



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA
POR FUENTES GEOTÉRMICAS EN LA ZONA NORTE DEL PAÍS
– CHACHIMBIRO”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
POTENCIA**

SANTIAGO GEOVANNY VILLACRESES BAQUE
VÍCTOR ANDRÉS BRAVO CADENA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTOS

Primero queremos agradecerle a Dios por habernos permitido llegar hasta este punto de nuestra vida y por brindarnos la salud y la sabiduría necesaria para poder lograr nuestros objetivos, éste sólo es uno de tantos.

A nuestros padres por ser el pilar fundamental en todos nuestros logros y por su incondicional apoyo mantenido a través del tiempo.

Son muchas las personas que han formado parte de nuestra vida universitaria a las que nos gustaría agradecerle por su compañía consejos y apoyo, a nuestros amigos quienes siempre nos ayudaron en muchas instancias a lo largo de este camino y a nuestros maestros que nos compartieron gustosos sus conocimientos.


DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedicamos a nuestros padres por ser el pilar fundamental en todo lo que somos, en toda nuestra educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A todas las personas en general que creyeron en nosotros y nos brindaron su apoyo y aliento cuando más lo necesitábamos.

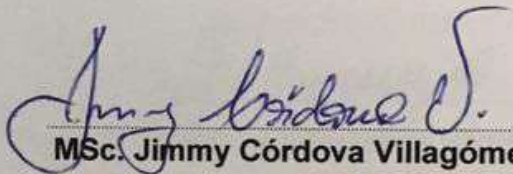
Finalmente, a los maestros, aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y que nos ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración del presente trabajo.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



MSc. Iván Endara Vélez

PROFESOR EVALUADOR



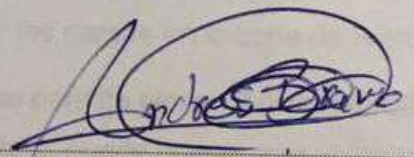
MSc. Jimmy Córdova Villagómez

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"


Santiago Geovanny Villacreses Baque


Victor Andrés Bravo Cadena

RESUMEN

Ecuador posee una extensa variedad de recursos naturales que pueden ser aprovechados de manera limpia y sostenible. Estudios prueban que la zona norte cuenta con un gran potencial geotérmico. Lugares como Chacana-Jamaico, Chacana-Cachiyacu, Chachimbiro, Tufiño-Chiles y Chalpatán ubicados cerca de la provincia de Imbabura son prospectos geotérmicos a los que se ha prestado mayor interés.

El presente proyecto abarca el diseño de una planta generadora de electricidad por medio de un recurso geotérmico ubicada en la zona de Chachimbiro, puesto que este lugar cuenta con uno de los más grandes acuíferos subterráneos en el país.

Basado en los estudios de prefactibilidad se evaluaron las alternativas de generación eléctrica, obteniendo como resultado que el sistema Single Flash es óptimo para las condiciones de temperatura y presión del reservorio que se encuentra localizado a 1800 metros por debajo del suelo y cuyo potencial geotérmico aprovechable estimado es de entre 13 MW a 178 MW. Con ello se establece dos etapas de generación, una etapa inicial de producción de potencia de 30 MW que permitirá conocer la rentabilidad del recurso y una futura ampliación a 50 MW que provea mayor potencia al sistema de transmisión, con la finalidad de aliviar las cargas en la zona de Ibarra.

Se realiza el diseño de una subestación eléctrica que permita elevar el nivel de voltaje de generación de 13,8 KV a 138 KV para que la planta pueda conectarse al Sistema Nacional Interconectado. Este diseño incluye la selección de equipos como seccionadores, interruptores, equipos de instrumentación para la medición y protección, sistema de control de generación, sistema de protección mediante relés numéricos y su respectiva coordinación. Se incluye la ruta donde se asentará la línea de transmisión y la estructura de la torre para la línea, que permitan la interconexión con la subestación Ibarra, que es la más cercana a la planta geotérmica.

Finalmente, se evalúa la afectación del Sistema Nacional de Transmisión con la entrada de esta planta generadora, constatando las mejoras en el nivel de voltaje en las barras cercanas a la que se conecta.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xv
CAPÍTULO 1	1
1.INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA POR FUENTES GEOTÉRMICAS EN LA ZONA NORTE DEL PAÍS.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. General.....	2
1.2.2. Específicos	2
1.3. Justificación.....	2
1.4. Alcance.....	3
1.5. Marco teórico.....	4
1.5.1. Geotermia.....	4
1.5.2. Factor de planta.	4
1.5.3. Modelos de generación geotérmica.	5

1.5.4. Sistema Nacional de Transmisión (SNT).....	8
1.5.5. Antecedentes de la geotermia en Ecuador.....	8
1.5.6. Prospecto geotérmico Chachimbiro.	9
CAPÍTULO 2.....	11
2.ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE GENERACIÓN ELÉCTRICA POR GEOTERMIA.....	11
2.1. Análisis geotérmico en Chachimbiro.	11
2.2. Análisis del sistema de evaporación súbita o Flash.	13
2.2.1. Equipamiento del sistema Single Flash.....	13
2.3. Sistema de generación.....	16
2.3.1. Turbina-Generador.....	17
2.4. Sistema de control de generación.	17
2.5. Descripción de la subestación eléctrica Chachimbiro.....	20
2.5.1. Elementos de la subestación eléctrica Chachimbiro.	20
2.6. Diseño de línea de transmisión	26
2.6.1. Ruta de línea de transmisión.....	26
2.6.2. Dimensionamiento de torres.....	32
CAPÍTULO 3.....	34
3.RESULTADOS, SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS Y EQUIPOS.....	34
3.1. Análisis y selección de tubería de vapor.	34
3.2. Selección del sistema de inyección de salmuera.	36
3.3. Selección de Turbina-Generador SST-400 GEO (10MW).....	37
3.4. Diseño de la línea de transmisión.....	38

3.4.1. Selección del conductor.	39
3.5. Simulación del sistema de potencia y afectación en el Sistema Nacional Interconectado (SNI).....	40
3.6. Coordinación de protecciones y selección de Relés de protección.	44
3.6.1. Protección de generador.	45
3.6.2. Protección de transformadores.	46
3.6.3. Protección de barras en la subestación	49
3.6.4. Protección de líneas de transmisión.....	52
3.7. Detalles de subestación eléctrica y sus esquemas	57
3.7.1. Malla puesta a tierra.....	57
3.7.2. Esquema de diagrama unifilar de la subestación eléctrica Chachimbiro	58
3.7.3. Esquema detallado de la subestación eléctrica Chachimbiro	58
3.7.4. Esquema del sistema de protección.....	59
3.7.5. Esquema de comunicación de la subestación.....	59
3.8. Análisis económico de la planta geotérmica Chachimbiro.....	60
3.8.1. Costo de inversión.....	60
3.8.2. Costo de operación y mantenimiento.	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXO A.....	68
ANEXO B.....	69

