. La ficha técnica de este dispositivo puede ser consultada en el Anexo 8.

Figura 57. Arreglo de baterías



Nota. Fotografía propia.

3.2.4.5 Dimensionamiento de protecciones y conductores

Esta memoria de cálculo determina las características del sistema de protecciones del área eléctrica que serán necesarios para garantizar la seguridad del personal y los dispositivos que conforman el panel del ciclo binario, así como también, la de determinar las características resistivas adecuadas para la conexión de los equipos.

Acorde a las especificaciones de los equipos, el dispositivo de protección que permite realizar la desconexión de líneas en el sistema para evitar daños ante sobrecargas y cortocircuitos es el interruptor termomagnético trifásico. El sistema eléctrico del ciclo cuenta con 5 interruptores termomagnéticos que protegen y realizan la desconexión de determinados sectores en los que existe un riesgo termomagnético, dichos interruptores se clasifican en principales, secundarios y de centro de carga.

Nota. El dimensionamiento de estos dispositivos siguió las condiciones establecidas en el capítulo 2.

Memoria de cálculo de protecciones y conductores principales

1. $V_n \geq U$

$$120/220VCA > 39VCA$$

2. $I_n \geq IB$

$$50ACA > 27.3ACA$$

3. $I_n \leq Iz$

$$50ACA = 50ACA$$

4. $I_{cn} > I_{cc}$

$$I_{cc3\Phi} = \frac{UL}{\sqrt{3} \cdot ZLF}$$

$$I_{cc3\Phi} = \frac{39VCA}{\sqrt{3} \cdot 800m\Omega}$$

$$I_{cc3\Phi} = 0.02814kACA$$

$$3kACA > 0.02814kACA$$

Donde:

$I_{cc3\Phi}$ = Corriente de cortocircuito trifásica (kA)

UL = Tensión de línea (V)

ZLF = Impedancia de la línea fase (mΩ)

5. Normalmente los motores y generadores consumen 6 veces corriente en el arranque que, durante el funcionamiento normal, por lo tanto, la protección a usarse deberá ser la de tipo C que se encuentra en el rango de corriente que provoca el accionamiento de la protección magnética de 5 a 10 veces la corriente nominal.
6. La energía que la protección deja pasar a la carga en una situación de cortocircuito antes del relevo es un criterio que no concierne a este proyecto al tener un bajo valor de I_{cc} , sin embargo, el interruptor termomagnético a usar es utilizado principalmente en la

industria eléctrica, por lo que posee una clase 3, que es la que menos energía transfieren a la carga en una situación de cortocircuito.

El dimensionamiento del cableado eléctrico está medido por su capacidad resistiva, por lo que el amperaje que soporta determinará su calibre (50ACA – 8AWG) y las condiciones de su entorno determinarán su tipo de aislante, siendo necesarios un aislamiento termoplástico (T) para protección en general, una resistencia de calor de hasta 75°C (H) por las condiciones atmosféricas del sitio de instalación y una resistencia al agua y humedad (W), al tratar con un sistema geotérmico donde existen niveles de humedad altos.

Tabla 10. *Coordinación de protecciones y conductores principales*

Datos de la instalación	Coordinación de protecciones y conductores
Protección trifásica	Interruptor termomagnético trifásico de 3 polos
U: Hasta 39VCA en la salida de cada generador	V _n : 120/220VCA
IB: Hasta 27.3ACA en la salida de cada generador	In: 50ACA
Iz: 50ACA	In: 50ACA
Cable de salida del generador 8AWG THW	
I _{cc} : 0.02814kACA	I _{cn} : 3kACA
Protección magnética 5 a 10 veces la In	Protección tipo C
Industria eléctrica	Clase 3

Memoria de cálculo de protecciones y conductores secundarios

$$1. V_n \geq U$$

$$600VCD > 70VCD \text{ (aumento de 45\%)}$$

$$2. I_n \geq IB$$

$$50ACD > 15ACD \text{ (disminución de 45\%)}$$

$$3. I_n \leq Iz$$

$$50ACD = 50ACD$$

$$4. I_{cn} > I_{cc}$$

$$10kA > 0.3464kA$$

$$I_{cc3\Phi} = \frac{UL}{\sqrt{3} \cdot ZLF}$$

$$I_{cc3\Phi} = \frac{120V}{\sqrt{3} \cdot 200m\Omega}$$

$$I_{cc3\Phi} = 0.3464kA$$

Donde:

$I_{cc3\Phi}$ = Corriente de cortocircuito trifásica (kA)

UL = Tensión de línea (V)

ZLF = Impedancia de la línea fase (m Ω)

5. Normalmente los motores y generadores consumen 6 veces más corriente en el arranque que, durante el funcionamiento normal, por lo tanto, la protección a usarse deberá ser la de tipo C, que se encuentra en el rango de corriente que provoca el accionamiento de la protección magnética de 5 a 10 veces la corriente nominal.
6. La energía que la protección deja pasar a la carga en una situación de cortocircuito antes del relevo es un criterio que no concierne a este proyecto al tener un bajo valor de I_{cc} , sin embargo, el interruptor termomagnético a usar es utilizado principalmente en la industria eléctrica, por lo que posee una clase 3, que es la que menos energía transfiere a la carga en una situación de cortocircuito.

El dimensionamiento del cableado eléctrico esta medido por su capacidad resistiva, por lo que el amperaje que soporta determinará su calibre (50A – 8AWG) y las condiciones de su entorno determinaran su tipo de aislante, siendo necesarios un aislamiento termoplástico (T) para protección en general, una resistencia de calor de hasta 75°C (H) por las condiciones atmosféricas del sitio de instalación y una resistencia al agua y humedad (W), al tratar con un sistema geotérmico donde existen niveles de humedad altos.

Tabla 11. *Coordinación de protecciones y conductores secundarios*

Datos de la instalación	Coordinación de protecciones y conductores
Protección monofásica	Interruptor termomagnético de 2 polos
U: Salida del panel de 70VCD	Vn: 600VCD
IB: 15ACD en la salida del panel	In: 50ACD
Iz: 50A	In: 50A
Cable de salida del inversor 8AWG THW	
Icc: 0.3464kA	Icn: 10kA
Protección magnética 5 a 10 veces la In	Protección tipo C
Industria eléctrica	Clase 3

Memoria de cálculo de protección y conductores del centro de carga

$$1. \quad Vn \geq U$$

$$120/220VCA = 120VCA$$

$$2. \quad In \geq IB$$

$$50ACA = 50ACA$$

$$3. \quad In \leq Iz$$

$$50ACA = 50ACA$$

$$4. \quad Icn > Icc$$

$$I_{cc3\Phi} = \frac{UL}{\sqrt{3} \cdot ZLF}$$

$$I_{cc3\Phi} = \frac{120VCA}{\sqrt{3} \cdot 200m\Omega}$$

$$I_{cc3\Phi} = 0.3464kACA$$

$$10kACA > 0.3464kACA$$

Donde:

$I_{cc3\Phi}$ = Corriente de cortocircuito trifásica (kA)

UL = Tensión de línea (V)

ZLF = Impedancia de la línea fase ($m\Omega$)

5. Normalmente los motores y generadores consumen 6 veces más corriente en el arranque que, durante el funcionamiento normal, por lo tanto, la protección a usarse deberá ser la de tipo C que se encuentra en el rango de corriente que provoca el accionamiento de la protección magnética de 5 a 10 veces la corriente nominal.
6. La energía que la protección deja pasar a la carga en una situación de cortocircuito antes del relevo es un criterio que no concierne a este proyecto al tener un bajo valor de I_{cc} , sin embargo, el interruptor termomagnético a usar es utilizado principalmente en la industria eléctrica, por lo que posee una clase 3, que es la que menos energía transfieren a la carga en una situación de cortocircuito.

El dimensionamiento del cableado eléctrico esta medido por su capacidad resistiva, por lo que el amperaje que soporta determinara su calibre (50A – 8AWG) y las condiciones de su entorno determinaran su tipo de aislante, siendo necesarios un aislamiento termoplástico (T) para protección en general, una resistencia de calor de hasta 75°C (H) por las condiciones atmosféricas del sitio de instalación y una resistencia al agua y humedad (W), al tratar con un sistema geotérmico donde existen niveles de humedad altos.

Tabla 12. *Coordinación de protecciones y conductores del centro de carga*

Datos de la instalación	Coordinación de protecciones y conductores
Protección monofásica	Interruptor termomagnético de 2 polos
U: Salida del panel de 120V	Vn: 120/220V
IB: 50A en la salida del panel	In: 50A
Iz: 50A	In: 50A
Cable de salida del inversor 8AWG THW	
I _{cc} : 0.3464kA	I _{cn} : 10kA
Protección magnética 5 a 10 veces la In	Protección tipo C
Industria eléctrica	Clase 3

3.2.4.6 Selección del conductor de puesta a tierra

Las puestas a tierra son trayectorias conductoras utilizadas para conectar las partes metálicas de todos los equipos que normalmente no conducen corriente, a un electrodo conductor clavado a una tierra física. El llevar a cabo la conexión a tierra es importante para la prevención de situaciones peligrosas, puesto que, aunque el equipo se encuentra en óptimas condiciones y está conectado correctamente, no se descarta que exista una corriente de fallo que recorra un camino distinto al camino de funcionamiento normal.

La función del conductor de puesta a tierra es proporcionar una ruta segura para que fluya la corriente de fallo; esto se realiza conectando abrazaderas tipo tornillo que enroscan los hilos conductores. Siguiendo lo establecido en la NOM-001-SEDE-2012, el tamaño mínimo de los conductores de puesta a tierra para canalizaciones y equipos con menos de 60A en el dispositivo automático de protección deberá ser de 10AWG.

Por otro lado, la función del electrodo de puesta a tierra es ser el objeto conductor a través del cual se establece la conexión directa a tierra, acorde a la NOM-001-SEDE-2012 los electrodos permitidos para puesta a tierra son:

- Tubería metálica subterránea para agua.
- Acero estructural del edificio o estructura.
- Electrodo recubierto en concreto.
- Anillo de puesta a tierra.
- Electrodo de varilla y tubería.
- Electrodo de placa.
- Estructuras metálicas subterráneas locales.

Siendo el electrodo de varilla uno de los objetos más comunes en el mercado puestas a tierra, se determinan las características que permitan seleccionar una varilla que cumpla con lo establecido en la NOM-001-SEDE-2012.

No deben tener menos de 2.44m de longitud y deben estar compuestos de los siguientes materiales:

- No deben ser menores de la designación 21 (tamaño comercial de $\frac{3}{4}$) y si son de acero, su superficie exterior debe ser galvanizada o debe tener otro recubrimiento metálico para protección contra la corrosión.
- Los electrodos de puesta a tierra tipo varilla de acero inoxidable o de acero recubierto con cobre o zinc deben tener como mínimo 16mm de diámetro.

Considerando lo anterior se seleccionó un electrodo de cobre electrolítico puro para evitar riesgo de corrosión galvánica en área geotérmica, la cual cuenta con 3m de longitud y 16mm.

Figura 58. *Proceso de instalación de tierra*



Nota. Fotografía propia.

3.3 Desarrollo de ingeniería de detalle

El desarrollo de la ingeniería de detalle define los lineamientos específicos del proyecto, teniendo como objetivo el armado del panel eléctrico del ciclo y la preparación de los diagramas unifilares definitivos que servirán para llevar a cabo las pruebas operativas en campo, por lo tanto,

en esta fase, se llevaron a cabo la elaboración de diagramas detallados que indican información técnica operativa, basándose en los criterios vistos en el desarrollo de ingeniería básica.

3.3.1 Equipo en campo

Previo a la elaboración de los diagramas unifilares detallados, se realizó una lista descriptiva general del equipo involucrado en las pruebas operativas del ciclo binario, recopilando información de las variables físicas para la instalación del ciclo binario.

- Ciclo Binario: Desarrollado por Grupo IIDEA de la UNAM, cuenta con una capacidad para generar hasta 10kWe mediante un sistema de generación de vapor, que consta de un intercambiador de calor de placas planas, una placa orificio, un separador de flujos bifásicos y dos compartimentos para generadores.
- Generador eléctrico diésel, el uso de este dispositivo tiene el objetivo de proporcionar energía eléctrica a los equipos instalados en campo; el generador HIMOINSA HYW-25, entrega corriente eléctrica suficiente a 60Hz en 220/127V para satisfacer las necesidades de los equipos durante las eléctricas.
- Interruptores eléctricos del sistema: Es un tablero de interruptores termomagnéticos para el control de los equipos eléctricos del pozo geotérmico (marca es Square D modelo FAL36100 trifásicos de 100A, 600V).
- Panel eléctrico: Sistema de control eléctrico directo del ciclo binario, cuyo propósito es cumplir con el procesamiento de la energía generada con capacidad de soporte de 6kWe.
- Módulo de carga: Conformado por luminarias Hyper Tough 1000We, forman parte del sistema de pruebas del panel eléctrico y permiten observar el estado operativo del ciclo binario a determinadas cargas.
- Regulador de humedad del fluido: Tubería perteneciente a las instalaciones del pozo geotérmico que permite controlar los niveles de humedad del fluido geotérmico para su transporte óptimo en el sistema de generación.
- Silenciador del sistema y del ciclo: Son dispositivos amortiguadores del ruido ubicados en los sistemas de regulación de la planta generadora.

- Torre de enfriamiento de acero: Su función es disminuir la temperatura del agua de refrigeración utilizada en la planta, pulverizándola en forma de gotas que caen a un depósito intercambiador en donde se refrigeran por medio de una corriente de aire. El modelo instalado en el pozo es el SPX MARLEY AQUATOWER con una tasa de flujo de 24 – 378 galones por minuto y una capacidad térmica de 8 – 126 toneladas que enfrían el agua caliente.
- Bomba de agua: Tienen el objetivo de transportar agua para la torre de enfriamiento y solo se accionarán cuando la torre de enfriamiento lo requiera.

3.3.2 Panel eléctrico

La estructura del panel eléctrico sigue la misma secuencia operativa de la ingeniería básica. Los dispositivos y componentes se montaron en una base de hierro especialmente diseñada para que cada uno de los dispositivos y componentes encajen en un área delimitada (Figura 59) a excepción de los generadores, los cuales están integrados en el Ciclo Binario IDEA 10; la base de hierro está cubierta por láminas de aluminio que aísla y protege el sistema eléctrico de condiciones desfavorables, a su vez, el inversor de corriente cuenta con salida directa para la instalación de puesta a tierra, la cual al igual que los conductores de los generadores se ubican en la parte inferior del panel eléctrico.

El panel eléctrico cuenta con una salida que permite la conexión de dispositivos electrónicos, con capacidad máxima de hasta 6kWe de operación continua siempre y cuando exista energía eléctrica de por medio.

Figura 59. Panel eléctrico



Nota. Fotografías propias.

3.3.3 Diagramas unifilares detallados

El diseño de diagramas unifilares detallados debe mostrar una amplia información de los equipos eléctricos – electrónicos y conductores en la instalación que permitan llevar a cabo la supervisión de un proyecto, encontrar el origen de fallas y ser un documento de consulta general.

Al igual que el diagrama unifilar simplificado el de detalle debe de seguir lo establecido en el Manual para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga y lo descrito previamente en el apartado de Diagramas unifilares simplificados, además de contener lo establecido en el apartado 215-5 de la NOM 001 SEDE 2012, el cual indica que el diagrama unifilar deberá contener los siguientes puntos:

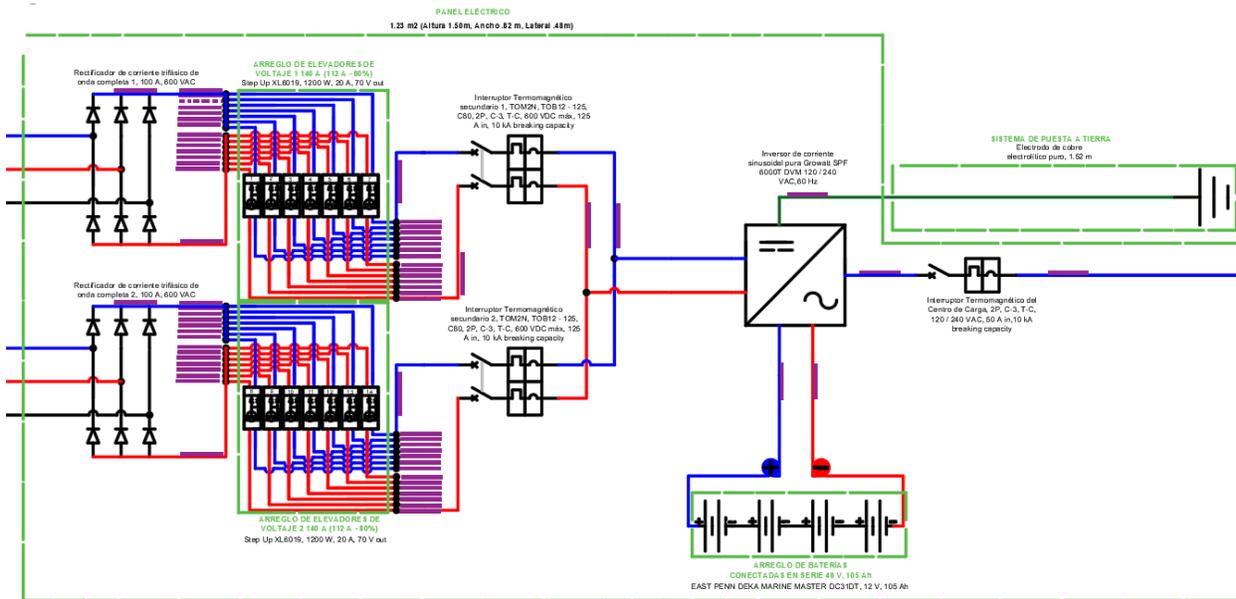
- La superficie en metros cuadrados del edificio u otra estructura alimentada por cada alimentador.
- La carga total conectada antes de aplicar los factores de demanda.
- La carga calculada después de aplicar los factores de demanda.
- Los factores de demanda aplicados.
- El tipo y tamaño de los conductores utilizados.

Considerando estos aspectos se realizaron los diagramas unifilares detallados del ciclo binario y de la caracterización de los generadores en campo, los cuales pueden ser consultados con mayor detalle en los Anexos 9 y 10 respectivamente.

3.3.3.1 Diagrama Unifilar Detallado del Sistema Eléctrico del Ciclo Binario IDEA 10

- Superficie en metros cuadrados del edificio u otra estructura alimentada por cada alimentador.
 - Panel eléctrico: 1.23m² (Altura: 1.50m, Ancho: 0.82m, Lateral: 0.48m).
 - Longitud de los generadores a sistema de rectificación: 3.62m.

Figura 60. Superficie en metros cuadrados del panel eléctrico



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

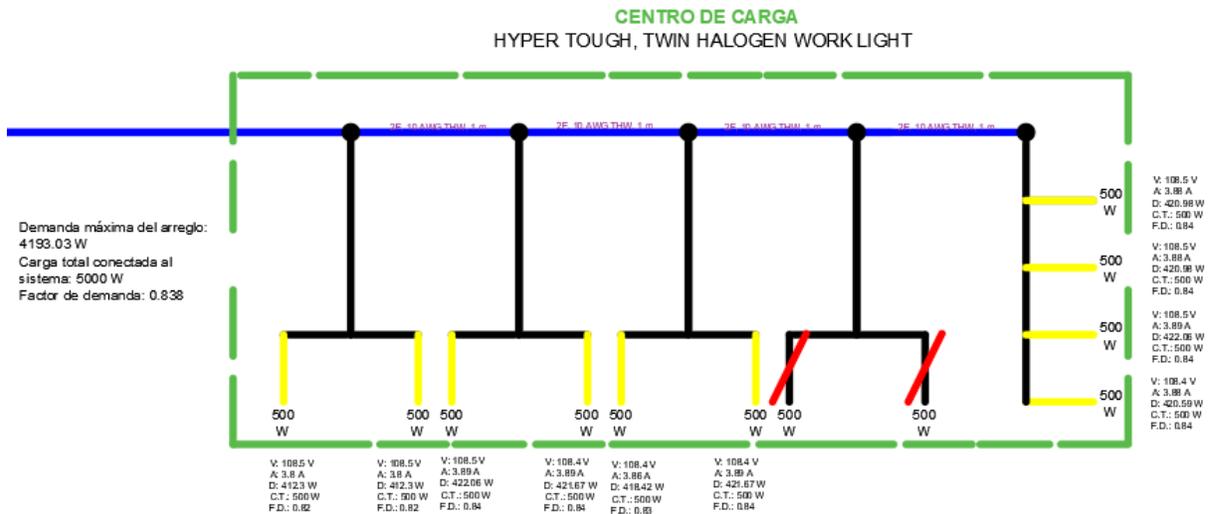
- Carga total conectada antes de aplicar los factores de demanda.
 - Acorde a la ficha técnica cada luminaria consume 500We.
 - 3000We provenientes de 6 luminarias Hyper Tough, twin halogen work light.
 - 2000We provenientes de 4 luminarias convencionales.
- Carga de demanda calculada.

Carga de demanda	
Carga	Parámetro
Luminaria 1	412.3W
Luminaria 2	412.3W
Luminaria 3	422.06W
Luminaria 4	421.67W
Luminaria 5	418.42W
Luminaria 6	421.67W
Luminaria 7	420.98W
Luminaria 8	420.98W
Luminaria 9	422.06W
Luminaria 10	420.59W
Centro de carga	4193.03W

- Factores de demanda aplicados.