ANEXO C.....	70
ANEXO D.....	71
ANEXO E.....	75
ANEXO F.....	78
ANEXO G.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de una central de ciclo binario.....	6
Figura 1.2: Diagrama de una central de evaporación súbita o Flash.....	7
Figura 1.3: Diagrama de una central de vapor seco.	7
Figura 1.4: Ubicación del proyecto geotérmico Chachimbiro.....	10
Figura 2.1: Sección transversal de la zona en estudio.....	12
Figura 2.2: Sistema de inyección cerrado.....	15
Figura 2.3: Sistema de inyección abierto.....	16
Figura 2.4: Gobernador para el control de generación conectado a la turbina.	19
Figura 2.5: Modelo de control general para una central geotérmica.....	20
Figura 2.6: Mapa de deslizamientos y derrumbes potenciales en Ecuador ..	27
Figura 2.7: Área de la reserva ecológica Cotacachi Cayapas	28
Figura 2.8: Recorrido actual de las líneas de transmisión en Imbabura	28
Figura 2.9: Recorrido de la nueva línea de transmisión con interconexión al SNI - Alternativa 1	29
Figura 2.10: Perfil de elevación 1 L/T Chachimbiro - Ibarra.....	30
Figura 2.11: Perfil de elevación 2 L/T Chachimbiro – Ibarra	30
Figura 2.12: Recorrido de las nuevas líneas de transmisión con interconexión al SNI - Alternativa 2	31
Figura 2.13: Perfil de elevación 3 L/T Chachimbiro – Pomasqui	32
Figura 2.14: Disposición geométrica de conductores para la L/T	33
Figura 3.1: Perforación de pozo y tubería de vapor.....	35

Figura 3.2: Diseño de turbina Siemens SST-400 GEO size 1.	37
Figura 3.3: Perfil de elevación, L/T Chachimbiro – Ibarra.	38
Figura 3.4: Recorrido de la nueva línea de transmisión con interconexión al SNI.	39
Figura 3.5: Diagrama unifilar de la planta geotérmica Chachimbiro conectada al SNI en la barra de 138 KV S/E Ibarra.	41
Figura 3.6: Parámetros del generador, modelo 6, librería PSAT.	42
Figura 3.7: Parámetros del transformador de potencia.	42
Figura 3.8: Parámetros de la línea de transmisión.	43
Figura 3.9: Conexión del relé diferencial porcentual.	45
Figura 3.10: Gráfico de configuración de protección diferencial de generador.	46
Figura 3.11: Gráfico de configuración de protección diferencial de transformador.	47
Figura 3.12: Curva de protección característica categoría IV para protección de transformador.	48
Figura 3.13: Curva de selectividad para protección de transformador por sobrecorriente (50/51).	49
Figura 3.14: Esquema para el ajuste de la protección diferencial en las barras de las S/E Chachimbiro e Ibarra	50
Figura 3.15: Configuración para barra de 138 KV Chachimbiro.	51
Figura 3.16: Configuración para barra de 138 KV Ibarra	52
Figura 3.17: Esquema de ajuste de protección de distancia vista desde S/E Chachimbiro.	54
Figura 3.18: Diagrama de porcentajes de impedancias.	54

Figura 3.19: Esquema de ajuste de protección de distancia vista desde S/E Ibarra.	55
Figura 3.20: Diagrama de porcentajes de impedancias.....	55
Figura 3.21: Esquema para el ajuste de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) de la L/T de Chachimbiro.....	56
Figura 3.22: Esquema para el ajuste de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) de la L/T de Chachimbiro.....	57
Figura A.1: Estructura metálica de la torre de transmisión, doble circuito	68
Figura C.1: Gráfica de voltajes de la simulación para la planta generadora Chachimbiro conectada al SNI.....	70
Figura C.2: Gráfica de corrientes de la simulación para la planta generadora Chachimbiro conectada al SNI.....	70
Figura D.1: Relé de protección para generador	71
Figura D.2: Esquema de relé de protección para generador	71
Figura D.3: Relé de protección para transformador	72
Figura D.4: Relé de protección para barra.....	73
Figura D.5: Esquema de relé de protección para barra	73
Figura D.6: Relé de protección para línea	74
Figura D.7: Esquema de relé de protección para línea.....	74
Figura E.1: Sección transversal de la resistividad del terreno.	75
Figura F.1: Subestación Ibarra actualmente.	78
Figura F.2: Subestación Ibarra con L/T Chachimbiro.....	79
Figura G.1: Esquema unifilar de la S/E Chachimbiro.....	80

Figura G.2: Esquema de protección de la S/E Chachimbiro.....	81
Figura G.3: Esquema de comunicación de la S/E Chachimbiro.....	82
Figura G.4: Vista en planta de la S/E Chachimbiro.....	83
Figura G.5: Vista lateral de la S/E Chachimbiro, Corte A-A'	83
Figura G.6: Vista lateral de las casetas de protección y control para 13,8 KV y 138 KV, Corte B-B'.....	84
Figura G.7: Vista lateral de la S/E con zona de protección contra descargas atmosféricas con hilo de guarda	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuadro comparativo de los distintos tipos de generación de energía renovable.	5
Tabla 2: Clasificación de los sistemas para la producción de electricidad por geotermia.	5
Tabla 3: Prospectos geotérmicos estudiados en Ecuador.	9
Tabla 4: Características de los reservorios Ahuachapán y Berlín - El Salvador.	11
Tabla 5: Características geotérmicas Chachimbiro – Ecuador.	13
Tabla 6: Clase de los transformadores de corriente	22
Tabla 7: Amenazas de origen natural cantón San Miguel de Urcuquí	27
Tabla 8: Voltajes en p.u. sin planta de generación Chachimbiro.	43
Tabla 9: Voltajes en p.u. con la planta de generación Chachimbiro.	43
Tabla 10: Cargas de subestaciones importantes para el análisis del ingreso de la planta geotérmica Chachimbiro al SNI.	44
Tabla 11: Criterio de categoría para ajuste de protección de sobrecorriente transformadores.	48
Tabla 12: Impedancias de L/T conectadas a la subestación Ibarra.	53
Tabla 13: Impedancias resultantes según el cálculo porcentual.	53
Tabla 14: Resultados de cálculos de cortocircuito.	56
Tabla 15: Costo de inversión de la central geotermica Chachimbiro.	61

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA POR FUENTES GEOTÉRMICAS EN LA ZONA NORTE DEL PAÍS.

1.1. Introducción.

Ecuador posee un potencial recurso geotérmico que representa una oportunidad para obtener energía limpia y renovable, ya que aprovecha el calor del subsuelo para producir electricidad a través del vapor. Este tipo de energía no depende de las condiciones climáticas del entorno, por lo tanto, en el contexto internacional se lo considera generación base dentro del sistema eléctrico de potencia.

Esta investigación es factible por las condiciones geotérmicas del país, tal como ocurre en El Salvador e Islandia que son naciones modelo donde se implementa y aprovecha este recurso que satisface la demanda de energía en un 90 por ciento.

Considerando lo antes expuesto, se establece que es necesario incentivar en nuestro país este método de generación de energía eléctrica limpia, explotando un recurso desaprovechado y que al ser implementado contribuya en el desarrollo sostenible.

Con la aplicación de la energía geotérmica se disminuye la dependencia de combustibles fósiles, sumándose al uso de las fuentes de energías renovables que coadyuvan al cambio de la matriz energética.

A partir del Estudio de Prefactibilidad Inicial para Elaborar el Modelo Geotérmico Conceptual del Proyecto Chachimbiro, se determinó que la zona de Chachimbiro, ubicada en la provincia de Imbabura, presenta un potencial geotérmico de alta entalpía, con una reserva que permite explotar sosteniblemente este recurso para generación eléctrica.

A partir de los antecedentes mencionados, el proyecto integrador desarrollará el diseño de una planta de generación eléctrica que opere con energía geotérmica

que requiere de una subestación eléctrica para elevar el nivel de voltaje, a fin de que se conecte al Sistema Nacional Interconectado (SNI), mitigando la demanda de electricidad de fuentes no renovables de los generadores localizados en las ciudades aledañas al sector.

1.2. Objetivos.

1.2.1. General.

Desarrollar el diseño de una central de generación eléctrica para aprovechar el recurso geotérmico localizado en la zona norte de Ecuador, Chachimbiro, incorporando energía limpia al SNI y contribuyendo al cambio de la matriz energética.

1.2.2. Específicos.

- Determinar el método para una central de generación eléctrica mediante fuentes de energía geotérmicas, cuyo proceso aproveche el máximo permisible del recurso geotérmico.
- Diseñar una subestación eléctrica que permita elevar el voltaje al nivel adecuado para la transmisión de energía eléctrica.
- Analizar las alternativas de interconexión del diseño creado en el proyecto al SNI, acatando las regulaciones vigentes establecidas por la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP).
- Especificar las prácticas de eficiencia energética para reducir pérdidas y maximizar el rendimiento, asegurando el desarrollo de la generación eléctrica de forma eficiente.

1.3. Justificación.

La fuerte dependencia que tiene el país en el combustible fósil causa un incremento de precio en la energía eléctrica y una relación estrechamente ligada a el mercado internacional de petróleo. Por lo tanto, es indispensable buscar un recurso que sea sostenible para el cuidado del medio ambiente. En comparación con otros países, Ecuador posee zonas de mayor temperatura en el subsuelo, donde la geotermia parece ser la opción más rentable, puesto que al utilizarla

como una fuente adicional de energía beneficiaría a los pobladores más cercanos de la región y aliviaría a la vez la demanda general del país.

Actualmente, con el cambio de la matriz energética y la intención del Estado al querer traer consigo nuevas reformas estructurales que involucran el subsidio energético, se trata de disminuir la actividad petrolera e incentivar el desarrollo de ideas para diversificar las fuentes de energía en la matriz eléctrica con el uso de recursos renovables que sean amigables con el ambiente, con la finalidad de reducir la emisión de gases que producen el efecto invernadero.

Gracias a lo antes mencionado, en la sociedad se obtienen beneficios como la creación de nuevas plazas de trabajo, tanto en la empresa pública como privada, la reducción del costo de energía eléctrica, la reducción de riesgos de desastres originados por el consumo de gas licuado de petróleo, finalmente satisface la demanda de energía en horas pico ocasionada por el uso de cocinas de inducción; lo que resultará en un aumento de la estabilidad del sistema eléctrico.

En definitiva, el plan de generación de energía renovable por medio de recursos geotérmicos es una alternativa que, a pesar de necesitar una gran inversión, podría convertirse en uno de los mejores métodos de producción de energía eléctrica, ya que estas centrales pueden operar hasta el 90 por ciento del tiempo. Este factor de planta hace que este tipo de energía sea competitiva en torno a otros métodos convencionales de generación de energía eléctrica renovable.

1.4. Alcance.

La finalidad de este proyecto es el diseño de un prototipo de una central de generación eléctrica, que aproveche el recurso geotérmico de Chachimbiro, en el cantón Urcuquí de la provincia de Imbabura.

Previo al establecimiento del método de generación se seleccionarán los equipos necesarios para el diseño de la central, que permitan obtener el mayor rendimiento y la menor cantidad de pérdidas, otorgándole mayor eficiencia al sistema.

Para incrementar el nivel de voltaje es necesario elaborar el diseño de una subestación eléctrica con su respectiva coordinación de protecciones e

implementar los respectivos esquemas de comunicación, con el propósito de asegurar la correcta maniobra de los equipos.

Una vez elaborados los diseños, tanto de la central de generación como de la subestación eléctrica, se espera que la interconexión con el SNI, se produzca al seleccionar la alternativa que presente el mejor perfil de acuerdo a la elevación del terreno donde se trazará la ruta de la línea de transmisión. Con esta fase se concreta el diseño creado de la central de generación eléctrica aplicando un recurso renovable como la energía geotérmica.

1.5. Marco teórico.

1.5.1. Geotermia.

La geotermia emplea el calor acumulado en el interior del subsuelo mediante el uso de vapor para generar electricidad, “es un recurso renovable, poco contaminante, relativamente abundante y con un elevado factor de planta” [1].

El reservorio geotérmico está limitado por una capa de rocas altamente impermeable, que actúa como un sello que permite conservar el calor y la presión del fluido geotérmico.

Para estimar la temperatura del fluido geotérmico conforme varía la profundidad, se utiliza el gradiente geotérmico el cual depende de las condiciones geológicas del subsuelo. A pesar de esto, a nivel mundial se ha fijado en un valor promedio de 30 [°C/km].

1.5.2. Factor de planta.

El factor de planta indica el grado de utilización de una central eléctrica. Es el cociente entre la capacidad media operativa para la capacidad a plena carga. Por ejemplo, la Tabla 1 muestra que el factor de planta para una central geotérmica es del 85%, es decir 0,85. Este valor indica que, si se considera que la planta posee una capacidad máxima de generación de 1000 KW, la mayor parte del tiempo está generando en promedio 850 KW.

Cabe citar que la Tabla 1 muestra con detalle el costo de inversión, el costo de producción, el grado de contaminación y el tiempo de implementación de los diferentes tipos de generación de energías renovables, haciendo una comparación entre ellas y mostrando el impacto que produce al ambiente.

EVALUACION	SOLAR TERMoeLECTRICA	SOLAR FOTOVOLTAICA	HIDROELECTRICA	EOLICA	GEOTERMICA	BIOMASA
Costo de inversión	400 US\$/kW	2500 US\$/kW	1700 - 2500 US\$/kW	1200 US\$/kW	2100 US\$/kW	2500 - 3600 US\$/kW
Energía aproimada en un año MWh	2.628.000	1.489.200	4.818.000	3.066.000	7.446.000	6.570.000
Factor de planta aproximado	30%	17%	55%	35%	85%	75%
Costo de producción	22 cts/kWh	25 cts/kWh	8 10 cts/kWh	10 - 15 cts/kWh	8 cts/kWh	7- 10 cts/kWh
Contaminación	Ninguna	Calor residual	Minima	Visual	Columnas de vapor (H2S, CO2, NH3)	Particulas CO
Impacto ambiental	Moderado	Moderado	Moderado a Grande	Pequeño	Pequeño	Moderado
Tiempo de implementación	2 años	1 año	2 - 4 años	2 años	2 - 5 años	1 año

Tabla 1: Cuadro comparativo de los distintos tipos de generación de energía renovable.

1.5.3. Modelos de generación geotérmica.

Mediante las perforaciones realizadas al reservorio podemos conocer las características del fluido geotérmico, el cual es transportado por medio de una red de tuberías hacia la superficie. Una vez que se logra establecer el rango de temperatura a la que se encuentra este fluido se simplifica la selección del modelo de la planta de generación.

RANGO DE TEMPERATURA	TIPO DE RECURSO	MODELO DE PLANTA	RANGO DE POTENCIA ELECTRICA
80 - 150 [°C]	Media entalpía	Plantas binarias	0.1 - 10 [MW]
150 - 390 [°C]	Alta entalpía	Planta Hibrida	10 - 100 [MW]
		Planta Flash	
		Planta de Vapor seco	
>390 [°C]	Super crítico (no conveniente)	Planta de Vapor seco	>100 [MW]
		Planta sobrecalentada	

Tabla 2: Clasificación de los sistemas para la producción de electricidad por geotermia.

De acuerdo a lo observado en la Tabla 2, los métodos en los que se puede explotar el recurso geotérmico dependen directamente de la característica del yacimiento y del grado de temperatura.

Central de ciclo combinado.

Es un sistema binario, el calor del agua se transfiere a otro fluido líquido con una temperatura de ebullición más baja. Cuando el agua geotérmica sube a la superficie pasa por un intercambiador de calor, éste se encarga de transferir el calor del agua geotérmica a otro fluido líquido. Esta vaporización produce la presión suficiente para activar la turbina. Finalmente, el agua geotérmica es reinyectada y el fluido líquido es enfriado para repetir el proceso. Ver figura 1.1.