Factores de demanda aplicados	
Carga	Factor
Luminaria 1	0.82
Luminaria 2	0.82
Luminaria 3	0.84
Luminaria 4	0.84
Luminaria 5	0.83
Luminaria 6	0.84
Luminaria 7	0.84
Luminaria 8	0.84
Luminaria 9	0.84
Luminaria 10	0.84
Centro de carga	0.8386

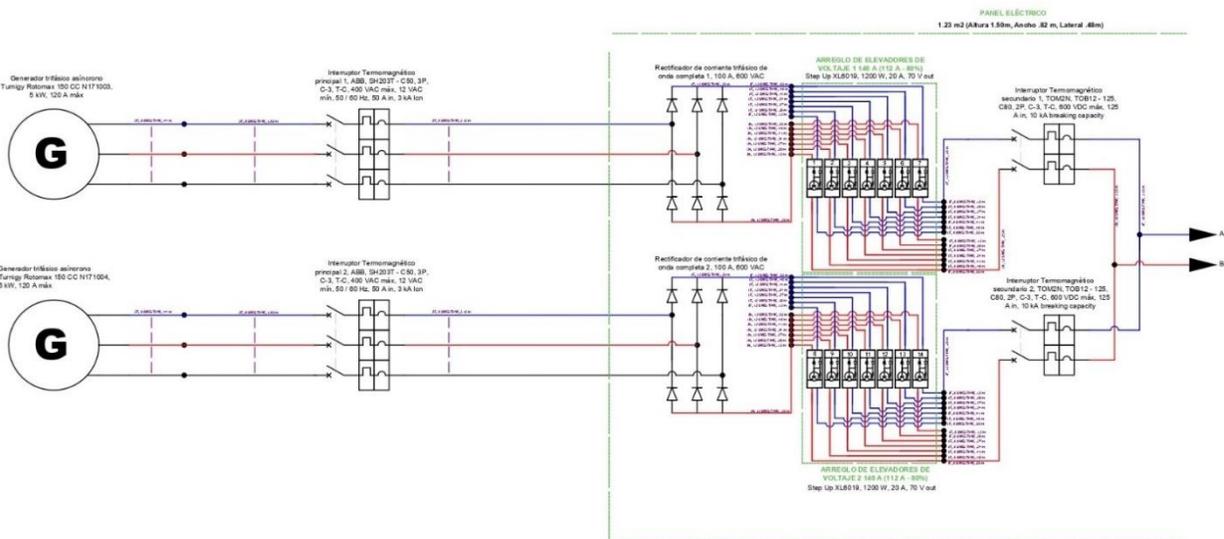
Figura 61. Centro de carga con visualización de parámetros



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

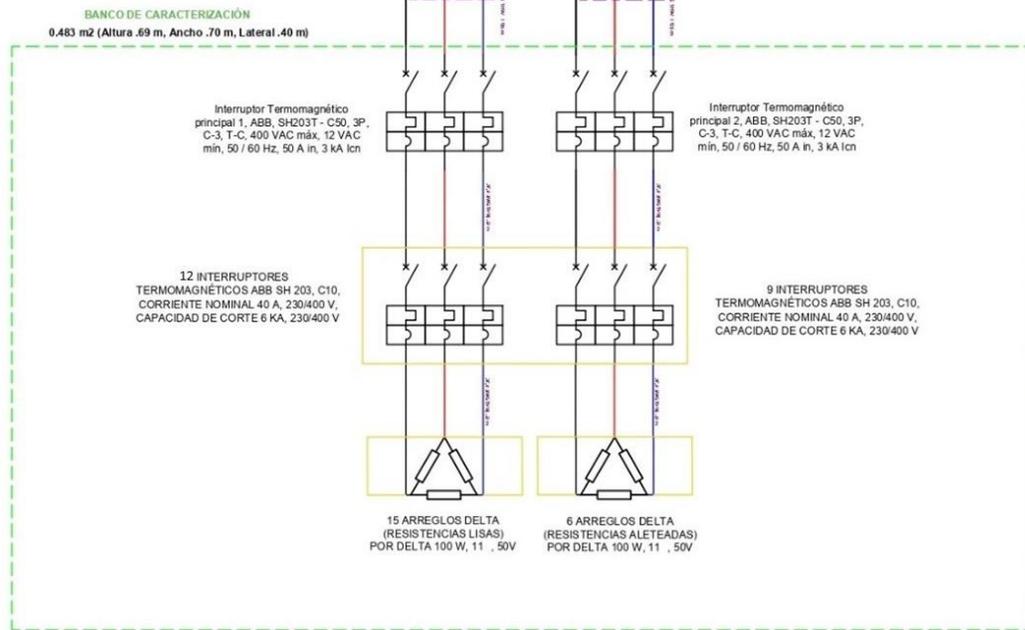
- Tipo y tamaño de los conductores utilizados.
 - Generadores Turnigy Rotomax 150CC a interruptores termomagnéticos principales: 3F, 8AWG THW, 1.49m.
 - Interruptores termomagnéticos principales a rectificadores de corriente: 3F, 8AWG THW, 2.13m.
 - Rectificadores de corriente a elevadores de tensión: 1F, 1N, 8AWG THW, 0.25m.
 - Entrada y salida en 14 elevadores de tensión: 1F, 1N, 8AWG THW, 0.68m.
 - Elevadores de tensión a interruptores termomagnéticos secundarios: 1F, 1N, 8AWG THW, 0.25m.
 - Interruptores termomagnéticos secundarios a inversor de corriente: 1F, 1N, 8AWG THW, 1.15m.
 - Arreglo de baterías a inversor de corriente: 1F, 1N, 8AWG THW, 0.6m.
 - Inversor de corriente a puesta a tierra: 1T, 10AWG THW, 3m.
 - Inversor de corriente a interruptor termomagnético del centro de carga: 1F, 1N, 8AWG THW, .5m.
 - Interruptor termomagnético del centro de carga a centro de carga: 1F, 1N, 8AWG THW, 5m (luminaria 1 – 2: 5m, luminaria 3 – 4: 6m, luminaria 5 – 6: 7m, luminaria 7 – 10: 9m).

Figura 62. Diagrama Unifilar Detallado del Ciclo Binario Parte 1



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

Figura 64. Superficie en metros cuadrados del Banco de Caracterización



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

- Carga total conectada antes de aplicar los factores de demanda.
Cada arreglo de resistencias en delta consume 300We.
 - 3600We en el generador N171003.
 - 2700We en el generador N171004.
- Carga de demanda calculada.

Carga de demanda

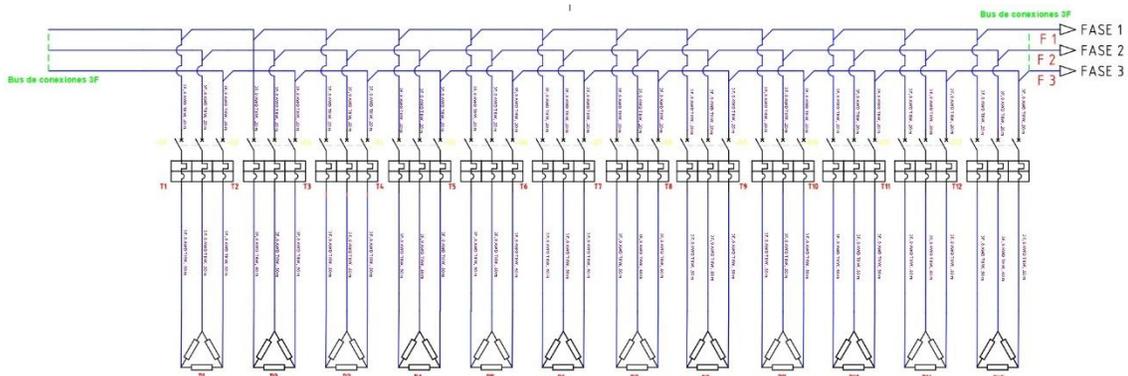
Carga	Parámetro
Delta 1	290W
Delta 2	290W
Delta 3	291W
Delta 4	290W
Delta 5	290W
Delta 6	290W
Delta 7	290W
Delta 8	290W
Delta 9	290W
Delta 10	290W
Delta 11	290W
Delta 12	290W
Delta 13	290W
Delta 14	290W
Delta 15	291W
Delta 16	292W

Delta 17	290W
Delta 18	290W
Delta 19	290W
Delta 20	290W
Delta 21	293W
Centro de carga	6097W

- Factores de demanda aplicados.

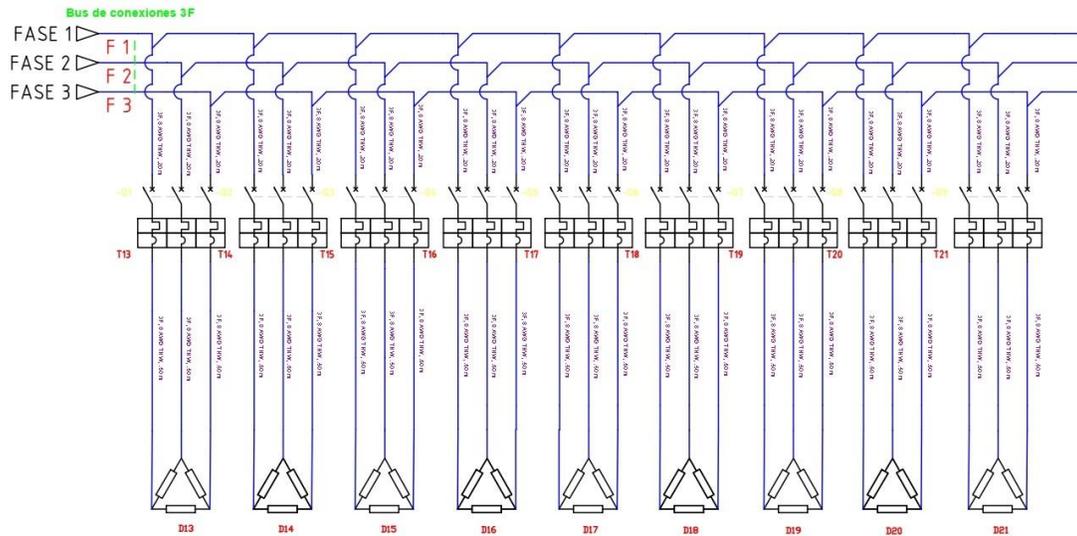
Factores de demanda aplicados	
Carga	Factor
Delta 1	0.96
Delta 2	0.96
Delta 3	0.97
Delta 4	0.96
Delta 5	0.96
Delta 6	0.96
Delta 7	0.96
Delta 8	0.96
Delta 9	0.96
Delta 10	0.96
Delta 11	0.96
Delta 12	0.96
Delta 13	0.96
Delta 14	0.96
Delta 15	0.97
Delta 16	0.973
Delta 17	0.96
Delta 18	0.96
Delta 19	0.96
Delta 20	0.96
Delta 21	0.976
Centro de carga	0.9677

Figura 65. Centro de carga con visualización de parámetros – 12 deltas



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

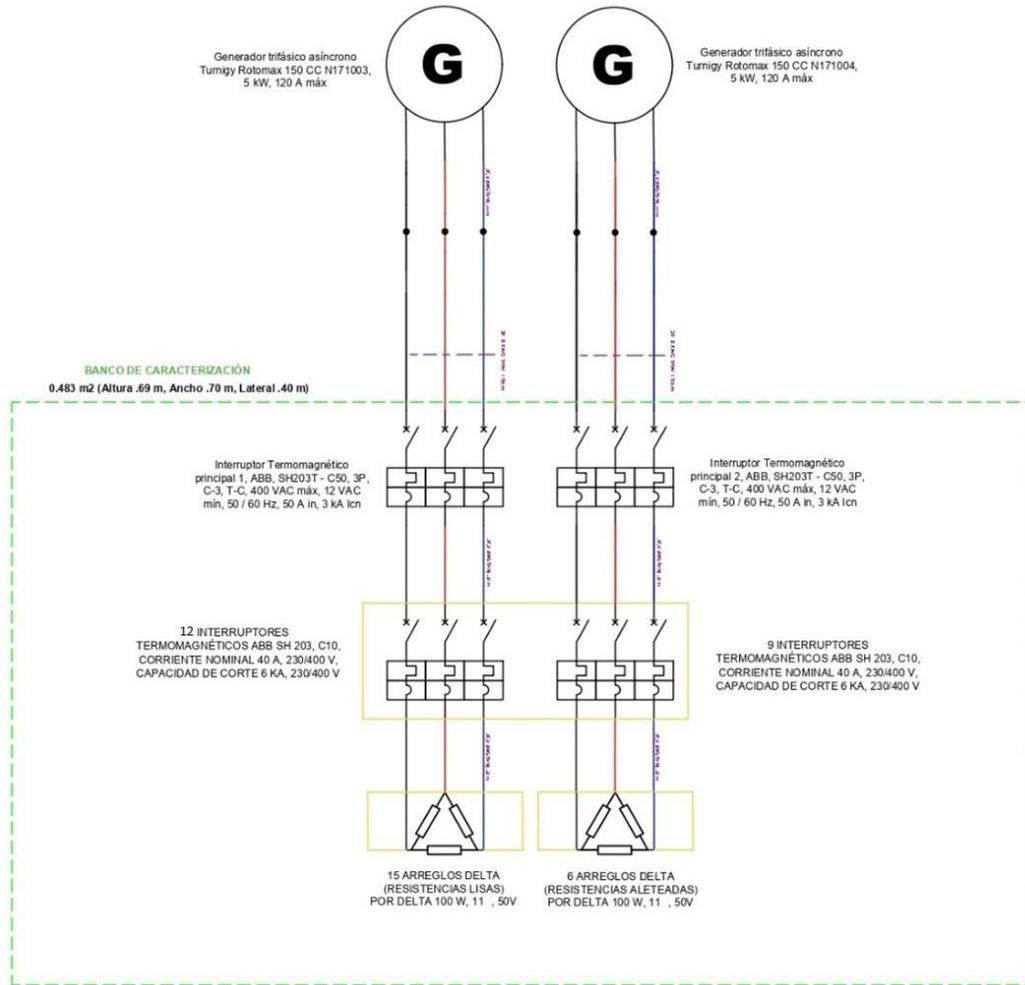
Figura 66. Centro de carga con visualización de parámetros - 9 deltas



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

- Tipo y tamaño de los conductores utilizados.
 - Generadores Turnigy Rotomax 150CC a interruptores termomagnéticos de banco de caracterización: 3F, 8AWG THW, 1.49m.
 - Interruptores termomagnéticos de banco de caracterización a bus de hilos conductores de arreglo de 12 interruptores: 3F, 8AWG THW, 0.2m.
 - Interruptores termomagnéticos de banco de caracterización a bus de hilos conductores de arreglo de 9 interruptores: 3F, 8AWG THW, 0.2m.
 - 12 interruptores termomagnéticos a arreglos en delta: 3F, 8AWG THW, 0.5m.
 - 9 interruptores termomagnéticos a arreglos en delta: 3F, 8AWG THW, 0.5m.

Figura 67. Diagrama Unifilar Detallado de la Caracterización en Campo



Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

4 Pruebas operativas

Con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento del proyecto Ciclo Binario IDEA 10 para su aplicación como fuente de suministro eléctrico en futuros proyectos empleando usos directos de la geotermia; se realizaron pruebas operativas para la caracterización del área eléctrica del 18 al 22 de abril de 2022 en el pozo número 4 de la Planta Geotérmica Domo San Pedro, Nayarit.

Las pruebas eléctricas consistieron en demandar carga eléctrica de 5kWe usando luminarias durante un determinado periodo de tiempo, monitoreando en el transcurso de los días diversos parámetros de operación, realizando modificaciones en todo el sistema para conseguir el mejor rendimiento operativo y sincronizar los equipos, lo que permitió generar la relación demanda – entrega de potencia y la operación ininterrumpida del sistema general.

Figura 68. *Pruebas operativas del Ciclo Binario IDEA 10*



Nota. Fotografía propia.

4.1 Operación del ciclo binario

El sistema geotérmico comprendió la entrega de salmuera de los pozos hacia la entrada del evaporador por medio de un sistema que desviaba el excedente de la salmuera mediante la abertura y cierre de válvulas, de ahí se calentó gradualmente la tubería para poder iniciar con la entrega del fluido hacia el ciclo binario donde se encontró con el intercambiador de calor y posteriormente con los turbogeneradores que a su vez transportaron la corriente alterna generada al panel eléctrico.

4.1.1 Reconocimiento del sitio y montaje del panel eléctrico

Se llevo a cabo el reconocimiento del sitio ubicando el generador diésel, el panel eléctrico y de control del sistema geotérmico, las bombas de agua, la torre de enfriamiento, los silenciadores, el regulador de humedad del fluido, el ciclo binario y la zona designada para la instalación del panel eléctrico (Figura 69).

Figura 69. *Operación del sistema geotérmico*



Nota. Fotografía propia.

Posterior al reconocimiento se llevó a cabo el montaje del panel eléctrico (Figura 70). Primeramente, colocando el inversor de corriente en el centro del panel, luego conectando la salida

de los elevadores de tensión a la entrada de suministro de energía renovable del inversor, además, como fuente de suministro secundario y amortiguamiento, se hizo la conexión del arreglo de baterías. Todo el armado se llevó a cabo de manera aislada al ciclo, es decir sin conectarlo a este, para poder verificar de forma independiente su funcionamiento y de esta manera prevenir algún evento desafortunado.

NOTA: Se colocó una puesta a tierra independiente para el panel eléctrico.

Figura 70. *Montaje del panel eléctrico*



Nota. Fotografía propia.

4.1.1.1 *Equipo instalado en el panel eléctrico*

- 1 inversor de corriente Growatt SPF 6 kW.
- 14 elevadores de voltaje Step up de 12,000We, 20A.
- 2 rectificadores de corriente trifásica.
- 4 baterías EAST PENN DEKA MARINE MASTER, 105Ah 12V, de ciclo profundo.
- 4 Luminarias de 1,000We HYPER TOUGH HALOGEN WORK LIGHT.
- 1 arreglo de 4 luminarias de 500We cada una.
- Cable calibre 8 AWG THW.
- Cable calibre 12 AWG THW.

- Cable calibre 10 AWG THW.
- Electrodo de cobre electrolítico puro.

4.1.1.2 Programación del inversor de corriente

La programación del inversor de corriente Growatt SPF 6kWe se realizó para entregar una corriente alterna a la salida mediante el ingreso de una fuente principal de energía usando los generadores Turnigy y una fuente secundaria compuesta por el arreglo de baterías DEKA (Figura 71).

Figura 71. Programación del inversor para su operación con dos fuentes de demanda



Nota. Fotografía propia.

4.1.2 Arranque de generadores

Antes de realizar la acción de arranque de los generadores se llevó a cabo una inspección visual general, donde se revisó que la tornillería se encontrara correctamente ajustada para evitar fugas del gas en la carcasa de los generadores; luego se revisó que los indicadores de presión se encontraran en su respectiva ubicación para garantizar una correcta medición de parámetros y finalmente se revisó que no existiera obstrucción alguna de los 3 cables de fases del generador y se encontraran conectados por bornes de conexión en ambos generadores.

4.1.2.1 *Arranque en vacío*

Luego de la inspección visual se llevó a cabo el arranque en vacío por 15 minutos, con una presión en la bomba de 10 bar y una presión en la entrada de las turbinas de 5 bar, obteniendo 31 y 30V para los generadores N171004 y N171005 respectivamente; esta primera prueba tuvo dos objetivos, el primero fue preparar los generadores para sus posteriores pruebas y el segundo estimar las RPM de cada generador comparándolo con las pruebas de caracterización hechas en laboratorio, las cuales fueron de 6,000RPM.

El arranque en vacío del sistema geotérmico y el sistema de agua de enfriamiento disponían de válvulas para permitir el paso de flujo de los servicios disponibles, de esta forma la bomba del refrigerante permitió la circulación del fluido hacia el intercambiador de calor y una vez el hacia la conversión en gas para impulsar las turbinas de los generadores, daba apertura hacia los módulos donde se ubicaban los generadores; esta apertura comenzó con una presión de 1 bar a la entrada de las turbinas para que superara la inercia del rotor, posteriormente se aumentó la presión hasta 5 bar de manera gradual, lo que provocó que aumentara su velocidad y se estabilizara para poder medir presiones y tensiones.

4.1.2.2 *Secuencia de parada*

Para poner fuera de servicio el generador, en condiciones estables lo primero que se realizó fue bajar la carga gradualmente hasta 0We y posteriormente bajar a un valor mínimo los niveles de salmuera y el refrigerante, cerrando sus respectivas válvulas.

4.2 Pruebas operativas

La realización de estas pruebas tuvo el objetivo de caracterizar el panel eléctrico, sometiénolo a distintos escenarios de operación a los que podría enfrentarse en la práctica real, lo que condujo a que se pudieran solucionar errores de manera temprana y proponer e implementar mejoras, además de obtener detalles técnicos del sistema eléctrico.

4.2.1 Prueba de estabilidad del sistema eléctrico

La estabilidad del sistema eléctrico es la habilidad del sistema para permanecer en sincronismo cuando experimenta un disturbio; este estudio tiene como objetivo determinar la respuesta del sistema eléctrico del ciclo binario ante variaciones. Este proceso estableció el siguiente orden:

- Conexión del generador N171005 al panel eléctrico con demanda única del inversor de corriente encendido.
- Rectificación de corriente mediante puente de diodos.
- Ajuste de voltaje de salida del arreglo de elevadores de tensión número 1 a 70V de salida (Figura 72) para su sincronización con el inversor de corriente.

NOTA: La tensión de salida en el sistema de rectificación era de 30VCD.

Figura 72. *Ajuste de los elevadores de voltaje*



Nota. Fotografía propia.

Durante la toma de tensiones en el generador a pesar de no realizarse demanda de cargas, se observó una variación significativa (Tabla 13), por lo que se detuvo el sistema para realizar una revisión del generador N171005.

Tabla 13. *Toma de tensiones del generador N171005*

Hora	Tensión del generador	Tensión de amplificación
16:30	20VCA	70VCD
16:35	30.6VCA	70VCD
16:40	31VCA	70VCD
16:45	23.9VCA	70VCD
16:50	27.6VCA	70VCD
16:55	9.81VCA	70VCD

Durante la revisión del generador N171005 se encontraron fallas mecánicas de desgaste en sus álabes, que provocaban que el giro del rotor no fuera el mismo en el transcurso del tiempo y por ende entregara valores de tensión muy inestables, por lo tanto, se retiró dicho generador y se optó por el acople de un nuevo generador (N171003 – modelo Turnigy Rotomax 50CC).

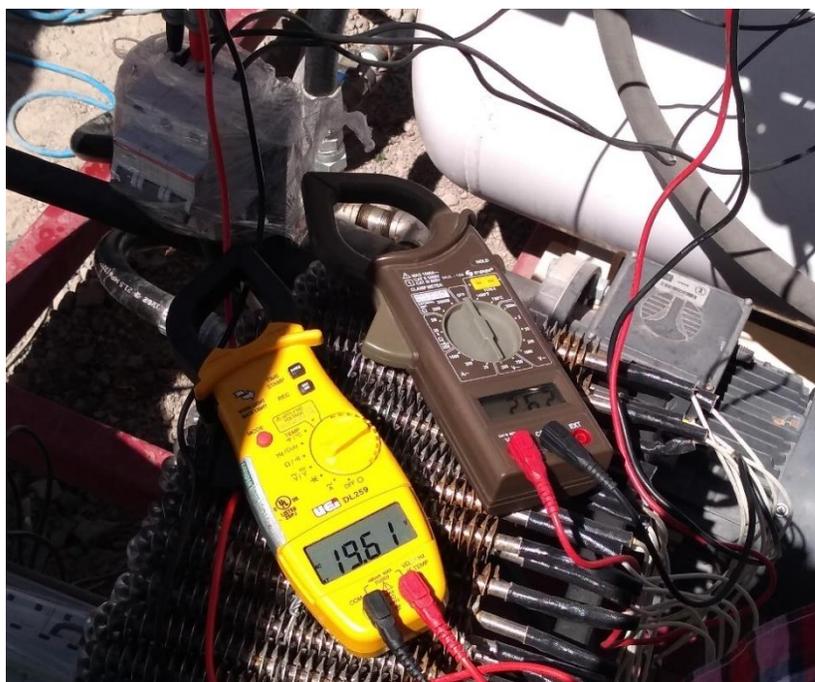
Figura 73. *Reemplazo del generador N171005*



Nota. Fotografía propia.