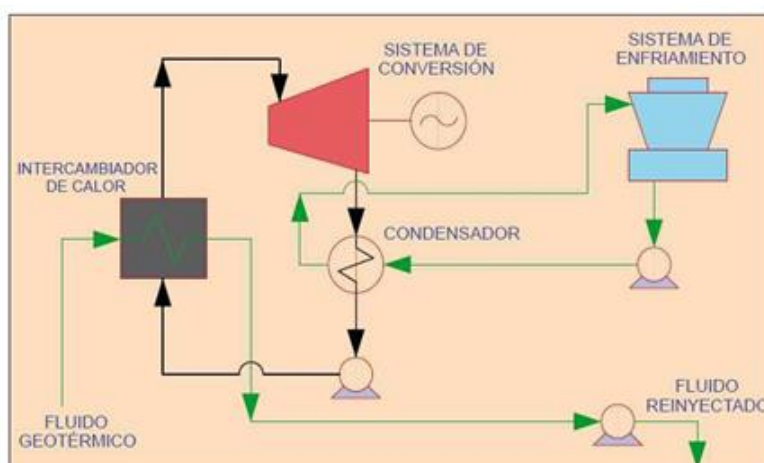


Figura 1.1: Diagrama de una central de ciclo binario.

Central de evaporación súbita o flash.

Este tipo de sistemas emplean fluidos geotérmicos compuestos por una mezcla de vapor y agua. El agua sube a la superficie a alta temperatura y alta presión, donde es rociada a una cámara de baja presión, causando que se separe rápidamente el vapor y el agua caliente. El vapor es canalizado a la turbina, la que mediante un eje común se conecta al generador. El líquido junto con el vapor se enfría e inyectan nuevamente en el yacimiento. Ver figura 1.2.

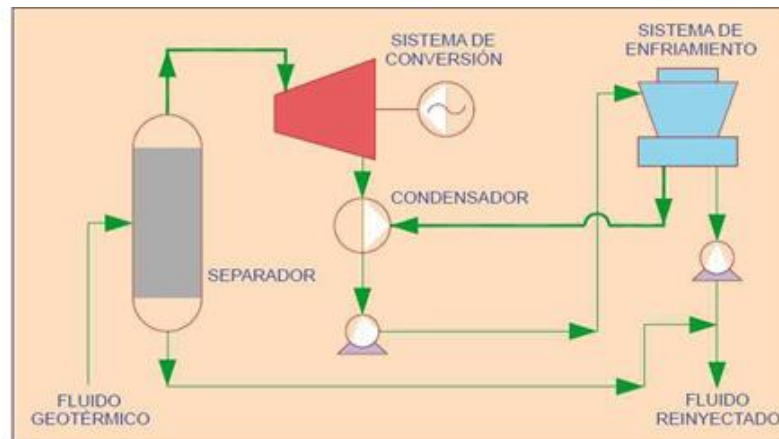


Figura 1.2: Diagrama de una central de evaporación súbita o Flash.

Central de vapor seco.

Este tipo de planta emplea directamente el vapor seco que se canaliza por medio de tuberías desde los pozos de producción hasta la central, llegando finalmente a la turbina. El vapor húmedo se pasa a un condensador para convertirlo en agua, que será reinyectada en el reservorio. Ver figura 1.3.

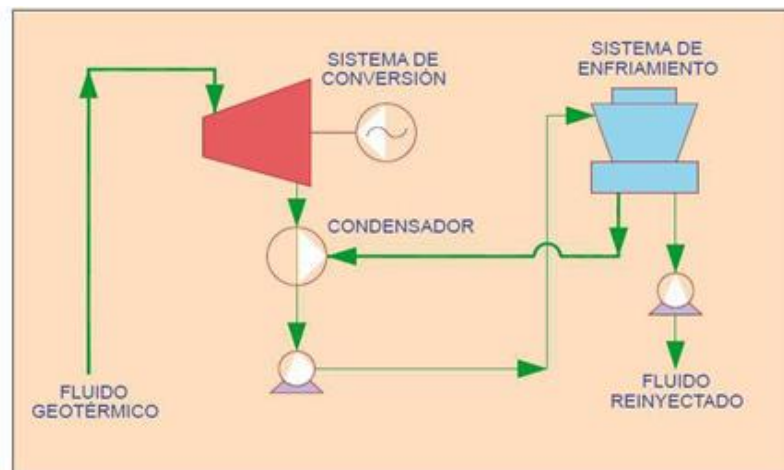


Figura 1.3: Diagrama de una central de vapor seco.

Sin importar el tipo de central, éstas se ven afectadas por los gases no condensables, los cuales forman parte de los fluidos geotérmicos y se acumulan en el condensador, llegando a afectar el rendimiento de una planta de energía geotérmica de manera significativa. Por lo tanto, estos

gases deben ser eliminados del proceso para optimizar el rendimiento de la planta.

Entre los principales problemas causados por estos gases tenemos [2]:

- “Reduce la potencia de salida de la turbina”, debido a su presencia en el condensador.
- “Corroen las tuberías y los equipos”, debido a la acidez de sus componentes.
- Su extracción, “incrementa el precio de la electricidad”.

1.5.4. Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Está constituido por líneas de transmisión y subestaciones eléctricas, presenta niveles de voltaje superior a 90 KV y su función es la de transportar energía eléctrica alrededor del país.

Las líneas de transmisión son las encargadas de transportar la energía eléctrica por medio de conductores desde la generación hasta la distribución. Sirven de enlace entre dos subestaciones eléctricas separadas grandes distancias. Está compuesta por estructuras metálicas, aisladores, conductores, y una serie de accesorios.

Las subestaciones eléctricas son las encargadas de transformar la energía eléctrica por medio de un transformador, cuya principal función es la de elevar el nivel de voltaje para reducir las pérdidas eléctricas en el transporte de la energía o reducir el nivel de voltaje para entregar la energía eléctrica a los centros de distribución locales.

1.5.5. Antecedentes de la geotermia en Ecuador.

Desde 1978 hasta 1992 los estudios geotérmicos en el país fueron liderados por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL), en el año de 1993 la falta de recursos económicos obligó a cerrar el proyecto de investigación. Durante el periodo de 1996 hasta el 2007 se abandonó por completo el plan para el uso del recurso geotérmico.

En el año 2008 a partir de la propuesta del cambio de la matriz productiva y energética el Estado decidió invertir en sectores estratégicos, lo que permitió reiniciar los estudios y la investigación de la energía geotérmica.

En 2010 el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) elabora un plan de aprovechamiento geotérmico y cede a la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) el monitoreo y la ejecución de los principales proyectos de esta fuente energética.

En el lapso del 2010 al 2015, la empresa pública CELEC EP ha llevado a cabo los estudios de prefactibilidad inicial en lugares tales como: Chacana - Jamaico, Chacana - Cachiyacu, Chachimbiro, Tufiño - Chiles, Chalpatán. En la Tabla 3 se registra la estimación en megavatios aprovechables de cada uno de los proyectos geotérmicos del país.

ZONA	CAPACIDAD ESTIMADA	ESTADO DEL PROYECTO
CHACANA: JAMANCO	3.3 - 26 MW	Prefactibilidad inicial concluida (Geociencias)
CHACANA: CACHIYACU	7.6 - 83 MW	Prefactibilidad inicial concluida (Geociencias)
CHACHIMBIRO	13 - 178 MW	Prefactibilidad inicial concluida (Geociencias)
BINACIONAL TUFÍÑO - CHILES - CERRO NEGRO	22 - 330 MW	Prefactibilidad en proceso
CHALPATÁN	Potencia en estudio	Prefactibilidad en proceso

Tabla 3: Prospectos geotérmicos estudiados en Ecuador.

Los prospectos geotérmicos Chachimbiro y Tufino son las opciones más representativas en cuanto a capacidad de producción de energía eléctrica se refiere, según la Tabla 3. De entre las dos opciones destaca Chachimbiro, debido a que Tufiño es un proyecto binacional en la que se involucra a Colombia, por ello al tratarlo de forma independiente no representa una alternativa viable para el desarrollo de ambos países.

1.5.6. Prospecto geotérmico Chachimbiro.

Se encuentra localizado en el norte del Ecuador, en la provincia de Imbabura, atravesado por la Cordillera Occidental de los Andes, “aproximadamente a unos 80 km al NNE de Quito y a unos 20 km al NNO

de la ciudad de Ibarra, limitando al norte y este con la cuenca del Chota y el Valle Interandino, al sur con el edificio del Volcán Cotacachi y al oeste con el Volcán Yanaurco” [3]. En la Figura 1.4 se muestra la ubicación de Chachimbiro en el mapa ecuatoriano.

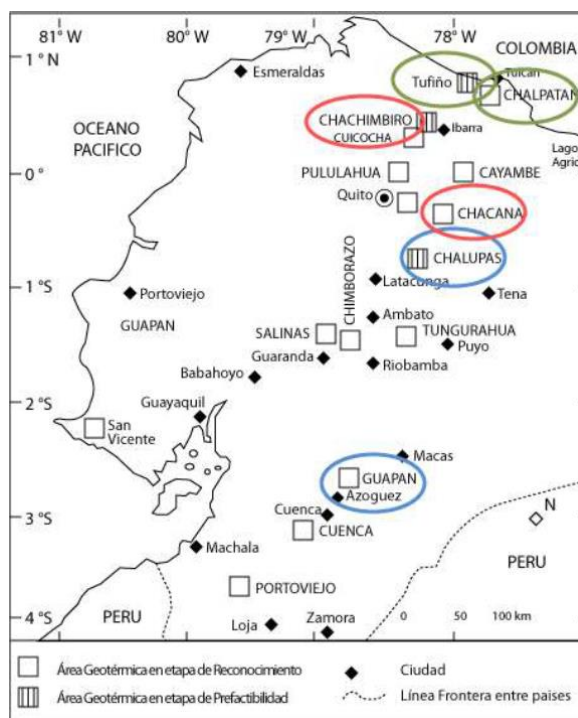


Figura 1.4: Ubicación del proyecto geotérmico Chachimbiro.

Dado los hallazgos volcánicos en el área de Chachimbiro y de acuerdo al estudio de prefactibilidad, se propone la presencia de un reservorio a una profundidad de 1800 metros, cuyo recurso geotérmico presenta “una temperatura de sub superficie de 225 - 235o C” [3] y que por medio de una falla tectónica permite su ascenso a la superficie.

CAPÍTULO 2

2. ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE GENERACIÓN ELÉCTRICA POR GEOTERMIA.

2.1. Análisis geotérmico en Chachimbiro.

Los expertos se basan en los estudios de prefactibilidad realizados en el país y en el hecho de que los países centroamericanos y sudamericanos se encuentran en el cinturón de fuego del Pacífico, para determinar que Ecuador posee condiciones geotérmicas similares a El Salvador. Por ello analizando ciertas plantas geotérmicas de este país se llega a la conclusión de que las condiciones de las centrales geotérmicas Ahuachapán y Berlín presentan características semejantes del recurso geotérmico a las obtenidas en el estudio de Chachimbiro.

A continuación, en la Tabla 4 se muestran las características del recurso geotérmicos en cada una de las centrales geotérmicas antes mencionadas:

CARACTERÍSTICAS	CENTRAL AHUAPACHÁN	CENTRAL BERLÍN
TEMPERATURA DE RESERVORIO	240 °C	290 °C
PROFUNDIDAD DE RESERVORIO	1600 metros	2000 metros
PRESIÓN DE RESERVORIO	18 - 20 bar	100 - 110 bar
ENTALPÍA	1000 Kj/kg	1350 Kj/kg
CAUDAL TOTAL	714 Kg/s	350Kg/s
PRESIÓN DE ENTRADA	6 bar	10 bar
FRACCIÓN DE VAPOR	14 - 100%	15 - 100%
TIPO DE RESERVORIO	líquido dominante	líquido
PROMEDIO DE PRODUCCIÓN POR POZO	5 MW	8 MW

Tabla 4: Características de los reservorios Ahuachapán y Berlín - El Salvador.

Los estudios realizados dan indicio de que en Chachimbiro existe un potencial de 13 MW a 178 MW aprovechables. Considerando que el factor de recuperación

del calor en el fluido es de 25%, se prefiere iniciar la producción de energía eléctrica con una capacidad menor a la indicada en el estudio. Con ello se evita la escasez del recurso geotérmico, puesto que el fluido inyectado es capaz de recuperar su temperatura eficazmente para completar el ciclo geotérmico.

En Chachimbiro, el área del recurso geotérmico es de aproximadamente 4,5 Km², cuya temperatura en el subsuelo es de 230°C como máximo, a una profundidad de 1800 metros.

Este recurso está asociado a una falla tectónica, que permite el ascenso de azufre y de fluidos termales desde el reservorio hacia la superficie. En su recorrido se encuentra con una capa de arcilla cerca de la zona de ebullición, provocando que disminuya la temperatura tanto del agua como de los gases que la atraviesan, tal como se observa en la Figura 2.1.

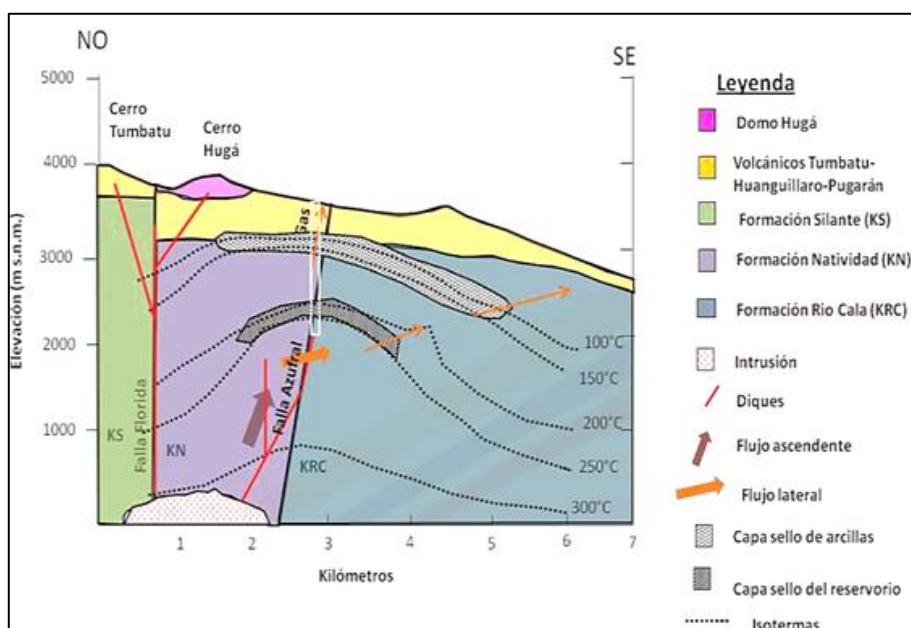


Figura 2.1: Sección transversal de la zona en estudio.

Además, el estudio geoquímico dio como resultado que “las aguas de Chachimbiro son cloruradas – sulfatas de alta salinidad con emanaciones de CO₂ y precipitaciones de azufre” [3], presentando indicios de que existe gran cantidad de gases no condensables en el reservorio.