Antes de someter los generadores a carga y determinar su estabilidad ante estos disturbios eléctricos, se realizó una comparativa de los generadores N171003 (Turnigy Rotomax 50CC) y N171004 (Turnigy Rotomax 150CC) mediante la toma de tensiones en vacío (Figura 74), cuyo comportamiento fue estable pero diferente en ambos generadores (Tabla 14).

Figura 74. Toma de tensiones en vacío de los generadores



Nota. Fotografía propia.

Tabla 14. Toma de tensiones en vacío de los generadores

Hora	Generador N171003	Generador N171004
10:18	11VCA	24VCA
10:22	18.8VCA	26.7VCA
10:24	17.5VCA	24VCA
10:25	19.4VCA	26.4VCA
10:26	19.4VCA	26.3VCA
10:27	19.6VCA	26.2VCA
10:28	19.8VCA	26.2VCA

A pesar de la variación de tensiones de los generadores, el sistema logró la estabilización en vacío, por lo que se realizó una demanda de carga de 2kWe (Figura 75) para comprobar la estabilización ante perturbaciones eléctricas (Tabla 15), para ello, se configuró la tensión de salida a 70V para cualquier disturbio en la carga demandada.

Figura 75. *Demanda de 2kWe usando luminarias*



Nota. Fotografía propia.

Tabla 15. *Parámetros de los generadores con carga*

Generador N171003	Generador N171004	NOTAS
6VCA	13VCA	Salida de los generadores
15.5ACA	8.5ACA	Salida de los generadores
10.3VCD	10.3VCD	Salida de los rectificadores
70VCD	70VCD	Voltaje de amplificación

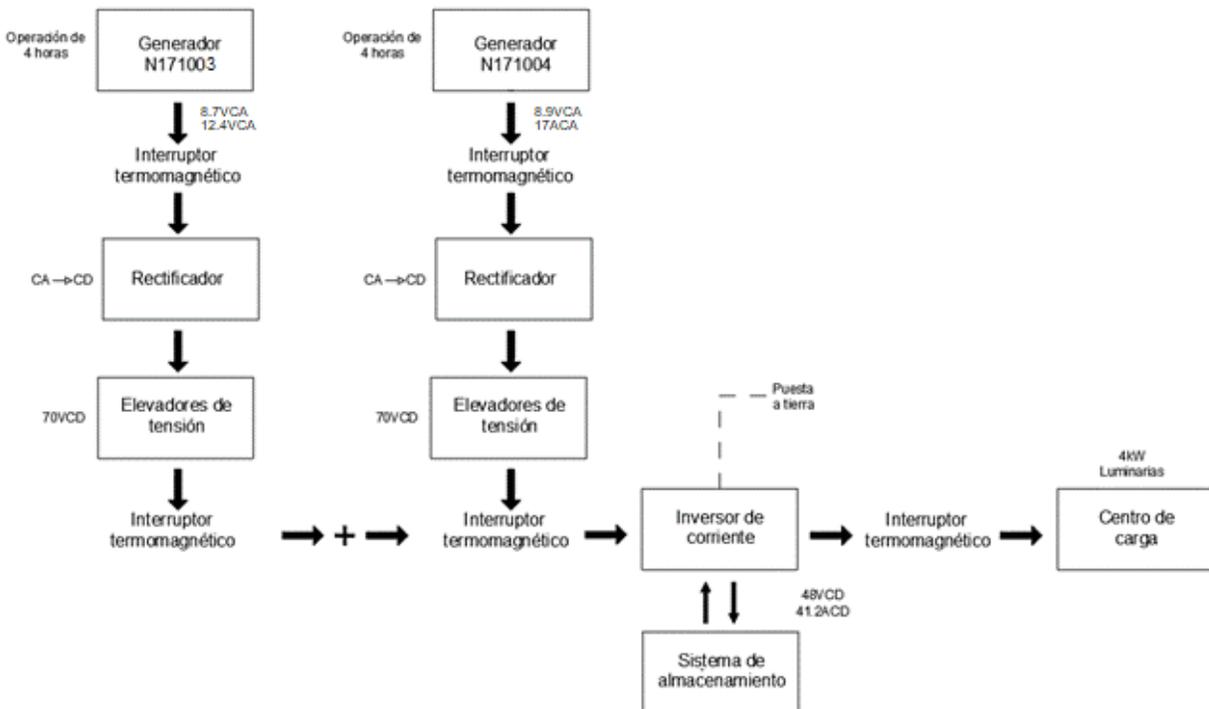
Nota. Los sistemas de rectificación de las dos columnas arrojaron 10.3VCD de salida, los cuales fueron amplificados en 59.7VCD cada uno.

4.2.2 Prueba de interrupción

Una interrupción eléctrica es un evento en el que la energía eléctrica en un dispositivo o instalación cae a cero y no retorna a sus valores normales automáticamente; normalmente estas interrupciones son espontáneas, por lo que no se tiene conocimiento de cuando sucederán, la desconexión de dispositivos de gran potencia pueden generar sobretensiones de conmutación cuyos efectos van desde la interrupción de actividades de los beneficiarios del servicio eléctrico, hasta el daño de equipos electrónicos conectados a la red de suministro, que impactan en su desempeño, vida útil, daño total o incluso ser fuente de incendios. Por esta razón la prueba de interrupción súbita tiene el objetivo de verificar el estado del sistema eléctrico ante un escenario de falla eléctrica que detenga las operaciones.

Antes de realizar la interrupción en los generadores, se verifico el estado de los interruptores termomagnéticos, conexiones y que el módulo de carga se encontrara activo y posteriormente se hizo la toma de parámetros antes de la interrupción, como se muestra en el siguiente diagrama.

Figura 76. Prueba de interrupción



Nota. Elaboración propia.

La interrupción del sistema tuvo una duración de 1 minuto y al activar nuevamente el sistema de generación se verificó que todo el sistema operara correctamente, para hacer una segunda interrupción, pero con el sistema de almacenamiento activo, donde de igual manera, el sistema eléctrico no sufrió fallas y solamente se diferenció del anterior al no detenerse el sistema y continuar trabajando, esto gracias al inversor de corriente, que cuenta con capacidad de acción inmediata al detectar un corte en el suministro de energía.

NOTA: Antes de llevarse a cabo las pruebas de interrupción súbita dos bulbos de las luminarias se rompieron, haciendo que el sistema de demanda pasara de 6kWe a 5kWe.

4.2.3 Prueba operativa de 8 horas

El objetivo de estas pruebas de larga duración es para visualizar el correcto funcionamiento de la planta en un entorno apegado a la realidad. En esta prueba el ciclo binario operó por 8 horas continuas, iniciando a las 12:00 horas con una demanda de 500We para pasar a demandar a las 17:30 horas 2,000We y de 19:30 – 20:00 horas pasar de 2,000 a 5,000We.

Figura 77. Demanda de 5kWe al sistema eléctrico



Nota. Fotografía propia.

La operación continua con 5kWe de demanda por las 8 horas no fue posible debido a las siguientes variables:

- Caída importante de presión de la bomba que dirige el fluido a los álabes de los generadores, involucrando al evaporador, debido a la obstrucción por incrustaciones de sílice que impidieron conseguir la presión nominal a la que funcionan las turbinas.
- Falta de refrigerante en el ciclo binario, por lo tanto, la presión ejercida en los álabes de las turbinas no opero eficientemente, provocando que los generadores no pudieran cubrir toda la demanda del sistema y las baterías se encargaran de suministrar la energía y, por lo tanto, se descargarán más rápido.
- Los generadores seleccionados no cuentan con la capacidad para entregar altos niveles de potencia.

El registro de parámetros bajo una demanda de 500We se tomó de las 12:17 horas a las 17:10 horas (Tabla 16).

Tabla 16. *Toma de parámetros al sistema eléctrico con 500We de carga*

Hora	Generador N171003 (V y A)	Generador N171004 (V y A)	Tensión de amplificación en Step up (V)	Corriente baterías a inversor (A)	Baterías (V)	Luminarias (V y A)
12:17	8.6V y 5A	9.3V y 5A	70V	5.4A	51.2V	108.5V y 3.8A
12:40	8V y 17A	8V y 16A	70V	5.4A	50.9V	108.5 y 3.8A
13:25	9V y 10A	10V y 14A	70V	5.4A	50.6V	108.5 y 3.8A
14:45	9.5V y 11A	10V y 15A	70V	5.4A	50.2V	108.5 y 3.8A
15:27	9.2V y 11.5A	9.7V y 15.2A	70V	5.4A	49.8V	108.5V y 3.8A
16:00	9.1V y	9.5V y	70V	5.5A	49.5V	108.5V y 3.89A

	10A	15A				
16:30	9.5V y 11A	10V y 15A	70V	5.5A	49.2V	108.4V y 3.89A
17:10	9.2V y 12A	9.8V y 16.6A	70V	5.5A	48.6V	108.4V y 3.86A

En la última toma de mediciones se demandaron 2kWe de las 17:30 horas a las 19:30 horas y posteriormente una carga final de 2kWe, con demanda de 5kWe (Tabla 17).

Tabla 17. *Parámetros de pruebas de 8 horas a 5kWe*

Potencia demandada	Corriente de baterías	Tensión y Corriente de generadores			
		Generador N171003		Generador N171004	
500W	5.5A	9V	13.6A	9.5V	16.7A
1,000W	9.7A	9V	13.6A	9.5V	17.2A
1,500W	15A	9V	14.52A	9.3V	17.9A
2,000W	20.2A	8.9V	13.5A	9.6V	17.4A
2,500W	25.9A	8.9V	11.3A	9.1V	16.2A
3,000W	31.2A	8.9V	12.1A	9.2V	17.2A
5,000W	51.7A	8.7V	10.2A	8.9V	16.9A

Figura 78. Grafica de pruebas operativas de 8 horas

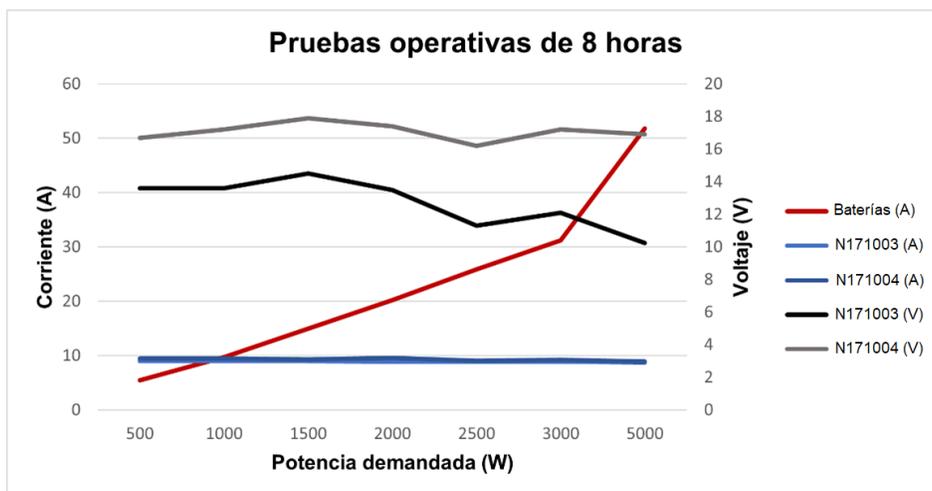


Figura 79. *Demanda proporcionada por luminarias*



Nota. Fotografía propia.

Como parte de los trabajos previos en la caracterización de los generadores eléctricos llevado a cabo a nivel laboratorio, se generaron las tablas que relacionan tensión y corriente para determinar la velocidad de rotación de los rotores en los generadores en campo, esta información resulta de mucho interés para poder evaluar las velocidades del generador durante las pruebas operativas, ya que resultó muy complicado el poder censar la velocidad directamente por la

configuración enlatada con la que está instalado. Cotejando la información de potencia generada en campo y los resultados obtenidos en laboratorio se pudieron determinar las velocidades de giro en las pruebas operativas de los generadores (Tablas 18 y 19), las cuales rondan las 2400RPM.

Tabla 18. *Comparativa de tensión y corriente de N171003 para determinar velocidades*

Potencia demandada	Velocidad (RPM)	Tensión y Corriente de N171003			
		Laboratorio		Campo	
500W	2419	11V	13.1A	9V	13.6A
1,000W	2419	11V	13.1A	9V	13.6A
1,500W	2415	11V	14.3A	9V	14.52A
2,000W	2419	11V	13.1A	8.9V	13.5A
2,500W	2432	12V	11A	8.9V	11.3A
3,000W	2425	12V	11.9A	8.9V	12.1A
5,000W	2432	12V	11A	8.7V	10.2A

Tabla 19. *Comparativa de tensión y corriente de N171004 para determinar velocidades*

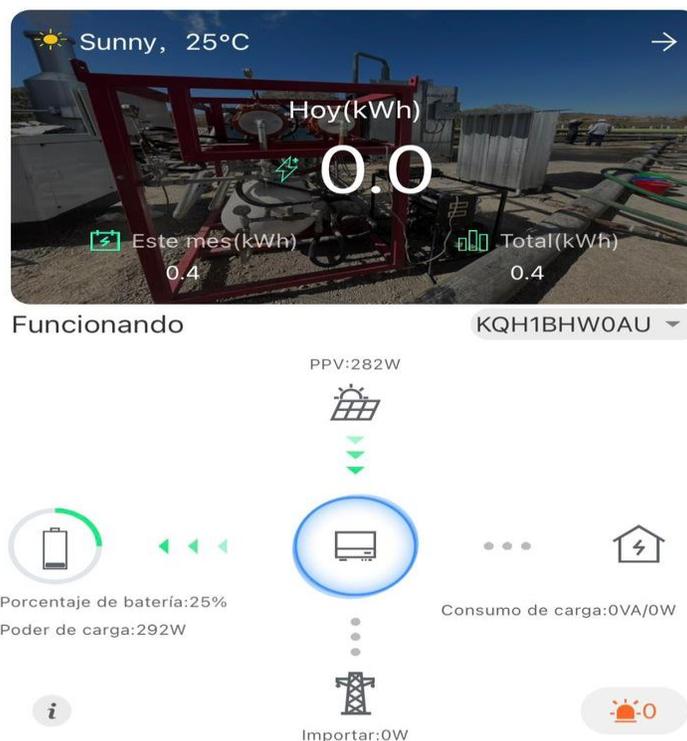
Potencia demandada	Velocidad (RPM)	Tensión y Corriente de N171004			
		Laboratorio		Campo	
500W	2394	11V	16.5A	9.5V	16.7A
1,000W	2384	11V	17.3A	9.5V	17.2A
1,500W	2384	11V	17.3A	9.3V	17.9A
2,000W	2384	11V	17.3A	9.6V	17.4A
2,500W	2394	11V	16.5A	9.5V	16.7A
3,000W	2384	11V	17.3A	9.5V	17.2A
5,000W	2394	11V	16.5A	8.9V	16.9A

4.3 Monitoreo del sistema

Si bien en el monitoreo del sistema eléctrico se tomaron parámetros de forma manual para las distintas pruebas operativas, también se abordó el monitoreo por medio del software integrado del inversor Growatt al que se accedió de forma remota mediante la aplicación móvil ShinePhone,

la cual recopila información del funcionamiento eléctrico del ciclo y el rendimiento de la energía eléctrica, como las entradas y salidas de carga en el inversor y las baterías (Figura 80).

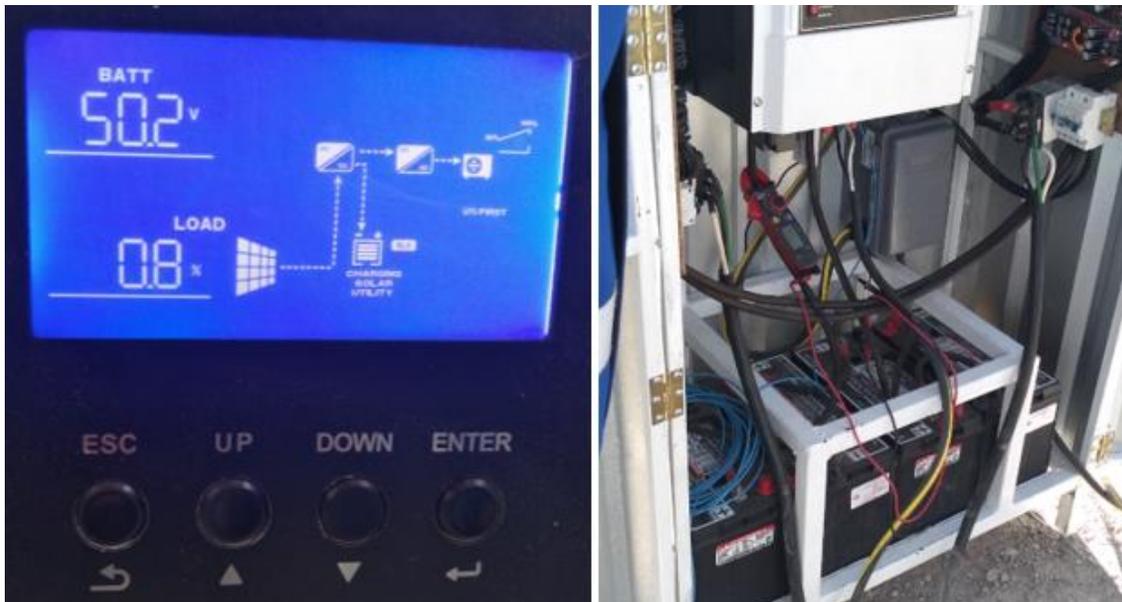
Figura 80. *Monitoreo mediante Software Growatt*



Nota. Adaptado de ShinePhone, por ShinePhone 2022.

Debido al largo periodo de operación y que se generaba menos energía eléctrica de la que se estaba consumiendo, el sistema de almacenamiento se fue agotando gradualmente, por lo que se llevó a cabo el retiro de luminarias para solamente dejar cargando las baterías del panel, las cuales se encontraban al 25% de su capacidad, sin embargo, al ver que el poder de recarga era bajo, se realizó la recarga mediante un generador eléctrico independiente de tipo diésel (Figura 81).

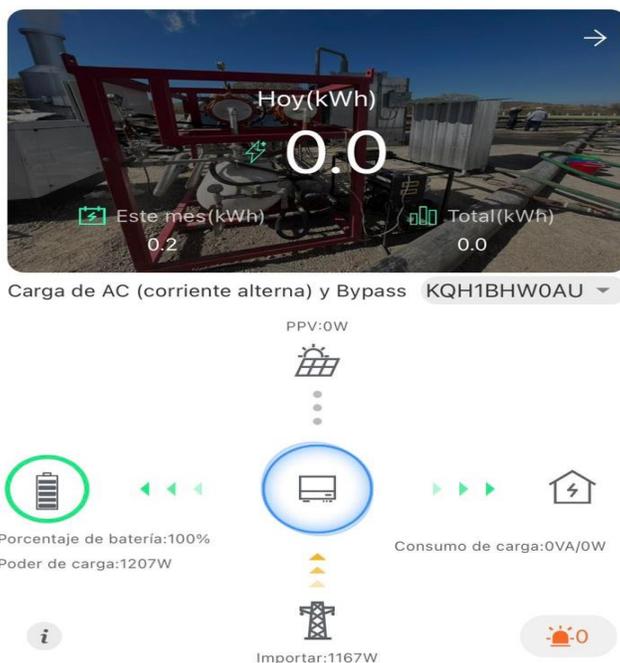
Figura 81. Recarga de baterías



Nota. Fotografía propia.

Para llevar a cabo un proceso de recarga más rápido, se ajustó el controlador de carga del inversor a una tensión de entrada de 48V y una corriente de 25A ya que por defecto solamente permitía alimentar las baterías a 48V y 5A. La recarga de las baterías se representó en el monitoreo por software como si fuera un importe de energía externo por interconexión y se consiguió el 100% de su capacidad en 3 horas bajo una potencia de 1207We (Figura 82).

Figura 82. Recarga de baterías al 100% de su capacidad



Nota. Adaptado de ShinePhone, por ShinePhone 2022.

4.4 Prueba de eficiencia en los generadores

Uno de los objetivos de la caracterización del generador en laboratorio fue prever el escenario al que el sistema eléctrico podría enfrentarse al realizar las pruebas operativas, sin embargo, dichas pruebas fueron realizadas en un entorno ideal, en el cual el motor de inducción y el variador de frecuencia proporcionaron parámetros de alta eficiencia, acciones que en campo no se vieron reflejadas, puesto que se enfrentaron diversas anomalías que influyeron en el resultado final, por tal motivo, se realizaron pruebas que permitieran conocer el nivel de eficiencia de los generadores usando el banco de caracterización. (Figura 83).

Figura 83. *Pruebas de eficiencia de generadores en campo*



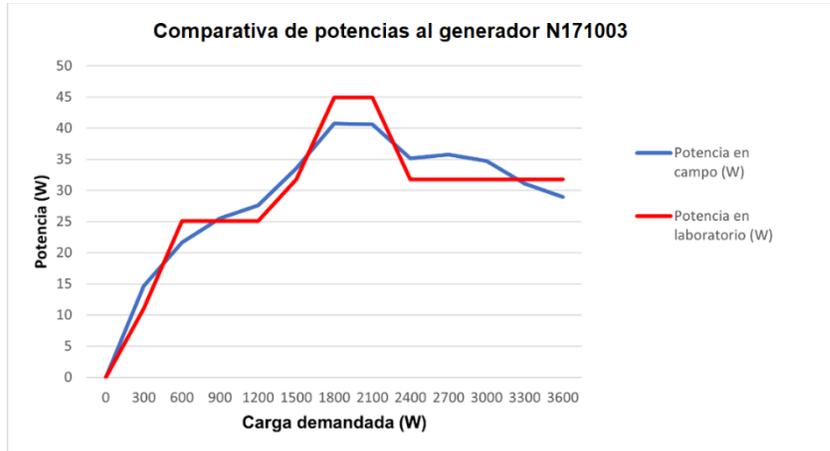
Nota. Fotografía propia.