Por lo antes mencionado, se considera que las características del recurso geotérmico en Chachimbiro son cercanas a las mostradas en la Tabla 5:

CARACTERÍSTICAS	CAPACIDAD ESTIMADA	CARACTERÍSTICAS	CAPACIDAD ESTIMADA
TEMPERATURA DE RESERVORIO	230 °C	CAUDAL TOTAL	570 kg/s
PROFUNDIDAD DE RESERVORIO	1800 metros	PRESIÓN ENTRADA	8 - 12 bar
SUPERFICIE	4,2 Km	FRACCIÓN DE VAPOR	14 - 100 %
PRESIÓN DE RESERVORIO	18 - 20 bar	TIPO DE RESERVORIO	líquido dominante
ENTALPÍA	1000 Kj/kg	GASES NO CONDENSABLES	2 - 4 %

Tabla 5: Características geotérmicas Chachimbiro – Ecuador.

2.2. Análisis del sistema de evaporación súbita o Flash.

Acorde con la Tabla 2 el sistema de evaporación súbita o Flash es el adecuado para el diseño creado, dadas las condiciones físicas y químicas del subsuelo que presentan un recurso geotérmico de alta entalpía con una temperatura de 230°C.

Para este sistema se puede aplicar plantas de tipo Single Flash o Double Flash, con la única diferencia de que la Double Flash añade una segunda etapa de vaporización. En nuestro caso se recomienda el tipo Single Flash, debido a que este sistema es comúnmente utilizado para zonas con fluido geotérmico presurizado a temperaturas no mayores de 250°C.

2.2.1. Equipamiento del sistema Single Flash.

Los elementos y equipos que se van a utilizar en este tipo de planta son los siguientes:

- Válvula de cabeza de pozo
- Silenciadores
- Tubería de vapor
- Separador de vapor ciclónico
- Removedor de humedad
- Bombas de condensado
- Sistema de inyección
- Tubería de salmuera

Válvula de cabeza de pozo.

La válvula de cabeza de pozo permite controlar la presión del fluido geotérmico, se encuentra ubicada exactamente entre la tubería del pozo y la línea de vapor. Para evitar pérdidas de presión y temperatura esta válvula será colocada lo más cerca posible a la central de generación.

Silenciadores.

Estos equipos son especialmente diseñados para disminuir el ruido hasta en 30 decibeles, el cual se produce en el momento de enviar fluido geotérmico a la turbina.

Tubería de vapor.

Normalmente se considera un pozo de tamaño estándar con un diámetro de tubería de 9 $\frac{5}{8}$ " , y una tubería ranurada de 7" o 7 $\frac{5}{8}$ " de diámetro en una sección abierta de 12 $\frac{1}{4}$ " de diámetro, o un pozo de mayor tamaño con un diámetro de tubería de 13 $\frac{3}{8}$ " , y tubería ranurada de 9 $\frac{5}{8}$ " o 10 $\frac{3}{4}$ " de diámetro en una sección abierta de 12 $\frac{1}{4}$ " de diámetro. Construidos generalmente de acero al carbono con alta resistencia a la oxidación.

Separador de vapor ciclónico.

Este elemento se encarga de separar el fluido geotérmico que se extrae del pozo en dos, agua y vapor; ya que por lo general el agua está altamente contaminada con azufre y otros elementos más como H₂S, obteniendo así vapor que va directamente a la turbina.

En el mercado se pueden encontrar equipos con alta tecnología que logran separar esta mezcla con una eficiencia del 98%, es decir que existe un porcentaje mínimo (2%) de agua que ingresa a la turbina.

El separador puede ser colocado estratégicamente cerca de la turbina, con el fin de reducir al mínimo las pérdidas de velocidad de vapor.

Removedor de humedad.

Su función es eliminar gotas de salmuera que viajan en el vapor para que no ingresen a la turbina, para prevenir la contaminación y la corrosión del

material de la misma. También se encarga de retener sólidos o escamas de óxido del interior de la tubería. Éste equipo deberá ubicarse lo más cerca a la turbina.

Piernas y bombas de condensado.

Las piernas de condensado por lo general miden entre 500 m y 1000 m. Su función es la de atrapar el condensado residual mezclado con el vapor para retirarlo de la tubería. Se conectan mediante bombas, las cuales ejercen una presión dentro de las piernas, con la finalidad de remover las sales disueltas presentes en el vapor al salir del separador.

Sistema de inyección de salmuera.

Para inyectar la salmuera junto con los gases no condensados de la forma más eficiente, existen dos tipos de sistemas de inyección, cerrado y abierto.

El sistema de inyección cerrado, como se muestra en la Figura 2.2, conserva la presión y la temperatura de la salmuera que se encuentra en el separador, y que por medio de una tubería es trasladada hasta la zona de inyección, manteniéndola presurizada, de esta forma se evita la contaminación al no exponerla al medio ambiente.

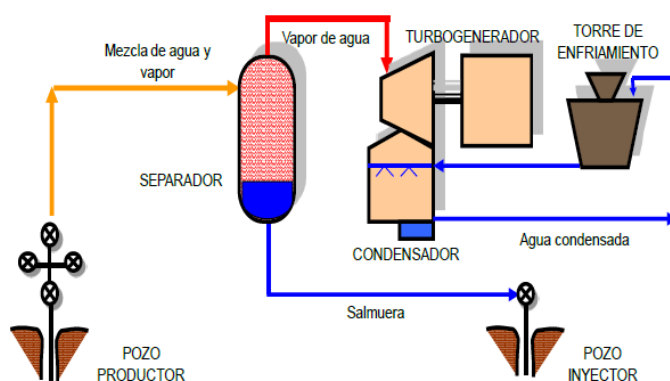


Figura 2.2: Sistema de inyección cerrado.

El sistema de inyección abierto como se muestra en la Figura 2.3, permite que el fluido caiga por acción de la gravedad y pase a un silenciador, que viaja a través de una tubería hasta una presa donde se reduce la

temperatura para que las sales de la salmuera se asienten. Contaminan en cierto grado al dejar el fluido expuesto al medio ambiente.

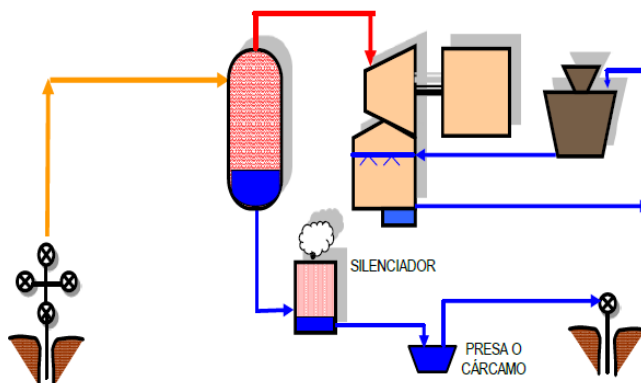


Figura 2.3: Sistema de inyección abierto.

Tubería de salmuera.

El fluido que es separado del vapor necesita regresar al subsuelo para cumplir el ciclo geotérmico. Para esto se requiere un sistema de inyección, mismo que también utiliza tuberías para transportarlo. El diámetro comúnmente usado para este tipo de tuberías es de 9 $\frac{5}{8}$ pulgadas de diámetro y una tubería ranurada de 7 pulgadas de diámetro con características similares a los pozos productores.

2.3. Sistema de generación.

De acuerdo al estudio de las condiciones geotérmicas en la zona de Chachimbiro antes mencionadas, se proponen ideas iniciales de generación eléctrica que consideren una producción cuya potencia base permita la viabilidad del recurso, acorde al factor de recuperación de calor establecido.

El presente cálculo de la ecuación 2.1 ayuda a establecer un máximo de generación aprovechable, considerando un factor de recuperación del 25%:

$$178 \text{ MW} \times 25\% = 45 \text{ MW} \quad (2.1)$$

Acorde a este resultado, se fija una generación de 30 MW en la fase inicial. Sin embargo, se puede generar hasta 50 MW, cuando se dispone de un sistema de inyección del fluido de tipo cerrado, el cual no compromete la eficiencia del ciclo geotérmico, debido a que conserva la temperatura.

Como resultado se establece una alternativa con dos pasos. Una generadora modular con capacidad inicial de 30 MW y una futura ampliación a 50 MW. En la que se debe considerar un grupo de 3 generadores de 10 MW en su parte inicial, con un incremento de 2 generadores de 10 MW en su futura ampliación.

2.3.1. Turbina-Generador.

Las turbinas geotérmicas tienen la particularidad de ser diseñadas para soportar condiciones extremas. En el sistema Single Flash, la turbina recibe el vapor condensado para impulsar sus álabes, que acoplada al generador mediante un eje permite la producción de energía eléctrica.

La opción más rentable y eficiente para el diseño de generación modular, es emplear grupos de turbina-generador acoplados de pequeña capacidad, para satisfacer los requerimientos de generación inicial y futura antes mencionada.

2.4. Sistema de control de generación.

Las centrales eléctricas térmicas implican un complejo arreglo de tuberías y máquinas que interactúan en un mismo sistema. Deben contar con un control que entregue seguridad y eficiencia al proceso de generación.

Por este motivo, la apertura y cierre de válvulas conductoras de fluidos están provistas de un control que garantice la fiabilidad del sistema.

Generalmente, las centrales de generación geotérmicas implementan los siguientes tipos de control por medio de válvulas:

- Control de válvulas de turbina, para controlar el nivel de presión de entrada.
- Control de válvulas de derivación, para desviar la cantidad de salmuera que es transportada en la tubería de reinyección.
- Control de válvulas de seguridad, para reducir las sobrepresiones que ocurren por irregularidades del fluido geotérmico.

En la central geotérmica Chachimbiro, se implementará el tipo de control por medio de válvulas aplicado en las válvulas de la turbina. Este tipo de control puede ser modelado utilizando la siguiente ecuación 2.2:

$$\omega_{\text{valve}} = F_p(\theta) A_v Y \sqrt{\rho_i p_i r_s} \quad (2.2)$$

Donde, $F_p(\theta)$ describe la geometría de tuberías con respecto a la posición de la válvula θ , A_v es el coeficiente de dimensionamiento de la válvula, Y es el factor de compresibilidad, ρ_i es la densidad del vapor de entrada, p_i es la presión de vapor de entrada y r_s es la relación de la caída de presión.

La característica de este modelo cuenta con una relación prácticamente lineal, lo que implica que la tasa de flujo de masa a través de la válvula ω_{valve} sea linealmente dependiente de la posición de la válvula. El coeficiente de dimensionamiento de la válvula A_v se da en m^2 .

La aplicación de este sistema de control de válvulas está relacionado con el control de frecuencia. En estado estable el control de generación de energía eléctrica equivale al consumo de energía incluyendo pérdidas. La frecuencia del sistema por consiguiente permanece constante.

Un desequilibrio entre la potencia generada y la consumida, implica una frecuencia variable sostenida. Estos desequilibrios repentinos se deben a la salida de un generador o la entrada repentina de carga, por lo cual es necesario implementar un sistema de control de frecuencia. Dicho esto, el control de frecuencia se lo puede realizar de manera descentralizada y centralizada.

La acción de control de frecuencia descentralizada se basa en la desviación automatizada de frecuencia medida; esta se consigue por medio de un gobernador en la turbina. Utiliza una señal que relaciona la velocidad del eje con la frecuencia, con la finalidad de ajustar la potencia de salida de la central. El gobernador regula la potencia de salida de la turbina mediante el control la posición de la válvula en la entrada. La Figura 2.4 muestra esquemáticamente el modelo completo del gobernador de la turbina.

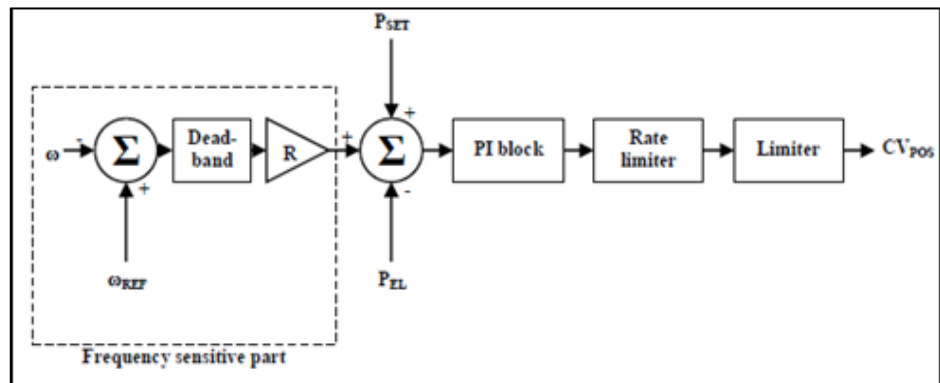


Figura 2.4: Gobernador para el control de generación conectado a la turbina.

Donde R es la desviación de frecuencia que es inversa de la pendiente del estatismo de la máquina, ecuación 2.3:

$$R=1/\delta \quad (2.3)$$

Como el gobernador utiliza la señal que relaciona la velocidad del eje con la frecuencia, es necesario hacer el modelo de control para el eje de la turbina-generator, lo cual se logra con las siguientes ecuaciones diferenciales 2.4:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_m}{dt} &= \omega_m \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= \zeta_m \end{aligned} \quad (2.4)$$

Donde φ_m es el ángulo del eje, ω_m es la velocidad angular del eje, J es el momento de inercia y ζ_m es el par mecánico. La salida Cv_{pos} indica la posición final de la válvula en el que la potencia eléctrica generada se compara con el punto de ajuste de la válvula, por este motivo se realiza una retroalimentación en el sistema de control.

En la Figura 2.5 se muestra el modelo de control general para una planta térmica de vapor, que incluye el modelo del gobernador detallado anteriormente.

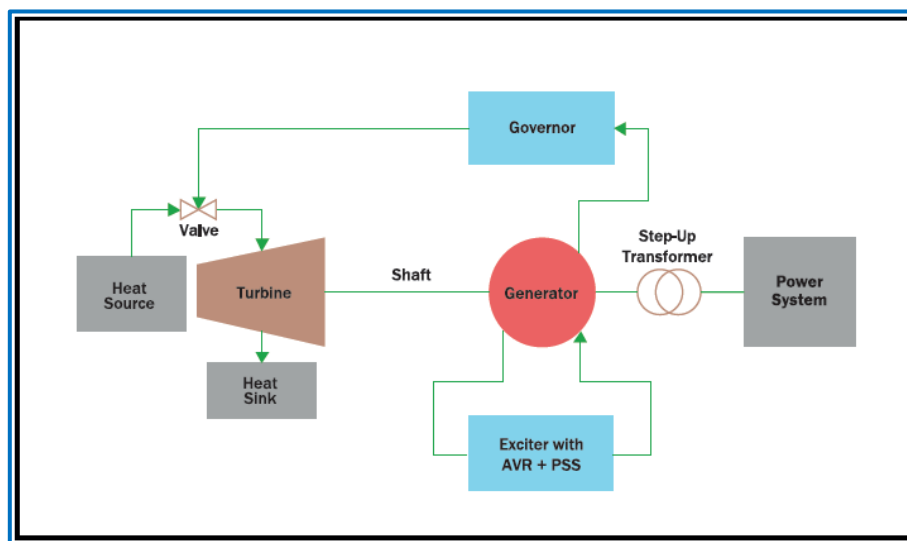


Figura 2.5: Modelo de control general para una central geotérmica.