4.4.1 Prueba de cargas escalonadas

La prueba consistió en demandar carga de forma escalonada a cada generador, por medio de resistencias térmicas del banco de caracterización, primero tomando los parámetros de función de los generadores en vacío y posteriormente demandando 300We cada minuto hasta un máximo de 6,300We con una presión en la bomba de 5bar y una presión de entrada en las turbinas que se mantuvo entre 2 y 2.4bar; como se puede observar en las Figuras 84 y 85 el generador N171003 entregó 28.94We a 3,600We de demanda, con un pico máximo de 40.71We a 1,800We y el generador N171004 entregó 62.56We a 2,700We de demanda, con un pico máximo de 69.45We a 2,100We.

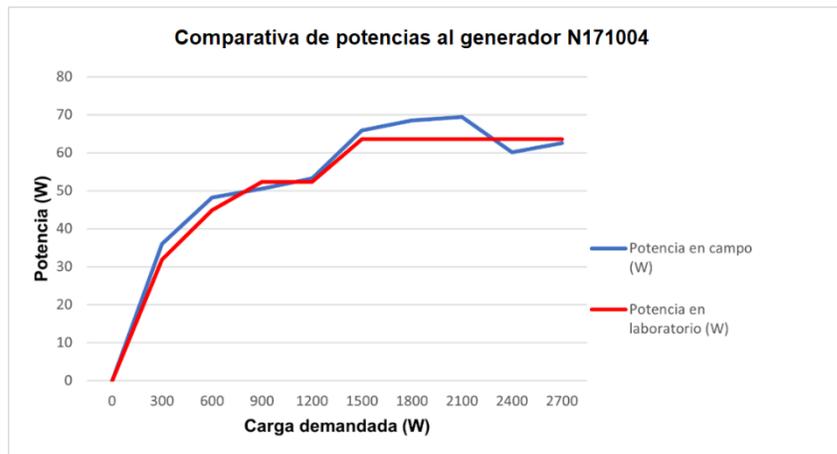
Nota. Las bases de datos de las pruebas de cargas escalonadas a los generadores N171003 y N171004 pueden ser consultadas en los Anexos 11 y 12 respectivamente.

Figura 84. Comparativa de potencias al generador N171003



Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 85. Comparativa de potencias al generador N171004



Nota. Elaboración propia (Excel).

4.4.2 Prueba operativa a diferentes rangos de presión

La prueba tuvo la finalidad de obtener los niveles de potencia en los generadores a 3,600 y 2,700We con el aumento gradual de presión en la bomba, para ello el banco de resistencias tuvo todos sus interruptores abiertos para dejar pasar la corriente y los generadores pudieran trabajar a tope, posteriormente se manipuló una válvula de aguja para aumentar la presión de la bomba comenzando en 6bar y aumentando de manera gradual 1bar por minuto hasta un máximo de 12bar,

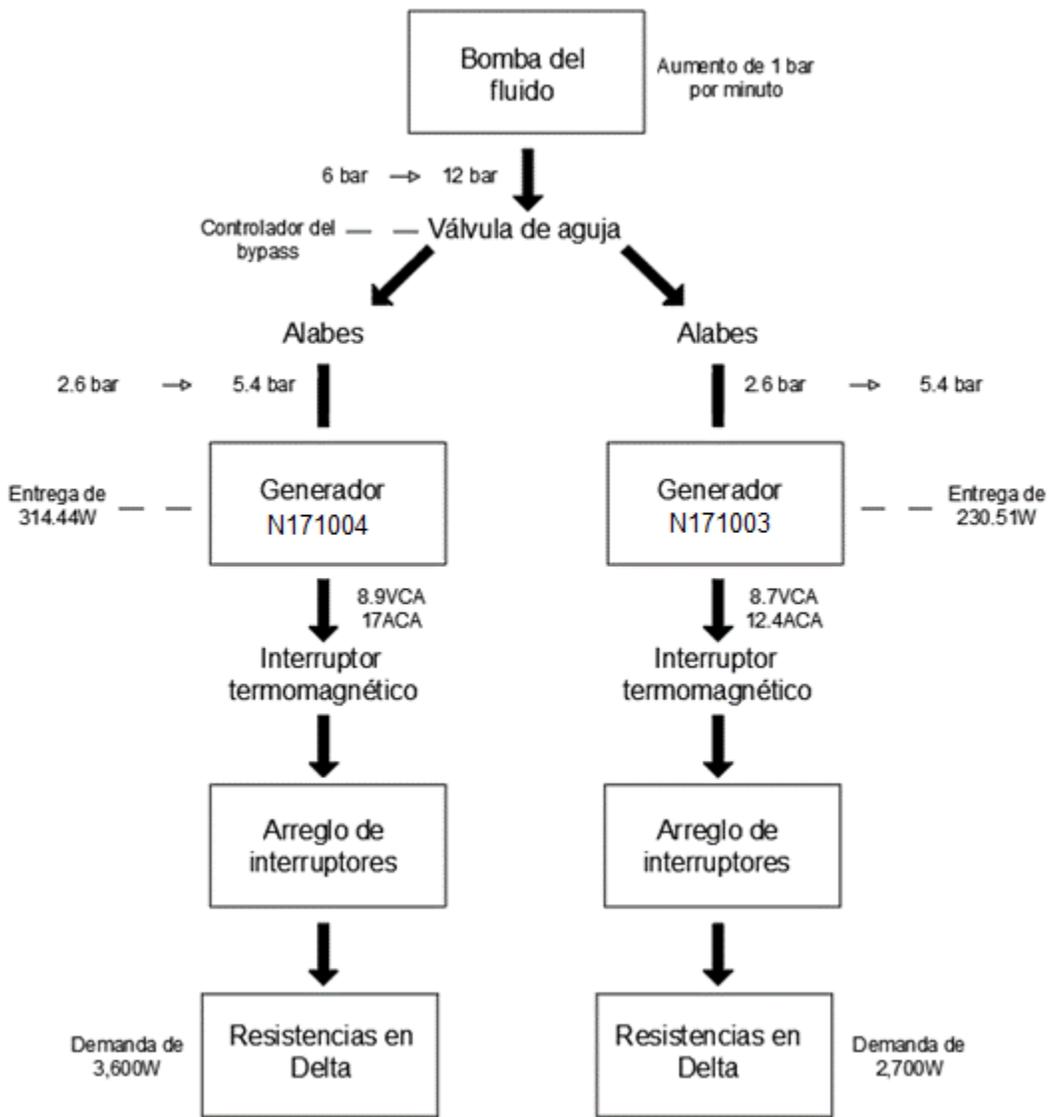
en consecuencia la presión de entrada en las turbinas aumento gradualmente, de 2.6bar al inicio y 5.4bar al final. Llevado a cabo esta tarea se registraron las potencias y velocidades de los generadores (Figura 86)

Generador N171003: Entrega de 230.51We a 3,600We de demanda con una velocidad aproximada de 2,400RPM.

Generador N171004: Entrega de 314.44We a 2,700We de demanda con una velocidad aproximada de 2,400RPM.

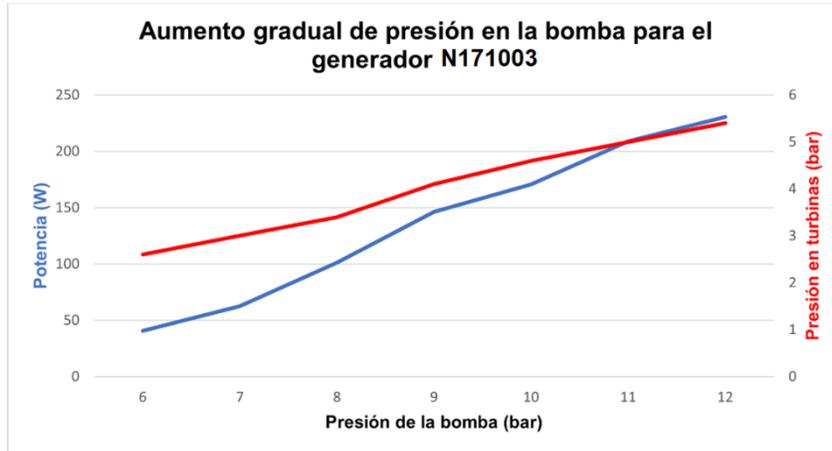
Nota. Las bases de datos de las pruebas a diferentes rangos de presión a los generadores N171003 y N171004 pueden ser consultadas en los Anexos 13 y 14 respectivamente.

Figura 86. Prueba operativa a diferentes rangos de presión



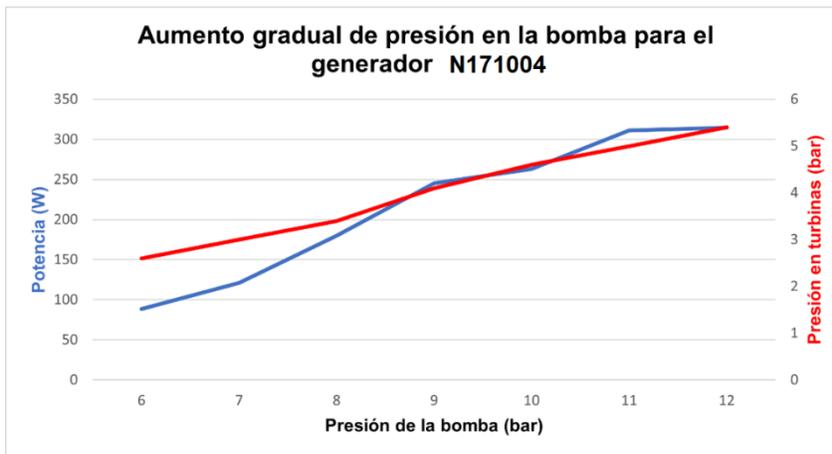
Nota. Elaboración propia (AutoCAD).

Figura 87. Aumento gradual de presión en la bomba para el generador N171003



Nota. Elaboración propia (Excel).

Figura 88. Aumento gradual de presión en la bomba para el generador N171004

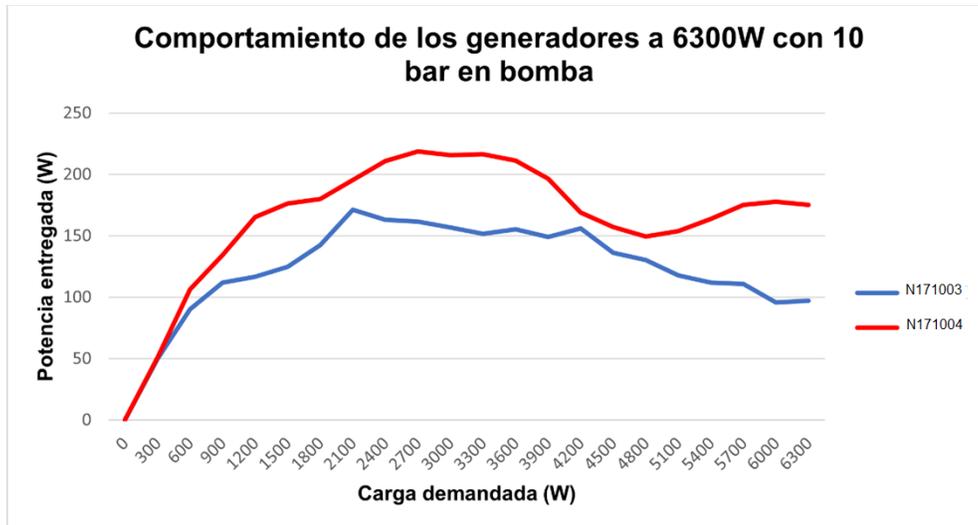


Nota. Elaboración propia (Excel).

Como se puede observar en las Figuras anteriores el aumento de la presión en la bomba es directamente proporcional al aumento de potencia en los generadores.

En la Figura 89 se muestra el comportamiento de ambos generadores al someterse a 6,300We de demanda, con 10bar de presión en la bomba y una presión de entre 4.3 – 5bar a la entrada de las turbinas.

Figura 89. Comportamiento de los generadores a 6300W con 10bar en bomba



Nota. Elaboración propia (Excel).

4.5 Conclusiones de pruebas operativas

El desarrollo de estas pruebas operativas se centró en analizar el comportamiento de implementación del sistema considerando factores ambientales reales que influyen en el comportamiento del sistema, pudiendo encontrar puntos de mejora para su implementación final y detectando errores para su solución inmediata con la finalidad de garantizar una implementación funcional correcta.

Prueba de estabilidad del sistema eléctrico: Obtener los valores de tensión y corriente en los generadores, operando en vacío y con carga, permitió conocer si en el sistema existían cargas transitorias, obstrucciones en la fuente de generación y conexiones o equipo en mal estado que afectarían la estabilización del sistema eléctrico. En esta prueba se encontraron fallas mecánicas en el generador N171005 (Turnigy Rotomax 150CC) que afectaron la sincronía con los demás componentes del sistema, por tal motivo, se hizo uso del generador Turnigy Rotomax 50CC (N171003), un dispositivo con estructura similar, pero de menor potencia, mediante el cual se consiguió una respuesta favorable para la estabilización, que permitió continuar las pruebas operativas.

Prueba de interrupción: La desconexión de dispositivos de gran potencia como lo son los generadores pueden generar sobretensiones de conmutación que en casos graves pueden dañar equipos conectados en el mismo sistema. La prueba determinó que las protecciones en el sistema y el sistema de almacenamiento son las adecuadas, teniendo una respuesta de acción inmediata.

Prueba operativa de 8 horas: Mediante esta prueba se determinó el funcionamiento adecuado del sistema, registrando variables operativas estables y no reportando sobrecalentamientos que afectaran el funcionamiento y eficiencia de los equipos.

Ambos generadores operaron con una velocidad aproximada a 2400RPM de 500We a 5kWe de demanda, debido a que la fuente secundaria (baterías) cubría la alimentación del sistema en mayor parte, por ende, los generadores tuvieron una entrega de potencia baja (Tabla 20).

Tabla 20. *Entrega de potencia en los generadores*

Demanda (W)	Velocidad (RPM)	Potencia Generador N171003 (We)	Potencia Generador N171004 (We)
500	2394	122.4	158.65
1000	2384	122.4	163.4
1500	2384	130.68	166.47
2000	2384	120.15	167.04
2500	2394	99.05	147.42
3000	2384	107.69	158.25
5000	2394	88.74	150.41

Prueba de eficiencia en los generadores: Las potencias obtenidas en campo y laboratorio son muy similares, lo que descarta que existan fallas en los generadores, por lo tanto, los bajos niveles de potencia se deben a que la presión de entrada en los álabes no es suficiente como para que los generadores trabajen de forma eficiente como en laboratorio, siendo que, si se contara con niveles de presión más altos, la eficiencia podría ser igual que en la caracterización en laboratorio.

5 Código de red

La realización del presente proyecto pretende abastecer de energía eléctrica a futuros proyectos geotérmicos de Grupo IIDEA. Como grupo de investigación es imprescindible que el Ciclo Binario IIDEA 10, no solo sea un sistema de generación de baja potencia que cumpla con objetivos particulares, si no que esta energía renovable pueda satisfacer las necesidades que demanda la sociedad mexicana garantizando el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, contribuyendo al objetivo de desarrollo sostenible de la ONU “Energía asequible y no contaminante”. Es por eso que la intención de Grupo IIDEA se enfoca en el escalamiento de esta tecnología para potencias más atractivas a clientes y en su momento pueda estar sujeto al cumplimiento del código de red, requisitos de vital importancia que deben cumplir los interesados en celebrar un contrato de interconexión.

El código de red es la RESOLUCIÓN Núm. RES/550/2021 de la CRE, publicada en el DOF por la que se expiden las disposiciones administrativas de carácter general que establecen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del SEN. Esta resolución es muy importante porque mediante ella se establecen los requerimientos técnicos mínimos necesarios para el desarrollo eficiente de los procesos de planeación, medición, control operativo, control físico, acceso y uso de la infraestructura eléctrica que están obligados a cumplir todos los usuarios del SEN, (CENACE, transportistas, distribuidores, generadores, comercializadores, suministradores, centrales eléctricas y centros de carga), sin embargo, el código de red solo es aplicable a centros de carga en niveles de media (entre 1 y menor o igual a 35kV) y alta tensión (mayor a 35kV) de más de 500kW, por lo que no aplica para centros de carga de baja tensión y potencia como el realizado en este trabajo, pero si para futuros proyectos como los ciclos binarios de 100kW y 1MW. Para llevar a cabo el cumplimiento del código de red, la CRE podrá llevar a cabo la verificación e inspección de la infraestructura y en caso de incumplir algún punto de lo que se marca en la normativa, se podrían emitir las sanciones establecidas de la LIE en el artículo 165, fracción I, inciso k, una multa del 2 al 10 por ciento de los ingresos brutos percibidos en el año anterior o de acuerdo con la fracción II, inciso c, una multa de cincuenta mil a doscientos mil salarios mínimos por incumplir las disposiciones en materia de la calidad, confiabilidad, continuidad y seguridad del SEN (Santoyo y Torres, 2010; Prol, 2002).

5.1 Importancia del código de red en México

En los últimos años varios países han implementado y establecido normativas y documentos referentes a un código de red en sus territorios por medio de entes reguladores locales (Tabla 21), lo que les ha permitido salvaguardar la correcta operación de la energía eléctrica para que los usuarios y suministradores tengan energía eléctrica de buena calidad, esto le permite a México incentivar el desarrollo, operación, mantenimiento, modernización y ampliación del SEN de forma coordinada, con base en requerimientos técnicos y operativos de manera eficiente y económica.

La CFE y la CRE, son los organismos públicos que se encargan de llevar a cabo toda la coordinación para garantizar su cumplimiento de manera transparente, eficiente e imparcial con el propósito de obtener el máximo rendimiento posible de la energía eléctrica del país.

Tabla 21. *Código de red alrededor del mundo*

País	Organismo	Nombre del documento	Año de emisión
Gran Bretaña	National Grid	The Grid Code.	2015
México	Comisión Reguladora de Energía	Criterios de eficiencia, Calidad, Confiabilidad, Continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional.	2015
Alemania		Grid Code	
Países Bajos	TenneT	- High and extra high voltage.	2015
Estados Unidos	Electric Reliability Council of Texas	ERCOT, Nodal Operating Guides Section 2: System Operations and Control Requirements.	2016
Argentina	Compañía Administradora del Mercado Mayorista	Los Procedimientos.	2016

Eléctrico			
Consejo Nacional de		Regulación No. CONELEC	
Ecuador	Electricidad	006/00.	2015

Nota. Adaptado de *Análisis de la implementación de un código de red para sistemas de control (AVR, GOV y PSS) de unidades de generación convencional del sistema nacional interconectado*, por Patiño, R., 2019.

En la actualidad el código de red mexicano no contiene información específica para centrales eléctricas operadas por geotermia, aun así, estas centrales deberán pasar por estudios que permitan a la CRE determinar que contienen los requerimientos técnicos mínimos necesarios que garanticen que la energía eléctrica que producen, procesan y suministran es de calidad, en temas de operación, planeación, generación y centros de carga (Figura 90). Si los estudios cumplen con lo establecido en el código, la CRE les otorgará a las centrales un permiso que les permitirá interconectarse a la red en la compañía suministro calificado, sean de media o alta tensión. En palabras de Figueroa (2017) expresidente nacional de AMERIC, esto crea el gran reto de controlar a muchos participantes y evitar que la red tenga problemas que terminen con apagones o mala calidad en la energía que los consumidores reciben.

Figura 90. *Temas incluidos en el código de red*

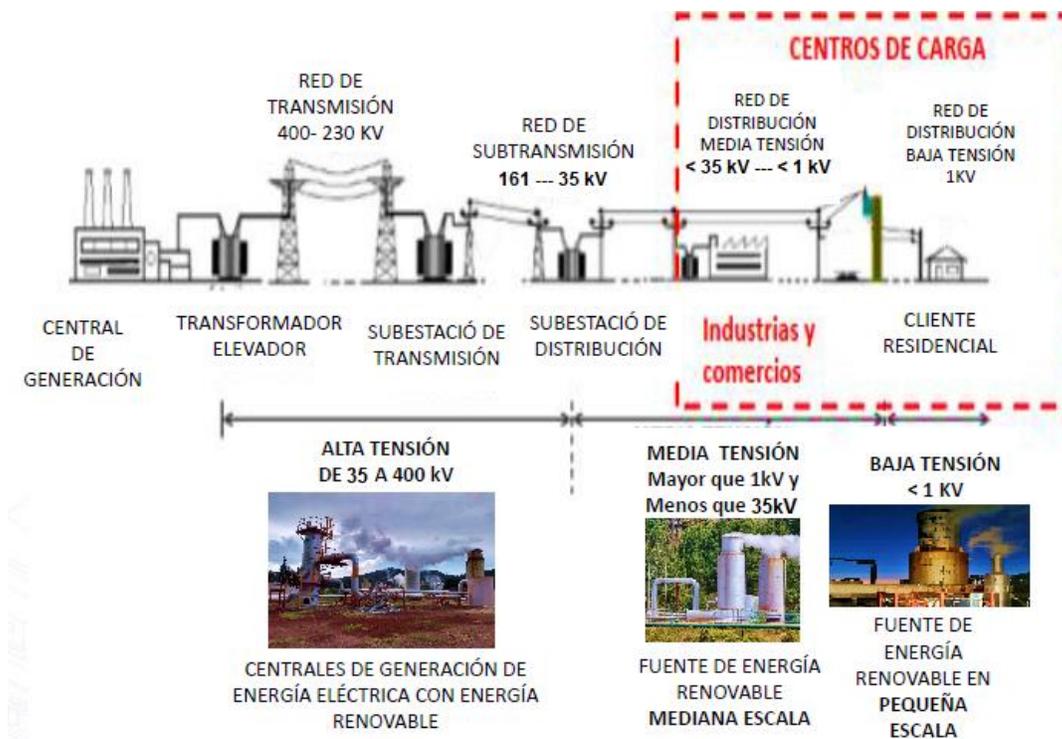


Nota. Adaptado de *Integrando Energías Renovables en Sistemas de Potencia en Centroamérica*, por Beltrán, H., 2016.

5.2 Estructura para el cumplimiento

La estructura para el cumplimiento del código de red se divide en tres niveles que serán aplicables para toda la infraestructura y personal que involucre a los interesados en la interconexión en media y alta tensión (Figura 91), cabe mencionar que actualmente (mayo 2022), no existe ningún organismo avalado por la CRE o la CENACE que garantice que sus procedimientos son los correctos para el cumplimiento del código de red, por lo tanto, cada interesado en la interconexión a la red deberá seguir sus propios pasos para cumplir con el código, a pesar de esto, en los siguientes apartados se muestran procedimientos, manuales y criterios técnicos que aplican, los cuales servirán de guía para evitar las sanciones establecidas por la LIE.

Figura 91. *Sistema Eléctrico Nacional*



Nota. Adaptado de *Implementación técnica del código de red*, Por Uribe, E., 2021, Curso Neopetrol.

5.2.1.1 *Proceso de cumplimiento de la normativa código de red para centros de carga*

On Site Services, 2021, publicó un proceso para cumplir con la normativa código de red, una serie de pasos que tienen el objetivo de guiar a los usuarios que planeen la interconexión de su centro de carga a la red, cumplir con la entrega de los documentos esperados por la CRE.

1. Identificación de los requerimientos técnicos aplicables al centro de carga.
2. Realización de un estudio de calidad de potencia.
3. Realización de diagrama unifilar que indique en el punto de interconexión todas las cargas distribuidas de la instalación.
4. Uso de software para cálculo de corto circuito que determine el caso simple más severo de afectación para el suministrador y centro de carga en el punto de interconexión.
5. Con la información del recibo de CFE y el estudio de calidad de potencia, determinar el cumplimiento o las desviaciones encontradas de acuerdo a la nueva normativa del código de red.
6. Realización de un plan de trabajo con las acciones y plazos de ejecución que aseguren el cumplimiento de la normativa código de red.

Ante el cumplimiento de los puntos señalados, se podrá presentar ante la CRE un escrito firmado por el representante legal del centro de carga que deberán tener lo siguiente:

- Información básica sobre el centro de carga.
- Requerimientos técnicos aplicables y obligatorios para el centro de carga.
- Resultados de los estudios eléctricos y calidad de potencia.
- Parámetros que no se están cumpliendo (Fuera de rango).
- Estrategia prevista para asegurar el cumplimiento.

5.2.2 **Procedimientos y manuales regulatorios**

Los procedimientos y manuales regulatorios del código de red son acciones que deberán realizar usuarios del SEN para el desarrollo eficiente de los procesos de planeación, medición, control operativo, control físico, acceso y uso de la infraestructura eléctrica; estos procedimientos

y manuales especifican, detallan operaciones y actividades determinadas secuencialmente en relación con los responsables de la ejecución, los cuales deberán cumplir con lo establecido en los lineamientos y normas vigentes.

Tabla 22. *Procedimientos*

Procedimiento	Objetivo	Aplicación en Ciclos Binarios (100kW y 1MW)
Procedimiento de acciones para el control de tensión	Coordinar las acciones para controlar los niveles de tensión en las instalaciones del SEN.	Cumplirán con los rangos de tensión establecidos en el Manual Regulatorio de Estados Operativos.
Procedimiento para administración de licencias	Llevar las actividades para administrar las licencias de trabajo que marquen los lineamientos y normas vigentes.	Realizarán actividades de puesta en servicio, modificaciones y mantenimiento preventivo y correctivo en su infraestructura.
Procedimiento del despacho de generación	Satisfacer la demanda de energía del SEN bajo una adecuada disponibilidad de energía y reservas considerando las restricciones de red vigentes.	Deberán apegarse a los lineamientos de la LIE y el seguimiento de los programas de generación del Mercado de Día en Adelanto y Mercado en Tiempo Real.
Procedimiento de reducción de generación por confiabilidad	Reducir la generación eléctrica de manera coordinada, ordenada, segura y confiable, ante condiciones extraordinarias en el SEN.	Reducirán la generación eléctrica ante variaciones de frecuencia por arriba de los valores permitidos en el Manual Regulatorio de Estados Operativos.
Procedimiento de restablecimiento	Restablecer las condiciones operativas del SEN para recuperar las condiciones normales de operación.	Coordinarán las tareas para restablecer las condiciones operativas normales posterior a un disturbio de manera coordinada, ordenada, segura y confiable.
Procedimiento de comunicación y coordinación	Realizar el intercambio de información entre operadores y eventos operativos, disturbios y restablecimiento de equipos,	Atenderán lo que indique el centro de interconexión, dígame CENACE, CFE u otro organismo operador del

operativa	con lo cual se le permitirá al operador establecer la prioridad de los estados operativos de diferentes centros de control.	intercambio de información.
-----------	---	-----------------------------

Tabla 23. *Manuales regulatorios*

Manual regulatorio	Contenido
Planeación del sistema eléctrico nacional	Incluye la metodología para la elaboración de programas de ampliación y modernización, considerando las condiciones bajo las cuales debe operar el SEN.
Estado operativo del SEN	Define los estados operativos y las acciones en los que puede incurrir el SEN, con la finalidad de mantener una condición estable y reducir el impacto sobre el SEN si existe un disturbio que provoque una condición operativa insegura.
Control y operación de la generación del SEN	La potencia activa, el control y la operación de la generación del SEN deberán ser administrados siguiendo los criterios de este manual para permanecer en un estado operativo normal.
Coordinación operativa	Se enfoca en los lineamientos que deberán cumplir todos los centros participantes a integrarse al código de red, para garantizar la seguridad del personal, de las instalaciones y del propio SEN.
Requerimientos técnicos para la interconexión de centrales eléctricas del SEN	Documento de consulta sobre los requerimientos técnicos mínimos necesarios que deberán cumplir las centrales eléctricas que deseen interconectarse al SEN.
Requerimientos técnicos para la conexión de centros de carga	Establece los requerimientos técnicos que deben cumplir los centros de carga que se conecten al SEN, en media o alta tensión, los cuales sirven para garantizar un suministro eléctrico que sea eficiente, confiable, continuo, de calidad y sustentable.

5.2.3 Criterios técnicos

Los criterios técnicos son requerimientos técnicos del Manual Regulatorio de Conexión que son aplicables a centros de carga conectados en media y alta tensión que tengan una demanda contratada menor o mayor – igual a 1MWe, aspectos que involucran a los ciclos binarios de 100kWe y 1MWe que tiene contemplados Grupo IIDEA.

Tabla 24. *Requerimientos aplicables a los centros de carga*

Requerimiento	Centros de Carga	Centros de Carga	Centros de Carga
	conectados en Media Tensión con demanda contratada < 1 MW (Ciclo Binario de 100kWe)	conectados en Media Tensión con demanda contratada ≥ 1 MW (Ciclo Binario de 1MWe)	conectados en Alta Tensión
Tensión	Aplica	Aplica	Aplica
Frecuencia	Aplica	Aplica	Aplica
Corto circuito	Aplica	Aplica	Aplica
Factor de Potencia	No aplica	Aplica	Aplica
Protecciones	Aplica	Aplica	Aplica
Control	Aplica sólo para recursos de demanda controlable	Aplica sólo para recursos de demanda controlable	Aplica sólo para recursos de demanda controlable
Intercambio de información	Aplica conforme lo señale el Manual de TIC	Aplica conforme lo señale el Manual de TIC	Aplica conforme lo señale el Manual de TIC
Calidad de la potencia	Aplica sólo el desbalance de tensión y de corriente	Aplica	Aplica

Nota. Adaptado de *Resolución Núm. RES/550/2021*, por Comisión Reguladora de Energía.

5.2.3.1 Tensión

Indica los valores mínimos y máximos de tensión entre fases que deben soportar los centros de carga conectados a la red ante variaciones de tensión de manera permanente, mientras

estén en un estado operativo normal y para condiciones distintas al estado operativo normal ante variaciones de tensión de manera temporal hasta por 20 minutos.

5.2.3.2 *Frecuencia*

Indica las variaciones de frecuencia que podrá soportar el centro de carga para permanecer conectado de manera permanente y en un máximo de 30 minutos y también indica la infraestructura requerida para que los centros de carga no causen desviaciones de frecuencia mayores a 0.1Hz en los sistemas interconectados que componen el SEN ante una conexión, desconexión o variación de carga.

5.2.3.3 *Corto circuito*

Los requerimientos para corto circuito son varios e involucran al CENACE (alta tensión) y al distribuidor (media tensión) en su mayoría, siendo estos los que deberán calcular e informar a los centros de carga a conectarse en alta y media tensión, la corriente máxima y mínima de corto circuito, trifásica y monofásica, en el punto de conexión; de igual manera deberán indicar los niveles de corto circuito a seguir en los puntos de conexión, los cuales servirán tanto para dimensionar equipo eléctrico como para la coordinación de protecciones.

5.2.3.4 *Factor de potencia*

Este apartado solo aplicaría para el Ciclo Binario de 1MWe, en él se indica el factor de potencia que deberán mantener centros de carga de media y alta tensión en estado operativo normal, el cual deberá estar entre 0.95 en atraso y 1.0 en el Punto de Conexión, con medición cinco – minutal conforme a la NOM-001-CRE/SCFI-2019.

Dichos Centros de Carga deberán cumplir con el requerimiento de al menos 95% del tiempo durante un periodo mensual.

5.2.3.5 *Protecciones*

Este apartado se enfoca en los esquemas de protección requeridos para los puntos de conexión de los centros de carga en la RNT y en RGD, los cuales deberán apearse al Manual para

la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga, además de atender la instalación de equipos necesarios para los esquemas de acción remedial y esquemas de protección de sistema.

En este requerimiento el distribuidor deberá ajustar las protecciones en el punto de conexión para la puesta en servicio y deberá verificar los sistemas de protección atendiendo los siguientes criterios:

- Detección de fallas internas y externas a la red particular.
- Operación ante baja y alta tensión.
- Operación ante baja y alta frecuencia.
- Operación ante sobrecarga de circuitos.
- Operación ante sobrecarga de transformadores.
- Operación de protecciones de respaldo.

Los sistemas de protección de los centros de carga deberán estar coordinados y ser capaces de solucionar las fallas causadas en sus instalaciones.

5.2.3.6 Control

Este requerimiento aplica solamente para recursos de demanda controlable y será el CENACE quien establezca las características del registro de instrucciones de despacho, de conformidad con el Manual de Tecnologías de Información y Comunicación.

5.2.3.7 Intercambio de información

Los requerimientos para el intercambio de información en centros de carga deberán cumplir con lo establecido en el Manual de Requerimientos de Tecnologías de la Información y Comunicaciones para el SEN y el MEM, debiendo proporcionar las características del protocolo de comunicación para el intercambio de información con los centros de carga, los equipos y medios de comunicación requeridos para el envío de información de telemetría en tiempo real de forma directa hacia el CENACE y las características de ésta para los centros de carga, además, de las responsabilidades de mantenimiento y modernización.

5.2.3.8 Calidad de potencia

No deberán existir distorsiones armónicas en corriente, desbalances de tensión o corriente y fluctuaciones en la tensión del suministro eléctrico causadas por las instalaciones de los centros de carga en los Puntos de Conexión a la red. (Los centros de carga de media tensión, con demanda contratada menor a 1MWe como el ciclo binario de 100kWe sólo deberán cumplir con el requerimiento de desbalance de tensión y de corriente).

5.3 Estudio de calidad de potencia

El objetivo de un estudio de calidad de la potencia es diagnosticar el estado del sistema eléctrico por medio de un analizador de redes, el cual determina los aspectos críticos de operación basados en las indicaciones dadas en el código de red, en donde se determinan los límites operativos de las variables de calidad de potencia a analizar, los cuales deberán ser realizados en centros de carga de media y alta tensión (Tabla 25).

Tabla 25. *Estudios de calidad de potencia para media y alta tensión*

Estudios de media tensión	Estudios de alta tensión
Fluctuaciones de tensión	Fluctuaciones de tensión
	Cambios de frecuencia
Cambios de frecuencia	Factor de potencia
	Armónicos de corriente
Desbalances de corriente	Flickers
	Desbalances de corriente

Nota. Adaptado de v77 *Como saber SI aplica el código de red a mi centro de carga?* Por On Site Services, 2021.

Este tipo de estudios no deben confundirse con los estudios de calidad de energía, ya que los de energía no tienen una normativa bajo la cual regirse en México (se utilizan normas internacionales, como las IEC) y pueden ser tan básicos o completos como se desee, además de no requerir un equipo específico para llevarlo a cabo, por otro lado, los de calidad de potencia, deben realizarse con un equipo que cumpla condiciones específicas, como lo hace el Nexus 1500 (Figura 92), un analizador de media/alta tensión que sirve para verificar la calidad de potencia, un

instrumento comúnmente utilizado en la industria para trabajos de este tipo. El Nexus 1500 es una tecnología diseñada específicamente para empresas de electricidad e industria que proporciona un análisis y monitoreo de calidad de potencia en tiempo real para la rápida detección de eventos. Este instrumento es capaz de capturar la historia del desempeño del voltaje y eventos de calidad de potencia en memoria a bordo para un detallado análisis forense posterior que graba fallas y disturbios de voltaje.

Figura 92. *Analizador de calidad de onda Nexus 1500*



Nota. Adaptado de *Serie NEXUS, Analizador de calidad de onda Nexus 1500*, Amperis.

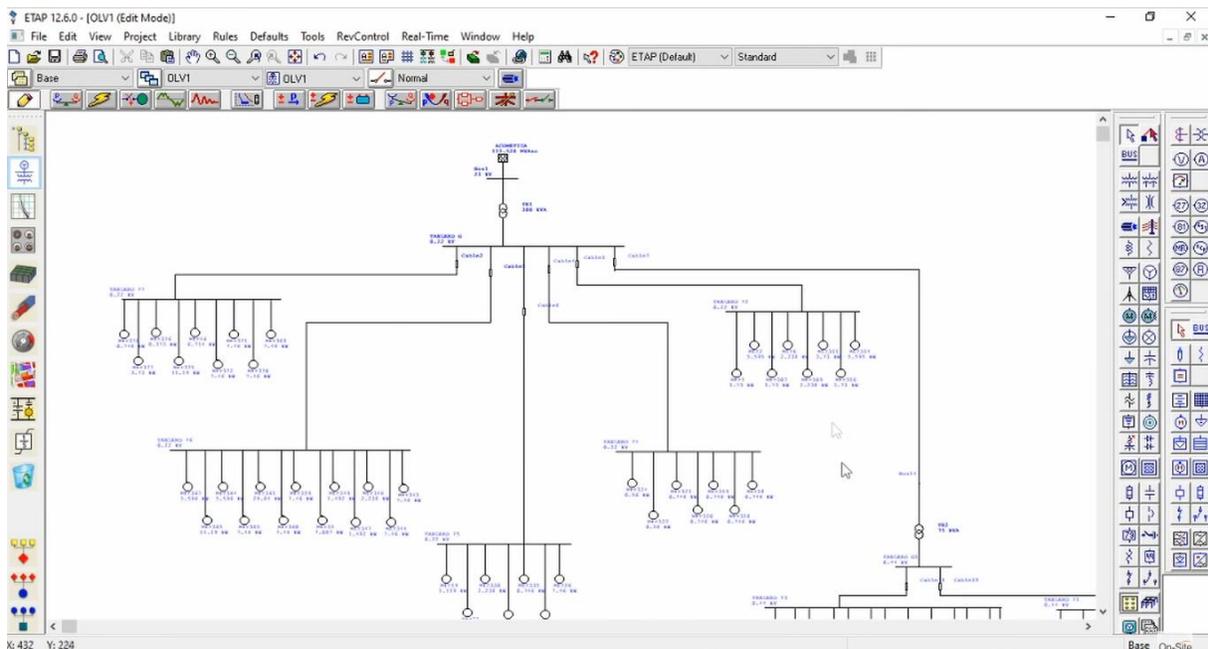
Nexus 1500 es un dispositivo de múltiples aplicaciones de medición, que realiza la grabación de formas de onda para la elaboración de reportes de calidad de potencia detallados, lo que garantiza un reconocimiento completo del sistema eléctrico que permite detectar las variables de incumplimiento que deberán ser atendidas para cumplir los criterios técnicos del código de red.

5.4 Estudio de corto circuito y diagrama unifilar

Para llevar a cabo este punto lo primero es tener el diagrama unifilar de la instalación eléctrica e identificar las fuentes de aportación de corriente de corto circuito, que por lo general son el suministro eléctrico que está representado como una acometida, los motores y/o generadores que estén dentro de la instalación y el transformador, que es el principal elemento que limita la corriente de corto circuito; posteriormente se realiza el diagrama unifilar de la instalación eléctrica

que indique el punto de interconexión con CFE, utilizando software que se adapte con lo estipulado en la NOM-001-SEDE-2012; uno de estos softwares para la realización de estudios de corto circuito es ETAP (Figura 93), el cual proporciona los datos y obtención de resultados de cortos y genera los reportes correspondientes de la instalación para los cortos circuitos en los buses que se seleccionen.

Figura 93. Diagrama Unifilar en ETAP



Nota. Adaptado de v34 Estudio de corto circuito a centro de carga usando software ETAP, por On Site Services, 2020.

5.5 Plan de trabajo y presentación ante la CRE

Con la información del recibo de la CFE y los puntos que se han mencionado anteriormente, se tienen los elementos para definir si se cumple o no con el código de red, en casos de incumplimiento, se hará un listado de las desviaciones encontradas y en caso de cumplimiento se acredita mediante un reporte soportado por los estudios técnicos de la instalación, por lo tanto, se procede con la elaboración del plan de trabajo.

El plan de trabajo es el procedimiento previo al contrato, un documento de carácter informativo que se proporciona a la CRE con la información mínima necesaria en el que se indican las acciones que se llevarán a cabo para asegurar el cumplimiento de la normativa código de red, con base a los tiempos y prácticas prudentes de la industria eléctrica. Al ser un documento de carácter informativo no está dispuesto al visto bueno o aprobación de la CRE, sin embargo, debe ser presentado al ente regulador para considerarlo en los procesos de vigilancia y monitoreo.

El documento deberá estar firmado por el representante legal del centro de carga y deberá contener información básica sobre el centro de carga, requerimientos técnicos aplicables y obligatorios para el centro de carga, resultados de los estudios eléctricos y calidad de potencia en formatos que proporciona la CRE y una estrategia para asegurar el cumplimiento con fechas definidas (máximo 2 años).

La correcta aplicación del código de red representa distintos retos que deberá afrontar Grupo IIDEA como diseñadores e instaladores de ciclos binarios, puesto que actualmente no se cuenta con información específica en México que considere las particularidades que conllevan de los ciclos binarios operados con geotermia, es por eso que como grupo de investigación Grupo IIDEA deberá involucrarse más en las relaciones empresariales del área eléctrica que garanticen el éxito de esta tecnología en México, por ejemplo la promoción de incentivos a las tecnologías de generación distribuida para su desarrollo, así como también la planificación de estos centros de carga y centrales eléctricas que contemplen las variables eléctricas que puedan perjudicar a los usuarios del servicio eléctrico al momento de su adjudicación a la red.

6 Conclusiones

México posee un gran potencial de recursos geotérmicos que no son totalmente aprovechados, debido principalmente a obstáculos de carácter económico que están relacionados con las elevadas inversiones iniciales, el alto riesgo en etapas tempranas y el largo tiempo requerido para desarrollar proyectos geotérmico – eléctricos, a diferencia de otros proyectos con energía limpia, en donde los riesgos son menores y el tiempo de retorno de inversión es menor, lo hace ser un negocio no tan atractivo para inversionistas; para solucionarlo es necesario el apoyo de mecanismos financieros otorgados por gobiernos y entes particulares que permitan reducir los riesgos con la finalidad de que los inversionistas puedan tener seguridad e interés en la geotermia, además de crear estímulos para la investigación con los que se consigan innovar en las tecnologías de los sistemas existentes que permitan el total aprovechamiento de la energía geotérmica como por ejemplo, empleando usos directos en baja y media entalpía, como lo hará el Ciclo Binario IDEA 10 aprovechando remanentes geotérmicos o fuentes geotérmicas de baja entalpía.

La elaboración del presente trabajo logró el objetivo de desarrollar la ingeniería eléctrica para el ciclo binario IDEA 10 operado con energía geotérmica para una producción de energía eléctrica de hasta 6kWe. Cantidad de energía eléctrica que permite satisfacer de manera continua las necesidades básicas de una familia mexicana, de acuerdo con la SEMARNAT, el estado con menor consumo de energía eléctrica por hogar en el 2016 fue el Estado de México con 856.56kWh con un promedio de 3.77 personas por hogar y el estado con mayor consumo fue Sonora con 4488.42kWh con un promedio de 3.41 personas por hogar, por lo tanto el presente proyecto puede proveer energía eléctrica de manera satisfactoria a más de un hogar mexicano o bien, a dispositivos que requieran energía eléctrica cerca del lugar donde fue instalado al ser un sistema de generación distribuida como se tiene planteado para este proyecto en un futuro, el cual proveerá de energía eléctrica a futuros proyectos del Grupo IIDEA.

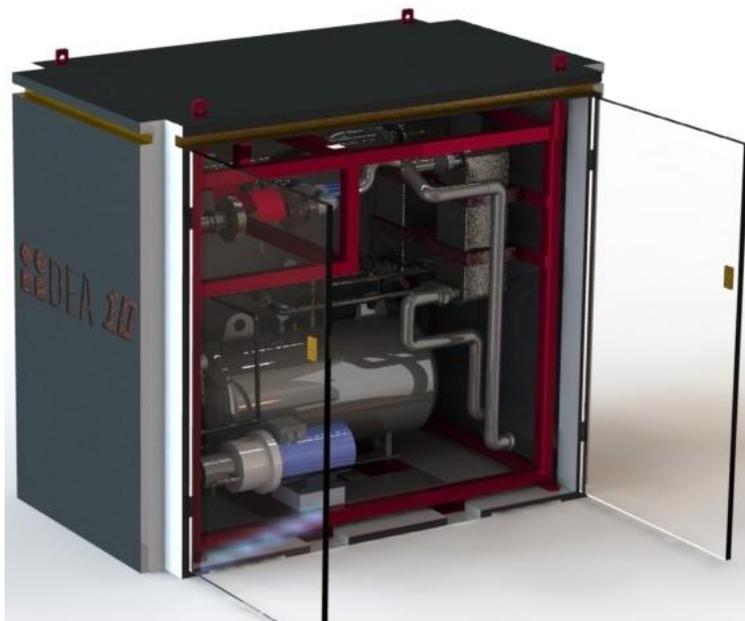
Los parámetros de respuesta del generador caracterizado bajo condiciones escalonadas mostraron un mejor desempeño a velocidades por debajo de las 12000RPM, con una demanda de 3000We, generando 1290We de potencia activa y 1844We de potencia aparente, con pérdidas de

553.23We en una temperatura estable de 60°C, cabe mencionar que estos valores pueden ser mayores, sin embargo, en las pruebas de caracterización solo se consiguió una eficiencia del 70%, por lo que consiguiendo una mayor presión en los álabes de las turbinas podría conseguirse una velocidad mayor en el rotor del generador, que permita la entrega de variables operativas mayores y por lo tanto una eficiencia mejor.

La realización de las pruebas operativas en campo resultaron satisfactorias, al cumplir el objetivo de suministrar corriente eléctrica en el centro de carga, el cual obtuvo una potencia total de demanda equivalente a 4193We de 5000We demandados; de los 4193We, 239We fueron proporcionados por los generadores y 3954We por el sistema de almacenamiento debido a que hubo una caída importante de presión de la bomba que dirige el fluido a los álabes de los generadores por la obstrucción por incrustaciones de sílice que impidió conseguir una presión alta para el funcionamiento eficiente de las turbinas, además de la falta de refrigerante en el ciclo binario, que provocó que los generadores no pudieran cubrir toda la demanda del sistema y las baterías se encargaran de suministrar la energía, promoviendo su descarga paulatina, a pesar de esto, el ciclo binario tuvo una operación constante sin presentar errores en un periodo de pruebas de 8 horas continuas y si bien, no se contó con los recursos suficientes para realizar pruebas continuas de 24 horas, se puede concluir con la prueba de 8 horas y la semana que estuvo trabajando el ciclo binario, que el sistema es estable y podría operar en un escenario 24/7 como otras plantas geotérmicas.

El desarrollo del sistema eléctrico del Ciclo Binario IDEA 10 es una idea original y al ser un trabajo de investigación, posee puntos de mejora que serán atendidos en su diseño final para un diseño comercial (Figura 94), siendo el principal punto de mejora el cambio de los generadores eléctricos por otros con capacidad de generación de 5kWe cada uno, recordando que los usados en este proyecto poseen una capacidad de entrega bajo condiciones operativas óptimas (90 – 100% de eficiencia) de 1658 – 1844We, otro cambio dentro del panel eléctrico sería el del inversor de corriente por uno con capacidad mayor a 10kWe, que permita recibir el total de energía otorgada por los generadores y finalmente la implementación de un módulo de ventilación en la carcasa comercial.

Figura 94. *Diseño comercial IDEA 10*



Nota. Adaptado de *IDEA 10 Semi Abierto – Carcasa comercial*, por Encarnación, J., 2021.

La energía geotérmica es un recurso renovable, sustentable, limpio y seguro que permite la generación de electricidad de forma continua y confiable que contribuye en la diversificación de las fuentes de energía que permiten satisfacer la demanda del país, sin embargo, es necesaria la cooperación de diversos organismos en el país que contribuyan al desarrollo de este recurso para su óptimo aprovechamiento, siguiendo y acatando todas las indicaciones que marca la ley y los organismos reguladores de energía para un control que permita la entrega de energía de calidad a los usuarios del Sistema Eléctrico Nacional. (Encarnación, *IDEA 10 Semi Abierto – Carcasa comercial*, 2021)

Esta investigación amplía el conocimiento sobre la instrumentación eléctrica en sistemas de microgeneración, promoviendo el avance científico para aprovechar los recursos de baja entalpia de México, reafirmando el compromiso que tienen los grupos de investigación del país y sus resultados proporcionarán información útil para el escalamiento en los ciclos binarios de 100kWe y 1MWe que llevará a cabo Grupo IIDEA.

7 Nomenclatura

AMERIC	Asociación Mexicana de Empresas del Ramo de Instalaciones para la Construcción
AWG	American Wire Gauge
BJT	Bipolar Junction Transistor
BT	Baja Tension
CeMIEGeo	Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica
CENACE	Centro Nacional De Control De Energía
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CONELC	Consejo Nacional de Electricidad
PRODETES	Proyecto de Desarrollo de Tecnologías de Energía Sustentable para el Cambio Climático
DOF	Diario Oficial de la Federación
ENAL	Energías Alternas, Estudios y Proyectos SA de CV
ERCOT	Electric Reliability Council of Texas
IIDEA	Instituto de Investigación Desalación y Energías Alternas
LIE	Ley de la Industria Eléctrica
MEM	Mercado Eléctrico Mayorista
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OSS	On Site Services
ORC	Organic Rankine Cycle
RGD	Red General de Distribución
RPM	Revoluciones Por Minuto
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SGM	Servicio Geológico Mexicano
SPWM	Sine Pulse Width Modulation
TIC	Tecnologías de la Información y Comunicación
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

8 Anexos

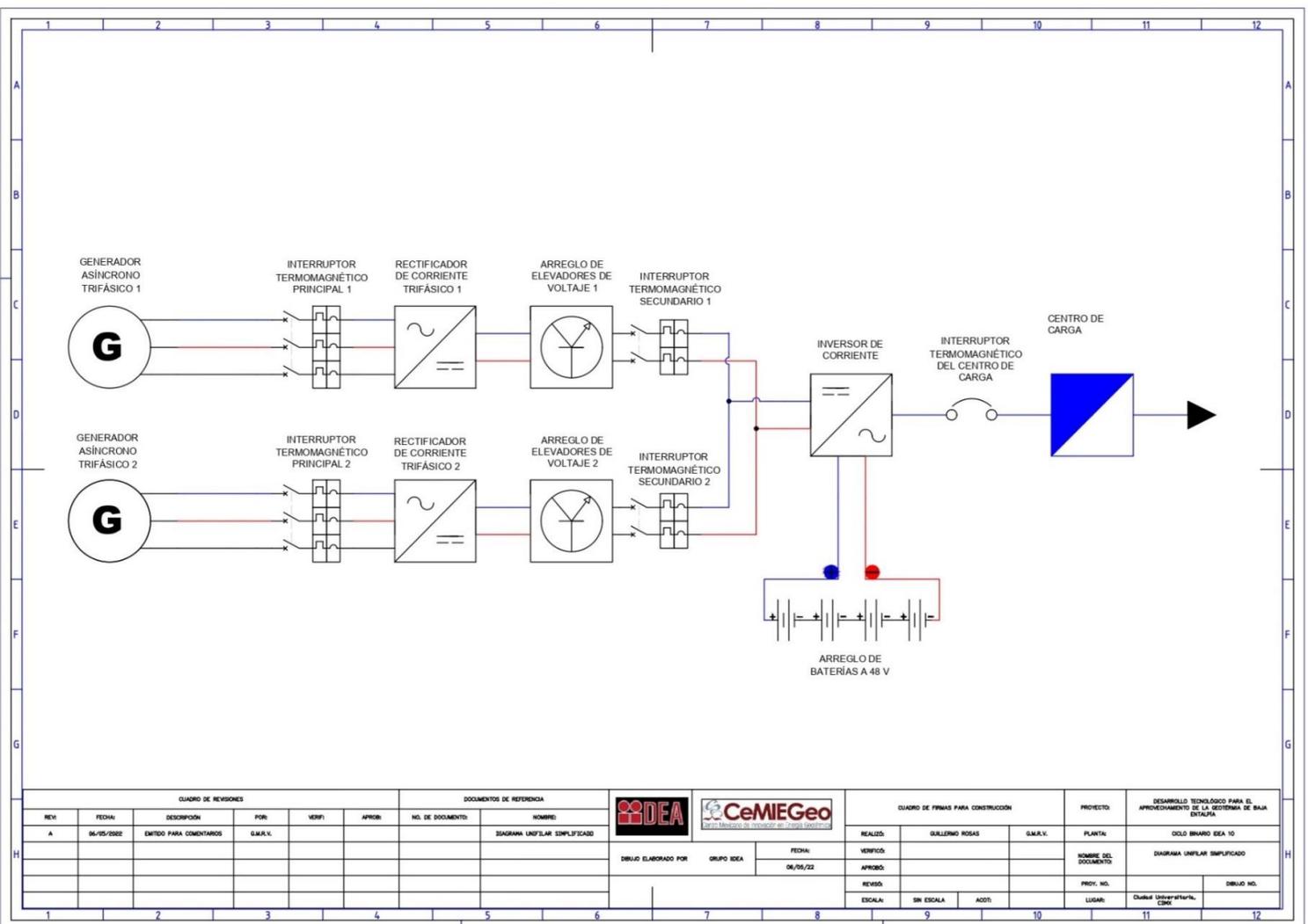
El siguiente apartado muestra información complementaria de elaboración propia para facilitar la comprensión de lo expuesto en el presente proyecto como diagramas unifilares, base de datos y fichas técnicas de los dispositivos involucrados en el sistema.

Nota. Los anexos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 son de elaboración propia.

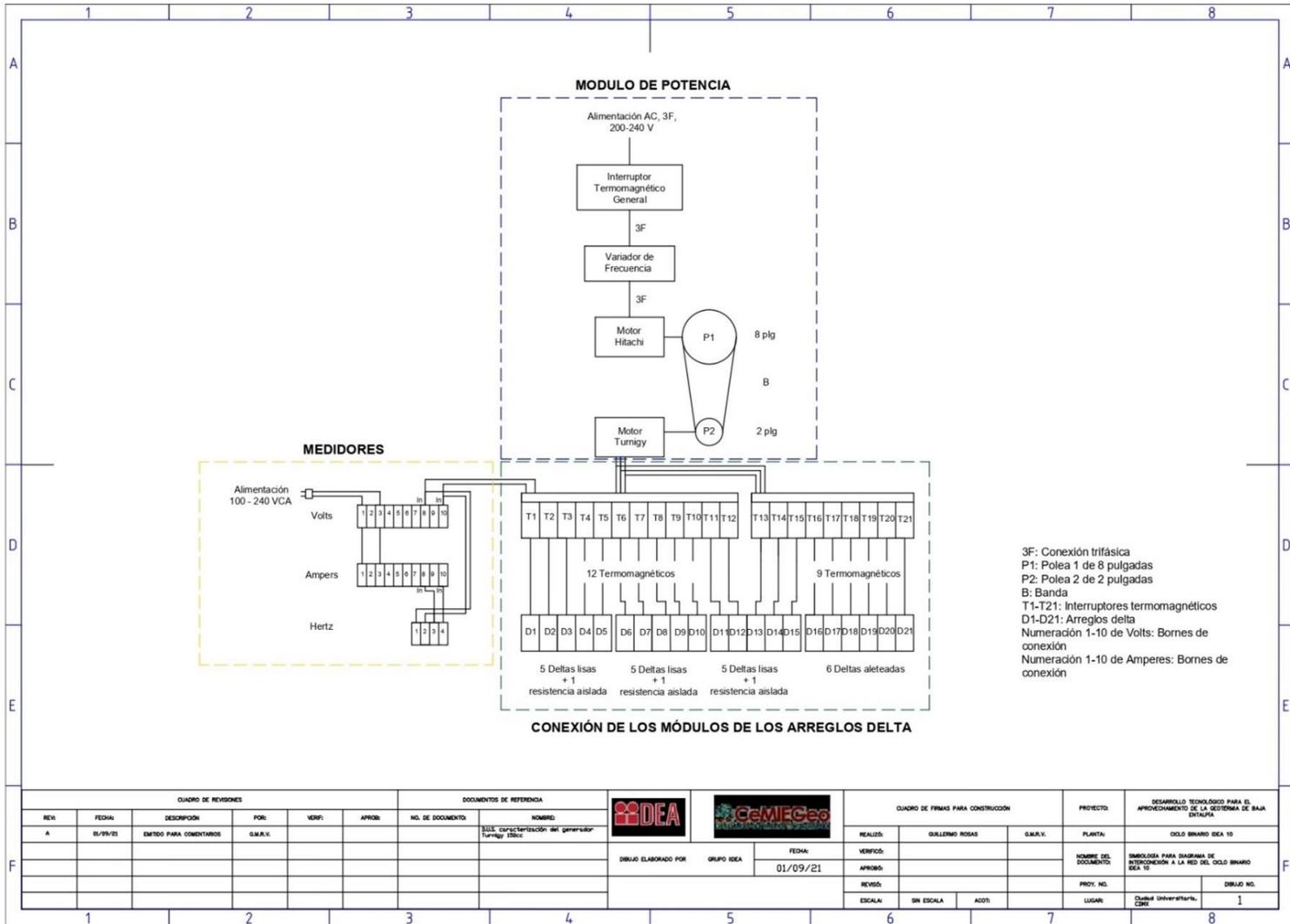
Nota. El anexo 7 fue adaptado de *SPF 4000-12000T DVM/-MPV*, por Growatt, 2021.

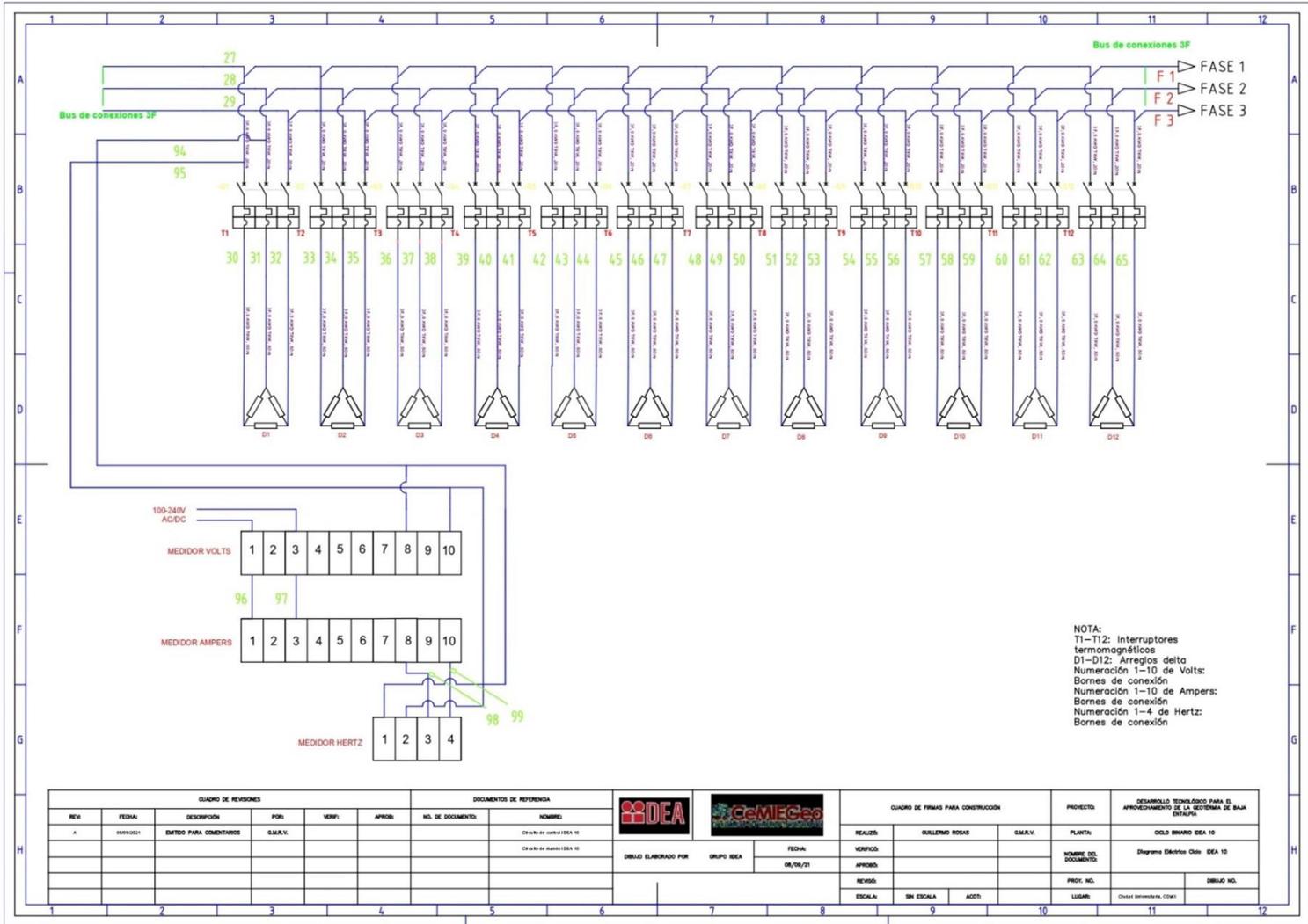
Nota. El anexo 8 fue adaptado de *East Penn Deka Marine Master*, por Americana de baterías, s.f..

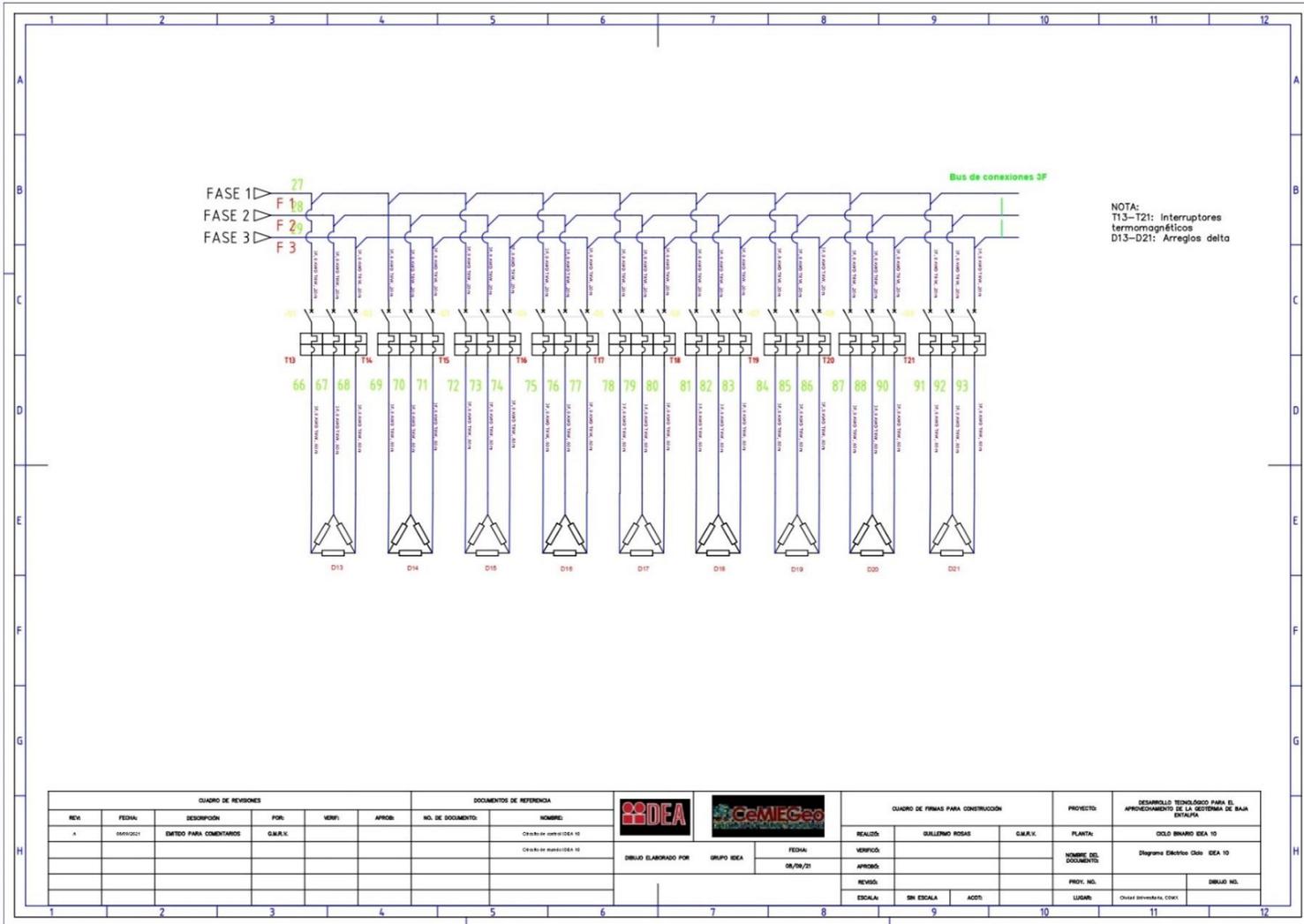
8.1 Anexo 1 (D.U.S. Ciclo binario IDEA 10)



8.2 Anexo 2 (D.U.S. Caracterización del generador)







8.4 Anexo 4 (Parámetros de la prueba 1 para la caracterización)

20 Hz								
Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
300	11	0.3	0.57	2369	46.4	3.25	5.71	2.46
600	11	0.58	0.57	2357	47.8	6.29	11.05	4.76
900	11	0.86	0.57	2219	53.2	9.33	16.38	7.05
1200	11	1.22	0.57	2334	50.9	13.24	23.24	10
1500	11	1.55	0.57	2259	54.9	16.83	29.53	12.7
1800	11	1.88	0.57	2249	54.6	20.41	35.81	15.4
2100	11	2.62	0.57	2257	53.4	28.45	49.91	21.46
2400	10	3.29	0.57	2211	55.3	32.48	56.98	24.5
2700	10	3.44	0.57	2140	47.6	33.96	59.58	25.62
3000	9	4.56	0.57	2021	54.5	40.51	71.08	30.57
3300	8	4.98	0.57	1797	52.6	39.33	69	29.67
40 Hz								
Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
300	23	0.36	0.55	4772	47.6	7.88	14.34	6.46
600	23	0.67	0.55	4748	51	14.67	26.69	12.02
900	23	1.03	0.55	4722	50.6	22.56	41.03	18.47
1200	23	1.42	0.55	4695	52.3	31.11	56.56	25.45
1500	22	1.78	0.55	4665	54.1	37.3	67.82	30.52
1800	22	2.17	0.55	4636	55.5	45.47	82.68	37.21
2100	22	3.05	0.55	4546	53.4	63.92	116.22	52.3
2400	21	3.83	0.55	4454	55.5	76.61	139.3	62.69
2700	21	4.65	0.55	4323	52.1	93.02	169.13	76.11
3000	19	5.45	0.56	4115	52.7	100.43	179.35	78.92
3300	18	6.14	0.56	3680	52.6	107.19	191.42	84.23
60 Hz								
Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa	P. Aparente	P. Reactiva

						(W)	(W)	(W)
300	35	0.35	0.37	7160	50.5	7.85	21.21	13.36
600	35	0.7	0.37	7131	51.3	15.7	42.43	26.73
900	34	1.08	0.37	7037	50.4	23.53	63.6	40.07
1200	34	1.47	0.37	7036	51.4	32.03	86.56	54.53
1500	34	1.84	0.37	7993	51.8	40.09	108.35	68.26
1800	33	2.22	0.37	6938	56.1	46.94	126.89	79.95
2100	33	3.14	0.37	6791	53.2	66.4	179.47	113.07
2400	32	3.96	0.38	7605	55.9	83.4	219.48	136.08
2700	30	4.81	0.4	7315	54.7	99.97	249.93	149.96
3000	28	5.64	0.4	5850	52.7	109.41	273.52	164.11
3300	28	7.3	0.4	3150	53	141.61	354.03	212.42

80 Hz

Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
300	46	0.35	0.35	9545	53.4	9.76	27.88	18.12
600	46	0.71	0.35	9470	54	19.79	56.56	36.77
900	46	1.08	0.35	9410	52.2	30.11	86.04	55.93
1200	45	1.47	0.35	9330	51.7	40.1	114.57	74.47
1500	45	1.84	0.35	9252	56.9	50.19	143.41	93.22
1800	44	2.23	0.35	9171	59.6	59.48	169.94	110.46
2100	43	3.15	0.35	8872	58.2	82.11	234.6	152.49
2400	40	3.99	0.35	8399	57.9	96.75	276.43	179.68
2700	37	4.83	0.36	7627	57	111.43	309.53	198.1
3000	38	5.83	0.37	7231	58	141.97	383.71	241.74
3300	38	8.46	0.4	6725	58	222.72	556.81	334.09

8.5 Anexo 5 (Parámetros de la prueba 2 para la caracterización)

20 Hz								
Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
0	12	0	0.57	2493	25	0	0	0
300	12	0.59	0.57	2493	34	6.98	12.26	5.28
600	12	1.34	0.57	2490	39	15.87	27.85	11.98
900	12	1.7	0.58	2467	38	20.49	35.33	14.84
1200	12	2.4	0.58	2466	39	28.93	49.88	20.95
1500	12	2.8	0.58	2461	44	33.75	58.19	24.44
1800	12	3.4	0.59	2475	45	41.69	70.66	28.97
2100	12	4.8	0.6	2470	43	59.85	99.76	39.91
2400	12	6.2	0.62	2471	44	79.89	128.86	48.97
2700	12	7	0.63	2452	46.4	91.66	145.49	53.83
3000	12	8.3	0.64	2444	44.5	110.4	172.51	62.11
3300	12	9.4	0.65	2437	44.6	126.99	195.37	68.38
3600	12	11	0.66	2432	42	150.89	228.63	77.74
3900	12	11.9	0.67	2425	41	165.71	247.33	81.62
4200	11	13.1	0.68	2419	40	169.72	249.58	79.86
4500	11	14.3	0.69	2415	39	187.99	272.45	84.46
4800	11	15.4	0.7	2401	38	205.38	293.4	88.02
5100	11	16.5	0.71	2394	37.3	223.2	314.36	91.16
5400	11	17.3	0.72	2384	37.6	237.31	329.6	92.29
5700	11	18.7	0.73	2378	37.5	260.08	356.28	96.2
6000	11	19.8	0.74	2372	37.5	279.15	377.24	98.09
6300	11	20.8	0.75	2374	39.6	297.21	369.29	72.08
40 Hz								
Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
0	25	0	0.55	5013	26	0	0	0
300	25	1.24	0.55	4981	35.5	29.53	53.69	24.16

600	25	2.27	0.55	4971	38.7	54.06	98.29	44.23
900	24.5	3.66	0.55	4974	39	85.42	155.31	69.89
1200	24.5	4.5	0.55	4954	39.8	105.02	190.95	85.93
1500	24.5	5.7	0.55	4945	42	133.03	241.88	108.85
1800	24	5	0.55	4935	44	114.31	207.84	93.53
2100	24	9.9	0.59	4911	42	242.8	411.53	168.73
2400	24	12.7	0.59	4878	43	311.47	527.92	216.45
2700	23	14	0.59	4870	44.1	329.05	557.72	228.67
3000	23	16.3	0.65	4848	43.6	422.07	649.34	227.27
3300	23	18.3	0.68	4823	43.5	495.73	729.02	233.29
3600	23	21	0.7	4799	42.6	585.6	836.58	250.98
3900	23	23.5	0.73	4750	41	683.5	936.17	252.67
4200	22	25.6	0.75	4700	40	731.61	975.49	243.88
4500	22	25.6	0.75	4650	39	731.61	975.49	243.88
4800	22	29.7	0.8	4600	38	905.37	1131.72	226.35
5100	22	31.6	0.81	4550	37.4	975.33	1204.12	228.79
5400	22	33.2	0.82	4509	38.3	1037.37	1265.08	227.71
5700	21	34.9	0.83	4473	38.2	1053.61	1269.42	215.81
6000	21	36.5	0.84	4373	38.2	1115.19	1327.61	212.42
6300	21	37.5	0.85	4315	38	1159.39	1363.99	204.6

60 Hz

Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
0	37	0	0.4	7460	28	0	0	0
300	36	1.85	0.42	7446	37.7	48.44	115.35	66.91
600	36	3.4	0.45	7428	39	95.4	212	116.6
900	36	4.9	0.47	7409	41	143.6	305.43	161.83
1200	36	7.2	0.48	7393	42	215.49	448.94	233.45
1500	36	9.2	0.49	7385	43	281.09	573.65	292.56
1800	36	11.2	0.51	7357	44	356.16	698.36	342.2
2100	36	15	0.59	7310	44	551.83	935.3	383.47
2400	35	18.9	0.62	7273	43	710.36	1145.75	435.39

2700	35	20.9	0.64	7227	44.7	810.87	1266.99	456.12
3000	35	24.5	0.7	7176	44.6	1039.66	1485.23	445.57
3300	34	27.2	0.72	7090	43.6	1153.69	1601.8	448.11
3600	33	30.5	0.76	7083	42.7	1324.91	1743.3	418.39
80 Hz								
Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
0	48	0	0.45	9900	31	0	0	0
300	48	2.4	0.46	9882	40	91.78	199.53	107.75
600	48	5	0.47	9876	40	195.37	415.69	220.32
900	48	7.9	0.48	9821	45	315.26	656.79	341.53
1200	47	10.6	0.53	9786	44	457.34	862.9	405.56
1500	47	12.4	0.55	9752	46	555.19	1009.43	454.24
1800	47	14.6	0.57	9718	46	677.46	1188.53	511.07
2100	47	19	0.59	9628	46	912.56	1546.72	634.16
2400	46	22.8	0.61	9497	46	1108.11	1816.57	708.46
2700	45	26.9	0.65	9416	47.3	1362.82	2096.64	733.82

8.6 Anexo 6 (Parámetros de la prueba 3 para la caracterización)

20 Hz								
Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
300	15	1.62	0.55	3209	49.6	23.14	42.08	18.94
600	15	2.34	0.56	3201	54.2	34.04	60.79	26.75
900	15	3.01	0.57	3193	53	44.57	78.2	33.63
1200	15	3.66	0.58	3182	54	55.15	95.08	39.93
1500	15	4.34	0.59	3179	54.6	66.52	112.75	46.23
1800	15	4.98	0.59	3173	56.2	76.33	129.38	53.05
2100	15	5.63	0.6	3167	57	87.76	146.27	58.51
2400	15	7.18	0.61	3148	54.2	113.79	186.54	72.75
2700	15	8.7	0.62	3129	59.6	140.14	262.4	122.26
3000	15	10.1	0.63	3108	57.9	165.31	262.4	97.09
3300	15	11.5	0.64	3098	57	191.21	298.77	107.56
3600	15	13.36	0.65	3068	47	225.61	347.1	121.49
3900	14	14.6	0.66	3051	51.1	233.66	354.03	120.37
4200	14	15.9	0.67	3035	54.5	258.32	385.55	127.23
4500	14	17.35	0.68	3024	57.5	286.08	420.71	134.63
4800	14	18.68	0.69	3020	56.4	312.54	452.96	140.42
5100	14	20.1	0.7	3008	51.3	341.17	487.39	146.22
40 Hz								
Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
300	31	3.25	0.44	6476	49.7	76.78	174.5	97.72
600	31	4.67	0.47	6415	54.3	117.85	250.74	132.89
900	31	6.01	0.48	6376	50	154.89	322.69	167.8
1200	31	7.42	0.52	6430	54	207.17	398.4	191.23
1500	31	8.72	0.53	6385	54.9	248.15	468.2	220.05
1800	31	10.02	0.54	6384	55	290.52	538	247.48
2100	30	11.07	0.55	6224	57.2	316.36	575.21	258.85

2400	29	13.95	0.56	6132	56	392.39	700.7	308.31
2700	29	16.6	0.58	6023	57.1	483.6	833.8	350.2
3000	28	19.2	0.59	5943	58.9	549.37	931.15	381.78
3300	28	21.6	0.61	5850	57	639	1047.54	408.54
3600	27	24	0.73	5576	48.2	819.32	1122.36	303.04
3900	26	26.7	0.75	5476	53.8	901.79	1202.38	300.59
4200	25	27.95	0.75	5340	56.9	907.7	1210.27	302.57
4500	24	29.2	0.79	5098	59.2	958.91	1213.82	254.91
4800	23	30.65	0.8	4983	60.6	976.8	1221	244.2
5100	21	33.4	0.82	5057	49.9	996.18	1214.86	218.68

60 Hz

Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
300	46	4.82	0.48	9716	54.13	184.33	384.03	199.7
600	46	6.87	0.49	9541	56.2	268.2	547.36	279.16
900	46	8.79	0.51	9467	54	357.17	700.33	343.16
1200	45	10.73	0.53	9363	55.4	443.24	836.32	393.08
1500	44	12.4	0.47	9217	57.3	444.15	945	500.85
1800	44	14.07	0.49	9082	58.6	525.41	1072.27	546.86
2100	43	15.81	0.5	9009	58	588.75	1177.5	588.75
2400	42	19.55	0.58	8721	55.7	824.86	1422.18	597.32
2700	40	23	0.61	8407	57.6	972.02	1593.48	621.46
3000	38	26	0.66	8078	59.2	1129.43	1711.26	581.83
3300	36	28.2	0.68	7554	55.7	1195.69	1758.37	562.68
3600	34	31	0.72	7329	52	1314.41	1825.58	511.17
3900	32	32.6	0.73	6875	56	1319.01	1806.87	487.86
4200	30	32.1	0.73	6197	58.3	1217.61	1667.96	450.35
4500	26	31.87	0.73	5573	60.1	1047.7	1435.21	387.51
4800	24	31.6	0.75	5101	61.3	985.19	1313.58	328.39

70 Hz

Carga (W)	V	I	F.P.	RPM	T (C°)	P. Activa (W)	P. Aparente (W)	P. Reactiva (W)
------------------	----------	----------	-------------	------------	---------------	--------------------------	----------------------------	----------------------------

300	53	5.41	0.47	11097	56.3	233.41	496.63	263.22
600	52	7.79	0.5	10859	57.5	350.8	701.61	350.81
900	52	9.82	0.53	10733	55.4	468.76	884.45	415.69
1200	51	11.88	0.55	10606	56.4	577.17	1049.41	472.24
1500	50	13.94	0.56	10475	60.4	676.05	1207.23	531.18
1800	49	15.81	0.56	10326	59	751.4	1341.8	590.4
2100	48	17.71	0.58	10146	60	853.98	1472.38	618.4
2400	46	21.9	0.61	9721	62	1064.36	1744.86	680.5
2700	44	25.1	0.65	9224	59.4	1243.36	1912.87	669.51
3000	39	27.3	0.7	8446	60.7	1290.88	1844.11	553.23
3300	37	28	0.71	7632	61	1274.02	1794.4	520.38

8.7 Anexo 7 (Ficha técnica del inversor de corriente)

Hoja de Datos	SPF 4000T DVM	SPF 5000T DVM	SPF 6000T DVM	SPF 8000T DVM	SPF 10000T DVM	SPF 12000T DVM
Voltaje de Batería	48VDC					
Tipo de Batería	Litio/Plomo-ácido					
Salida del Inversor						
Potencia nominal	4KW	5KW	6KW	8KW	10KW	12KW
Sobretensión	12KW	15KW	18KW	24KW	30KW	36KW
Tipo de onda	Onda sinusoidal pura / igual que la entrada (modo bypass)					
Voltaje de CA(Modo batería)	104-110-115-120 / 208-220-230-240VAC (opcional)					
Frecuencia de red CA (Rango)	50Hz/60Hz(49.7~50.3Hz/59.7~60.3Hz)					
Eficiencia max.	>85%					
Tiempo de transferencia	10 ms(Para Computadoras); 20 ms (Para Electrodomésticos)					
Cargador Solar						
Corriente máxima de carga	80A			120A		
Máxima potencia FV	5000W			7000W		
Rango de voltaje del MPPT	60~145VDC					
Max. Voltaje de circuito abierto FV	150VDC					
Máxima eficiencia	>98%					
Cargador CA						
Voltaje de entrada CA	240 /AC					
Rangos de voltaje	184~272VAC (Para computadoras); 54~272VAC (Para electrodomésticos)					
Rango de frecuencia	50Hz / 60Hz (detección automática)					
Max. Corriente de carga	40A	50A	60A	70A	80A	100A
Datos Generales						
Grado de protección	IP20					
Dimensiones	360/540/218mm	360/540/218mm	360/540/218mm	380/650/225mm	380/650/225mm	380/650/225mm
Peso	42kg	47kg	52kg	64kg	66kg	75kg
Entorno Operativo						
Temperatura de Operación	0°C to 45°C					

8.8 Anexo 8 (Ficha técnica de baterías East Penn Deka Marine Master)

MARINE GOLF INDUSTRIAL AUTO SPECIAL APPLICATIONS SOLAR EAST PENN DEKA MARINE MASTER
DC31DT
ADVANCED LIFE, POWER AND DURABILITY (A3)

- **EXTREMELY LOW MAINTENANCE – CALCIUM/CALCIUM**

- BCI Group 31M, 12V
- CCA 650 / CA 810
- Reserve Capacity[min] 185 @ 25 A
- Reserve Capacity [Ah@20hr rate]: 105
- Weight: 59.5 lbs.
- Length- 13 in (330 mm)
- Width- 6 ¾ in (171 mm)
- Height- 9 ½ in (241 mm)
- Marine Terminal on top with Positive on LEFT
 - Increased grid frame tensile strength, resists plate growth to safeguard against life-threatening shorts.
 - Thicker back web and puncture resistant separators prevent plate-to-plate electrical shorts
 - Ultra-Pure Electrolyte with no impurities inhibits unnecessary water loss.
 - Full-frame plate vs. expanded metal grid prevent exposed wire electrical shorts
 - Advanced battery formation controls prevent high temperature damage and under-formed plates.
 - **EAST PENN POWER-PERFORM PLATES , WHEN COMPARED TO LEADING COMPETITORS HAVE 13% LESS POSITIVE PLATE FAILURES.**
 - **LAST 24% LONGER IN HIGH HEAT AND SEVERE SERVICE APPLICATIONS**
 - **HAVE 25% LESS PREMATURE FAILURES THAN THE LEADING COMPETITORS**

QUALITY SYSTEM
CERTIFIED TO
ISO 9001
ISO/TS 16949

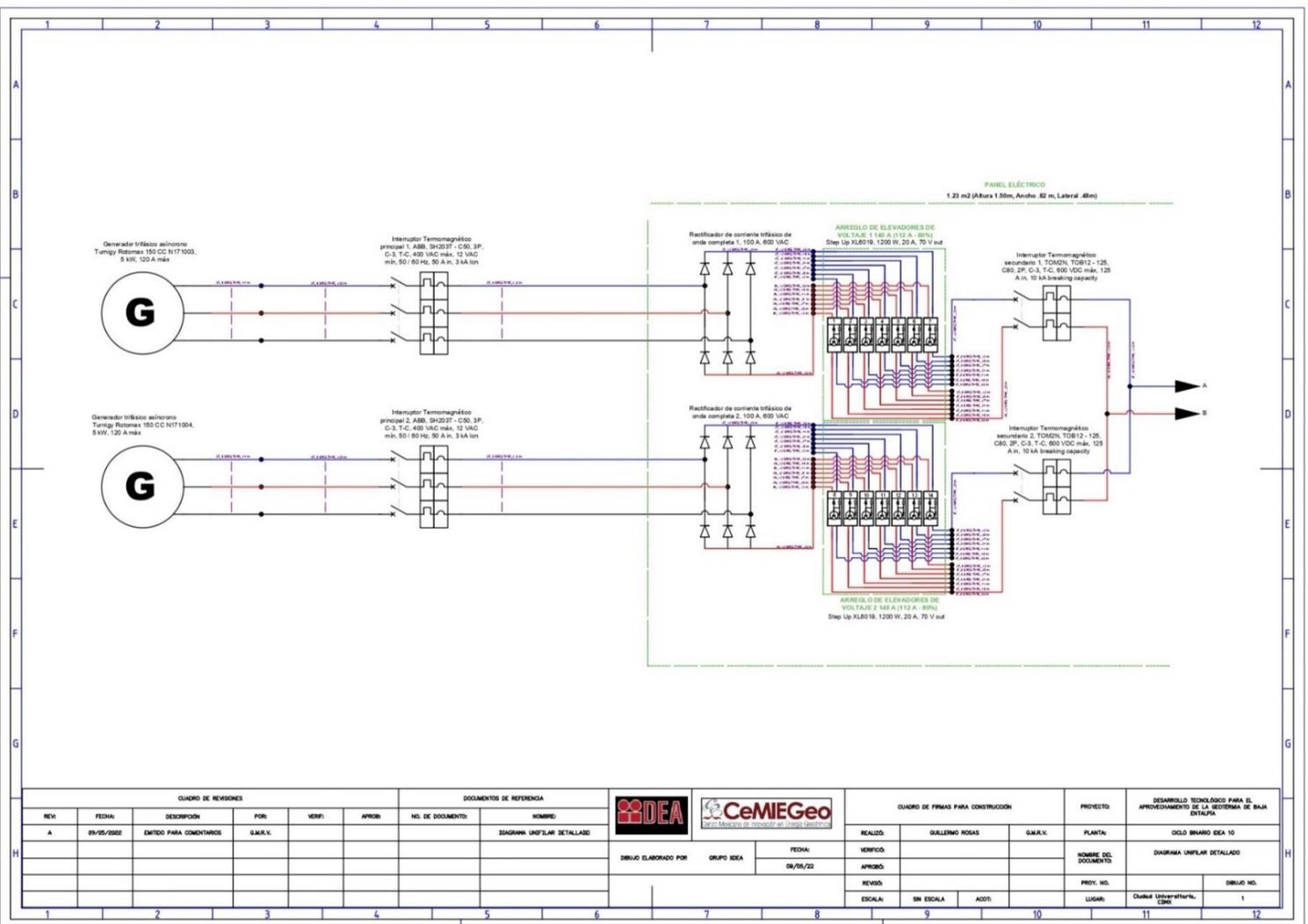
QUALITY SYSTEM
CERTIFIED
ISO 9001
QS 9000
TRUCK & BUS
DIVISION
ISO 14001

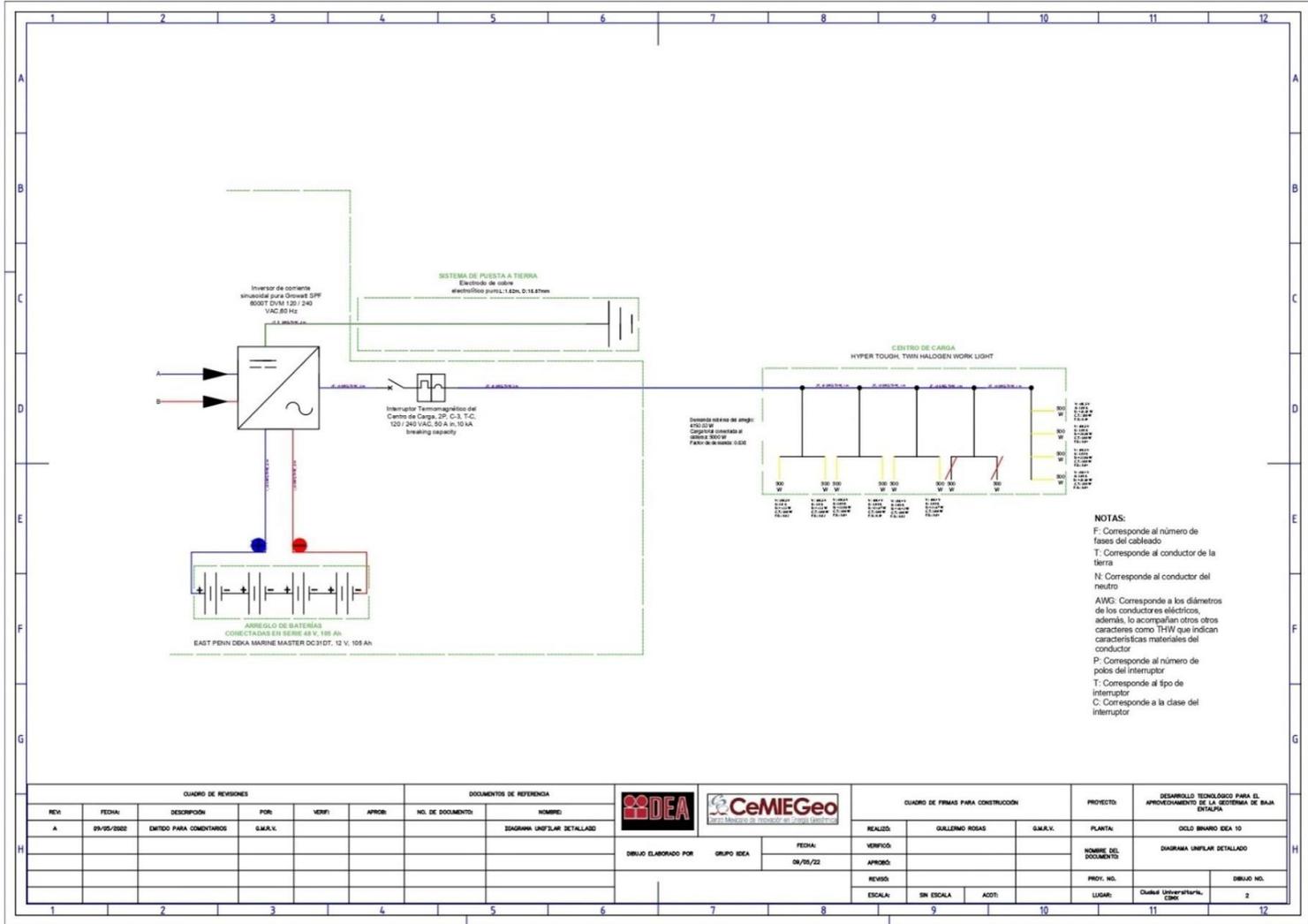
QUALITY SYSTEM
CERTIFIED TO
ISO 9001
QS 9000



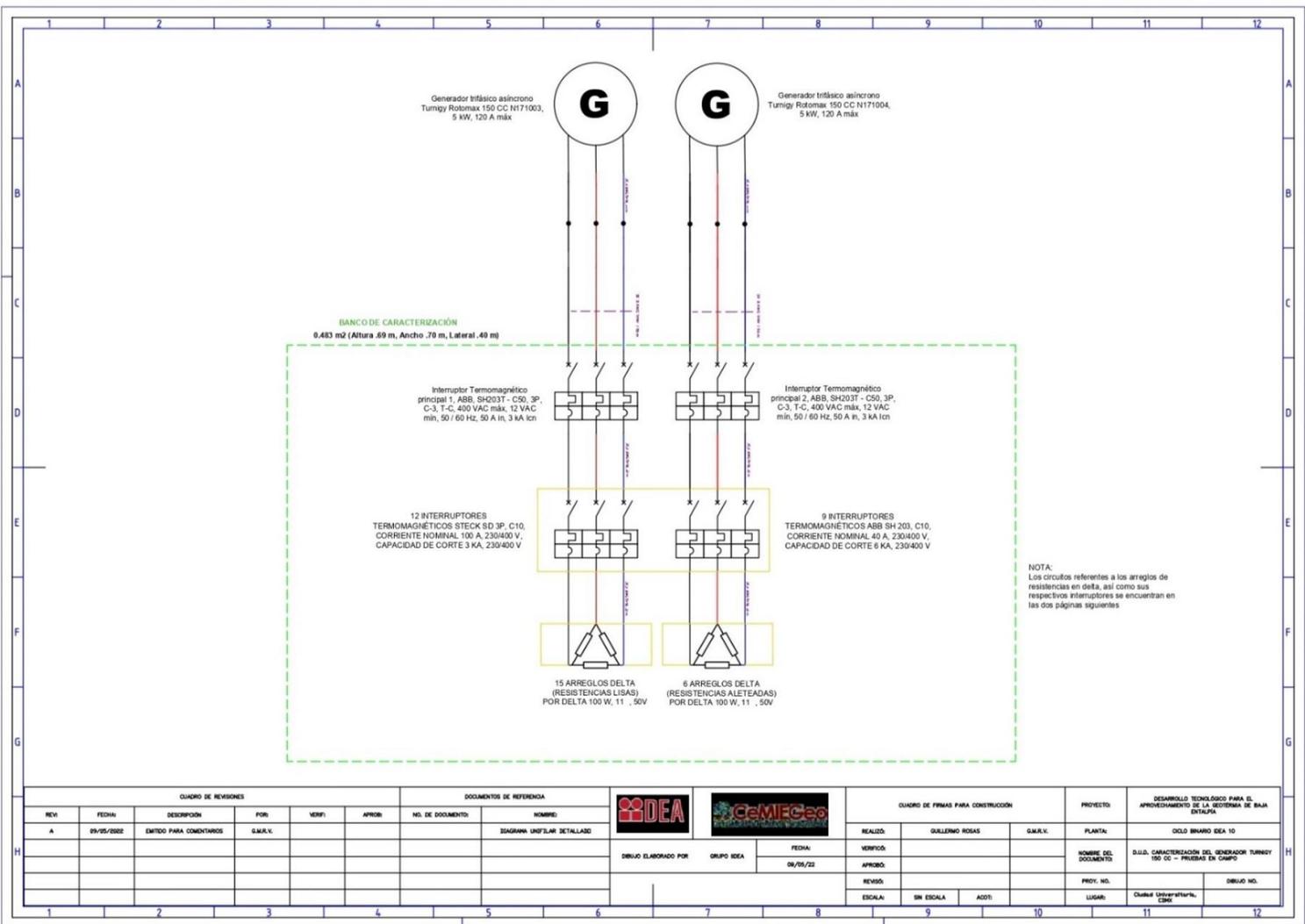
East Penn's Advanced-Cubed (A3) Technology utilizes internal components made with the finest life extending and power producing materials. These materials, such as the purest electrolyte and specially formulated oxide, are the same used in batteries for critical stationary applications with an extended design life. High-end components are precision crafted into the battery to achieve maximum durability. This process utilizes the most modern equipment to ensure that this is done in the most efficient way.

8.9 Anexo 9 (D.U.D. Ciclo binario IDEA 10)





8.10 Anexo 10 (D.U.D. Caracterización de generadores en campo)



8.11 Anexo 11 (Prueba de cargas escalonadas al generador N171003)

Carga (W)	Tensión F1-F2 (V)	Tensión F1-F3 (V)	Tensión F2-F3 (V)	Corriente F1 (A)	Corriente F2 (A)	Corriente F3 (A)	P. bomba (Bar)	P. entrada turbinas (Bar)	Tensión promedio (V)	Corriente promedio (A)	Potencia activa (W)
0	18.9	18.84	19.5	0	0	0	5	2.1	19.09	0	0
300	14.8	14.6	15.2	0.57	0.59	0.57	5	2.1	14.87	0.57	14.68
600	12.4	12.23	12.5	0.99	1.04	1.02	5	2.1	12.37	1.01	21.63
900	10.8	10.66	11.03	1.34	1.38	1.37	4.8	2	10.83	1.36	25.51
1200	9.64	9.5	9.7	1.64	1.68	1.67	4.5	2	9.61	1.66	27.63
1500	9.15	8.89	9.15	2.05	2.18	2.2	5	2.1	9.06	2.14	33.58
1800	9.46	9.34	9.54	2.44	2.53	2.51	5	2.4	9.44	2.49	40.71
2100	7.95	7.94	8.06	2.91	2.93	2.99	5	2.2	7.98	2.94	40.63
2400	6.47	6.44	6.59	3.03	3.16	3.18	5	2.3	6.5	3.12	35.12
2700	5.94	5.75	6.12	3.38	3.51	3.55	5	2.3	5.93	3.48	35.74
3000	5.4	5.4	5.58	3.54	3.72	3.76	5	2.4	5.46	3.67	34.7
3300	4.75	4.64	4.82	3.76	3.85	3.79	5	2.4	4.73	3.8	31.13
3600	4.36	4.23	4.42	3.82	3.87	3.89	5	2.4	4.33	3.86	28.94

8.12 Anexo 12 (Prueba de cargas escalonadas al generador N171004)

Carga (W)	Tensión F1-F2 (V)	Tensión F1-F3 (V)	Tensión F2-F3 (V)	Corriente F1 (A)	Corriente F2 (A)	Corriente F3 (A)	P. bomba (Bar)	P. entrada turbinas (Bar)	Tensión promedio (V)	Corriente promedio (A)	Potencia Activa (W)
0	19.94	20.2	20.1	0	0	0	5	2.1	20.08	0	0
300	15.19	12.3	15.19	1.57	1.47	1.36	5	2.1	14.22	1.46	35.95
600	13.23	10.18	12.27	2.55	2.22	2.25	5	2.1	11.89	2.34	48.19
900	10.2	9.01	10.28	3.1	2.93	2.89	4.8	2	9.83	2.97	50.56
1200	8.81	8.82	8.95	3.56	3.55	3.31	4.5	2	8.86	3.47	53.25
1500	8.75	8.82	8.89	4.56	4.05	4.32	5	2.1	8.82	4.31	65.84
1800	8.25	8.4	8.36	5.05	4.33	4.89	5	2.4	8.33	4.75	68.53
2100	7.53	7.4	7.4	5.29	5.9	4.98	5	2.2	7.44	5.39	69.45
2400	6.42	6.53	6.57	5.5	5.3	5.22	5	2.3	6.5	5.34	60.11

2700	6.24	6.24	6.3	5.98	5.8	5.55	5	2.3	6.26	5.77	62.56
------	------	------	-----	------	-----	------	---	-----	------	------	-------

8.13 Anexo 13 (Prueba a diferentes rangos de presión al generador N171003)

Carga (W)	Tensión F1-F2 (V)	Tensión F1-F3 (V)	Tensión F2-F3 (V)	Corriente F1 (A)	Corriente F2 (A)	Corriente F3 (A)	P. bomba (Bar)	P. entrada turbinas (Bar)	Tensión promedio (V)	Corriente promedio (A)	Potencia Activa (W)
3600	5.17	5.03	5.26	4.45	4.65	4.62	6	2.6	5.15	4.57	40.76
3600	6.43	6.3	6.5	5.55	5.72	5.67	7	3	6.41	5.64	62.61
3600	7.99	7.89	8.25	7.12	7.35	7.39	8	3.4	8.04	7.28	101.37
3600	9.65	9.57	9.98	8.59	8.73	8.76	9	4.1	9.73	8.69	146.45
3600	10.6	10.48	10.76	9.08	9.39	9.39	10	4.6	10.61	9.28	170.53
3600	11.67	11.48	11.74	10.1	10.53	10.53	11	5	11.63	10.38	209.09
3600	12.27	12.06	12.57	10.64	10.91	10.91	12	5.4	12.3	10.82	230.51

8.14 Anexo 14 (Prueba a diferentes rangos de presión al generador N171004)

Carga (W)	Tensión F1-F2 (V)	Tensión F1-F3 (V)	Tensión F2-F3 (V)	Corriente F1 (A)	Corriente F2 (A)	Corriente F3 (A)	P. bomba (Bar)	P. entrada turbinas (Bar)	Tensión promedio (V)	Corriente promedio (A)	Potencia Activa (W)
2700	7.48	7.52	7.65	7.1	6.45	6.8	6	2.6	7.55	6.78	88.66
2700	8.58	8.66	8.89	8.63	7.58	7.89	7	3	8.71	8.03	121.14
2700	10.75	10.79	10.82	10.67	8.54	9.67	8	3.4	10.78	9.62	179.61
2700	12.14	12.17	12.35	12.28	11.28	11.22	9	4.1	12.22	11.59	245.31
2700	12.65	13	12.95	12.9	11.24	11.33	10	4.6	12.86	11.82	263.28
2700	13.76	13.85	13.81	13.26	13.62	12.15	11	5	13.8	13.01	310.96
2700	14.27	14.44	14.33	14.76	10.48	12.74	12	5.4	14.34	12.66	314.44

9 Referencias

- Alternative Energy Tutorials. (s.f.). *Induction Generator*. Recuperado el 16 de febrero de 2022, de <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/induction-generator.html>
- Alternative Energy Tutorials. (s.f.). *Synchronous Generator*. Recuperado el 14 de febrero de 2022, de <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/synchronous-generator.html>
- Americana de baterías. (s.f.). *East Penn Deka Marine Master*. Recuperado el 2022, de <https://www.nationwide-battery.com/pdf/DC31DT.pdf>
- Amperis. (s.f.). *Analizador de calidad de onda Nexus 1500*. Obtenido de <https://amperis.com/productos/analizadores-redes/serie-nexus/nexus-1500/>
- Andueza, A., & Senosiáin, V. (septiembre de 2012). *INVERSOR MONOFÁSICO*. (Tesis de Licenciatura). Obtenido de Repositorio institucional de la Universidad Pública de Navarra, España.: <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/6154/577886.pdf>
- Auto Solar. (septiembre de 2021). *¿Cómo son los inversores de onda senoidal?* Recuperado el 13 de enero de 2022, de <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/como-son-los-inversores-de-onda-senoidal>
- Aviña, H. (2018). *Usos directos en geotermia, un tesoro energético por aprovechar*. Obtenido de PROYECTO FSE: <http://www.proyctofse.mx/2018/12/18/usos-directos-en-geotermia-un-tesoro-energetico-por-aprovechar/>
- Beltran, H. (octubre de 2016). *Integrando Energías Renovables en Sistemas de Potencia en Centroamérica*. Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2016/Oct/18/02_Hector-Beltran-CRE-Mexico.pdf?la=en&hash=C1B85C66ED14F7FDF3EB7B92218062A768255A28
- Carmona, & Díaz. (2010). *Electrónica aplicada* (1er ed.). McGraw-Hill Interamericana de España S.L. ISBN-10: 8448171624.

- Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica [CEMIEGEO]. (s.f.). *¿Qué es la geotermia?* Recuperado el 20 de septiembre de 2021, de <http://www.cemiegeo.org/index.php/que-es-la-geotermia>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (abril de 2020). *En el Cinturón de Fuego del Pacífico la actividad sigue siendo normal*. Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/en-el-cinturon-de-fuego-del-pacifico-la-actividad-sigue-siendo-normal>
- Comercial Mendez. (s.f.). *Las diferencias entre generadores asíncronos y generadores síncronos*. Recuperado el 20 de febrero de 2022, de <https://comercialmendez.es/es/blog/noticias/-las-diferencias-entre-generadores-asincronos-y-generadores-sincronos>
- Comisión Reguladora de Energía [CRE]. (2021). *Resolución Núm. RES/550/2021*. Obtenido de https://dof.gob.mx/2021/CRE/CRE_311221.pdf
- Comisión Reguladora de Energía. (2010). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de RESOLUCION Núm. RES/054/2010: http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5137984
- Comisión Reguladora de Energía. (2017). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de RESOLUCIÓN Núm. RES/142/2017: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5474790&fecha=07/03/2017
- Construyendo.co. (s.f.). *Cables eléctricos y sus características*. Recuperado el 10 de septiembre de 2021, de <https://construyendo.co/electricidad/cable-electrico.php>
- Control para la industria. (s.f.). *Protecciones Termomagnéticas*. Recuperado el 1 de septiembre de 2021, de <https://www.cpi.com.ar/notas/conceptos-claves-para-la-eleccion-de-protecciones-termomagneticas/>
- Cueva, E., Lucero, J., Guzmán, A., Rocha, J., & Espinoza, L. (marzo de 2018). Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices. *Enfoque UTE*, 9(1), 166-176. p- ISSN: 1390-9363.

- DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. (mayo de 2003). *Wind power*. Recuperado el 20 de febrero de 2022, de <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/async.htm>
- Diario Oficial de la Federación. (2017). *Programa Especial de la Transición Energética 2017-2018*. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5484916&fecha=31/05/2017&print=true
- Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Unesco Publishing. ISBN: 978-92-3-103915-7.
- Encarnación, J. (2021). IDEA 10 Semi Abierto – Carcasa comercial. Ciudad de México.
- Encarnación, J. (2021). Planos de diseño de nuevas líneas de tubería de módulo de ciclo binario IDEA 10. Ciudad de México.
- Figuroa, R. (2019). *El código de red*. Obtenido de Eléctrica: <https://electrica.mx/el-codigo-de-red/>
- Gallego, J., Cano, J., & Muñoz, N. (2015). Deducción de Pérdidas de Potencia por Conducción en Inversores Modulación Senoidal de Ancho de Pulso, SPWM. *Información Tecnológica*, 26(3), 111-122. doi:10.4067/S0718-07642015000300015
- Google Earth. (2022). Imagen de Ubicación de Central Geotérmica Domo San Pedro.
- Growatt. (s.f.). *SPF 4000-12000T DVM/-MPV*. Recuperado el 2021, de <https://latam.growatt.com/products/spf-4000-12000t-dvm-mpv>
- Guevara, C. (2009). Efecto de la temperatura en la eficiencia de motores industriales. *Revista Electro Industria*. Obtenido de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1247&ni=efecto-de-la-temperatura-en-la-eficiencia-de-motores-industriales>
- Gutiérrez, L., Canchola, I., Romo-Jones, J., & Quijano, J. (2020). *Geothermal energy in Mexico: update and perspectives*. Obtenido de Proceedings World Geothermal Congress 2020: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01004.pdf>

- Higuchi, Y., Yamamura, N., Ishida, M., & Hori, T. (2000). An improvement of performance for small-scaled wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator. *IEEE Industrial Electronics Society*, 2, 1037-1043. doi:10.1109/IECON.2000.972265
- Hiriart, G. (2011). *Tecnologías de punta y costos asociados para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México*. Obtenido de <https://www.cre.gob.mx/documento/2961.pdf>
- Hobby King. (diciembre de 2014). *Characterisation of the Turnigy 150cc equivalent*. Obtenido de https://hobbyking.com/es_es/turnigy-rotomax-150cc-size-brushless-outrunner-motor.html?__store=es_es
- Huttrer, G. (2020). *Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Obtenido de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01017.pdf>
- Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México . (mayo de 2017). *PROYECTO FSE*. Recuperado el enero de 2022, de <http://www.proyectofse.mx/2017/05/29/desarrollan-mapa-zonas-geotermicas-mexico/>
- Instituto de Ingeniería. (s.f.). *Ciclo Binario de Evaporación Instantánea*. Obtenido de http://proyectos2.iingen.unam.mx/IIDEA/ciclo_binario.html
- Instituto Geológico y Minero de España. (2019). *Potencial de energía geotérmica en las ciudades españolas*. Obtenido de <https://www.appa.es/wp-content/uploads/2019/03/GENERA-2019-GEOTERMIA-01-Celestino-Garcia-de-la-Noceda-IGME.pdf>
- Instituto para la Diversificación; Ahorro de la Energía e Instituto Geológico y Minero de España. (2008). *Manual de Geotermia*. ISBN:978-84-96680-35-7. Obtenido de http://geoatlantic.eu/portfolio/wp-content/uploads/2020/06/10952_manual_geotermia_a2008.pdf

- International Geothermal Association. (2014). *Geothermal Power Database*. Recuperado el 22 de noviembre de 2021, de <https://www.geothermal-energy.org/explore/our-databases/geothermal-power-database/#direct-uses-by-country>
- JAES Company. (enero de 2021). *¿Qué es y cómo funciona el MOTOR BRUSHLESS - Momento de Torsión - Efecto Hall*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=3lVW9HoLZv0>
- Jeong, H.-G., So, J.-Y., Chung, D.-H., Ahn, K.-S., Cho, C.-H., & Kim, D.-K. (2013). Development of 10kW Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Hydropower. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 44-52. ISSN: 1229-4691.
- Kim, A.-R., Kim, K.-M., Park, H., Kim, G.-H., Park, T.-J., Park, M., . . . Lee, H. (junio de 2015). Performance Analysis of a 10-kW Superconducting Synchronous Generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3), 1-4. doi:10.1109/TASC.2014.2381000
- Llopis, G., & Rodrigo, V. (2008). *Guía de la Energía geotérmica*. Gráficas Arias Montano, S.A. Obtenido de <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2008/01/Guia-de-la-Energia-Geotermica-fenercom-2008.pdf>
- Máquinas Eléctricas Blog. (noviembre de 2016). *Máquinas Eléctricas*. Recuperado el 17 de febrero de 2022. Obtenido de <https://maquinaselectricasblog.wordpress.com>
- Martín, J. (2017). *Electrónica*. Editex, S.A. ISBN: 9788491610038.
- Neheyler Mechatronics. (marzo de 2021). *¿Qué es un transistor MOSFET? | Cómo funciona un MOSFET | Transistores de potencia*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=V34yPZFz85Q>
- Núñez, O., Díaz, D., & Velásquez, P. (marzo de 2008). *Geotermia*. Obtenido de <https://docplayer.es/26634873-Geotermia-patricio-nunez-daniel-diaz-saez-pedro-velasquez-espinoza-17-03-2008.html>
- On Site Services . (2020). *v34 Estudio de corto circuito a centro de carga usando software ETAP*. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=DBCgnFYh1PM>

- On Site Services. (2021). *v77 Como saber SI aplica el código de red a mi centro de carga?* Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=4qWF73puyoY>
- On Site Services. (2022). *Código de Red OSS (Versión 4.0)*. Obtenido de https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai_onsiteservicesmx.OSSCodigoDeRed
- Patiño, R. (2019). *Análisis de la implementación de un código de red para sistemas de control (AVR, GOV y PSS) de unidades de generación convencional del sistema nacional interconectado*. Obtenido de Biblioteca digital de Escuela Politécnica Nacional: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20241/1/CD%209703.pdf>
- Pontificia Universidad Católica de Chile. (junio de 2012). *Costos Geotermia*. Recuperado el 22 de septiembre de 2021, de https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/C._Geo.html
- Prol, R. (2002). *El calor de la tierra* (3ra. ed.). Fondo de Cultura Económica. ISBN: 978-968-16-6659-0.
- Roch, E. (enero de 2021). *Principios y Funcionamientos del Mosfet*. Recuperado el 5 de enero de 2022, de Transistores: <https://transistores.info/principios-y-funcionamientos-del-mosfet/>
- Rodríguez, I. (diciembre de 2020). *CFE y embajada de Francia firman convenio sobre energía geotérmica*. Recuperado el enero de 2022, de La Jornada: <https://www.jornada.com.mx/notas/2020/12/09/economia/cfe-y-embajada-de-francia-firman-convenio-sobre-energia-geotermica/>
- Salazar, M., Mora, A., & Bonilla, A. (2017). Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos. *Dyna*, *84*(203), 273–282. ISSN 0012-7353 .
- Santoyo, É., & Barragán, R. (2010). Energía geotérmica. *Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias*, *61* (2), 40 – 51. ISSN 1405-6550.
- Santoyo, E., & Torres, I. (octubre de 2010). Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable. *Revista Digital Universitaria*, *11*(10), 3-26. ISSN: 1067-6079.

- Secretaría de Energía. (2012). *NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización)*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/512096/NOM-001-SEDE-2012.pdf>
- Secretaría de Energía. (2018). *Manual para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5512744&fecha=09/02/2018
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s.f.). *Gobierno de México*. Obtenido de Consumo de energía por hogar, 2016: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_ENERGIA06_20&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREA NIO=*
- Servicio Geológico Mexicano. (marzo de 2017). *Geotermia*. Recuperado el 15 de septiembre de 2021, de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Geotermia.html
- Shiavon, M. (1997). *Transistores de efecto de campo*. Obtenido de Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario: <https://www.fceia.unr.edu.ar/eca1/files/teorias/TransistoresdeEfectoDeCampo.pdf>
- ShinePhone. (2022). *Monitoreo Growatt (Versión 6)*. Obtenido de <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.growatt.shinephones>
- SIEB & MEYER. (2013). *Feed-in System SD2R for Hight Speed Generators*. Obtenido de https://pro-4-pro.com/media/product/28167/attachment_en-1398251460.pdf
- UNIT ELECTRONICS. (s.f.). *Elevador de Voltaje Step Up 1200W 20A*. Recuperado el 2021, de <https://uelectronics.com/producto/elevador-de-voltaje-step-up-1200w-20a/>
- Uribe, E. (2021). *Implementación técnica del código de red*. Curso Neopetrol.
- Van Zandweghe Hnos. (s.f.). *Manual de baterías de arranque*. Obtenido de https://baterias.com.ar/pdf/arranque/VZH_manual_Baterias_Automotrices.pdf

- Vega, A. (enero de 2019). Comparativa entre Motores Brushed y Brushless. Obtenido de <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/89945/3/antoniopascualvTFM0119memoria.pdf>
- Verde, A., Lastres, O., Hernández, G., Ibañez, G., Vereá, L., & Sebastian, P. (agosto de 2018). A new method for characterization of small capacity wind turbines with permanent magnet synchronous generator: An experimental study. *Heliyon*, 4. doi:10.1016/j.heliyon.2018.e00732