2.5. Descripción de la subestación eléctrica Chachimbiro.

Para conectar la central geotérmica al SNI por medio de una línea de transmisión, se requiere el diseño de una subestación que eleve el nivel de voltaje de 13,8 KV a 138 KV. Este diseño debe incluir el sistema de aterrizaje o puesta a tierra con una resistencia máxima de 3Ω , el correcto dimensionamiento de equipos, el sistema de control y protección y la coordinación de protecciones.

Para que la subestación sea modular, se necesita un transformador que cubra la máxima generación inicial máxima (30MW), dejando una bahía libre para el ingreso de un nuevo transformador conectado en paralelo, que en conjunto soporten la generación total máxima (50MW).

Adicionalmente, la subestación debe contar con los transformadores de instrumentación, para medición y protección. De la misma manera con equipos de protección, seccionamiento, pararrayos y el sistema de puesta a tierra, con el fin de establecer un diseño completo y detallado.

2.5.1. Elementos de la subestación eléctrica Chachimbiro.

Para establecer el diseño de la subestación Chachimbiro se debe considerar ciertos parámetros, normas y estudios en cuanto al

dimensionamiento de los equipos necesarios que la conformen, por este motivo se detallan a continuación dichos elementos:

Cuarto de protección y control para 13,8 KV y 138 KV.

Para una mejor distribución de los equipos, se requiere de dos cuartos. Uno para protección de la generación a nivel de 13,8KV y otro para los equipos de medición y control de la subestación en ambos niveles de voltaje.

El cuarto de protección contendrá las protecciones de los generadores de forma independiente, por medio de interruptores modulares, los cuales permiten futuras expansiones en el sistema de generación.

Los elementos de protección para los generadores son switchgear. Estos equipos al ser compactos y de una alta precisión proporcionan mayor seguridad y efectividad al sistema eléctrico. Por cada generador existirá un switchgear conectado en paralelo a una barra común, en la que se instalará un switchgear para protección general.

El cuarto de control para 13,8 KV y 138 KV contendrá los sistemas de control y monitoreo de las unidades de generación tales como, el sistema de control de válvulas, gobernador y regulador de voltaje, el sistema de monitoreo de temperatura, presión y caudal. Además, contendrá los relés de protección de los equipos como transformador de potencia, barras y línea de transmisión.

Transformador de potencia.

Acorde a lo establecido anteriormente, la capacidad esperada por las unidades de generación instaladas es de 30 MW con una futura ampliación a 50 MW. Por consiguiente, las características del transformador de potencia fueron calculadas de acuerdo a estas necesidades y facilitadas por la empresa brasileña WEG S.A.

Un futuro crecimiento en la generación de 30 MW a 50 MW, requiere de un transformador adicional con las mismas características, las cuales son presentadas a continuación:

- Capacidad instalada 30/37,5 MW
- Transformador elevador 13,8 /138 KV
- Refrigeración ONAN/ONAF
- TAP 2,5%
- Desfase 30°
- NBI primario 550 KV
- NBI secundario 110 KV
- Corriente de excitación 0,5%
- Impedancia 11%
- Conexión primaria (delta), secundario (estrella)

Transformador de instrumentación: Transformador de Corriente.

Para su cálculo se utiliza la corriente nominal que circula por el bobinado del lado de alta y baja tensión del transformador. El resultado obtenido es el mostrado en la Tabla 6:

Bobinado del transformador	Corriente Nominal [A]	Clase de TC'S
Baja Tensión	1276,022	C:20000
Alta Tensión	127,6022	C:300

Tabla 6: Clase de los transformadores de corriente.

El transformador de potencia tiene la característica de tener integrado en los bushing de baja los transformadores de instrumentación para la medición de corriente del lado de baja tensión, así que no es necesaria su adquisición.

El transformador de corriente que se recomienda para el bobinado de alta tensión es el OSKF marca General Electric (GE), diseñados para una vida útil de 30 años. El aceite está sellado herméticamente sin aire, por un conjunto de diafragma de acero inoxidable y todas las partes externas son de un material resistente a la corrosión.

La corriente máxima que soporta el TC se debe dimensionar considerando la corriente máxima nominal del transformador de potencia en el lado de alta tensión.

Por lo tanto, se muestran las características del TC para el bobinado de alta tensión:

- Exactitud estable
- Libre mantenimiento
- Capacidad de 650 KVBILL
- Corriente máxima soportada 400A
- Núcleos secundarios requeridos 4
- Cumplimiento de normas IEC e IEEE

Para el nivel de voltaje de 138 KV el KVBILL es de 650.

Transformador de instrumentación: Transformador de Potencial.

El transformador de voltaje o potencial se elige de acuerdo al nivel de voltaje que se desea medir. Por lo general transforma el voltaje de lectura a 115 V o $115/\sqrt{3}$ V dependiendo de lo que se necesite.

El transformador de voltaje recomendado es de tipo tanque aislado. Este transformador de tensión se caracteriza por una alta seguridad de operación, fácil mantenimiento, protección contra explosiones y soporta las condiciones más severas de operación.

Las características del TP son las siguientes:

- Exactitud estable
- Capacidad desde 138 KV
- Lleno aceite mineral
- Corriente máxima 5000A
- Núcleos secundarios requeridos: 3
- Cumplimiento de normas IEC e IEEE

Seccionadores S3C.

Este seccionador de fase proporciona un ahorro de espacio que beneficia al diseño físico de la subestación. Las características mecánicas y eléctricas óptimas de las partes que son energizadas, garantizan seguridad mediante el uso de aleaciones de aluminio de alta resistencia, combinados con los contactos de cobre plateados. El S3C se puede personalizar según los requerimientos de ubicación (vertical y suspendidos). Presenta las siguientes características.

- Aprovechamiento de distancia de fase a fase
- Built-in seccionadores de tierra y limitadores de arco
- Fácil de mantenimiento
- Fácil puesta en marcha

Disyuntores para protección a nivel de voltaje de 138 KV.

Se recomienda el disyuntor de General Electric GL310, por su rendimiento a altas y bajas temperaturas. Es un interruptor automático de tanque vivo, su principal ventaja es la reducción de energía de apertura en un 65% en comparación con los interruptores automáticos convencionales. Las principales características se detallan a continuación:

- Resortes de accionamiento dentro de cada polo
- El fácil acceso a la SF6 conexión de llenado (tipo DIL0)
- SF6 válvula de retención (check) en cada columna de polo
- Corriente nominal 3150A
- Corriente máxima de cortocircuito 40KA
- Tiempo máximo de accionamiento por falla 3s
- Tiempo de apertura y cierre 28ms/50ms

Protección por medio de relés: Protección de generador.

Una protección necesaria en el generador es la protección diferencial (ANSI 87G), para protegerlo de fallas producidas en el bobinado del generador. Debido a que el generador por sus características

constructivas está sólidamente aterrizado, esta protección cubre el 100% del devanado ante cualquier tipo de falla.

Es necesario aplicar la protección de sincronización (ANSI 25), para sincronizar las unidades de generación a la barra de 13,8KV. Este procedimiento debe ser llevado a cabo con seguridad y eficiencia.

Protección por medio de relés: Protección de transformador de potencia.

Luego de la selección de los transformadores de instrumentación (TC'S y TP'S) se seleccionan los relés que recibirán las señales de corriente y voltaje para la medición y protección del sistema eléctrico. En este proyecto se mostrará el ajuste de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) y diferencial (ANSI 87T) para el transformador. Las demás protecciones intrínsecas para el transformador podrán ser ajustadas dependiendo del tipo de relé.

Protección por medio de relés: Protección de barra.

La protección de barra es una de las protecciones más importantes dentro de las subestaciones eléctricas. En este proyecto se mostrará el ajuste de la protección diferencial (ANSI 87). Sin embargo, se recomienda aplicar esta protección de barra únicamente en la barra de alta tensión (138 KV). No es recomendable aplicar el ajuste de la protección diferencial en la barra de baja tensión (13,8 KV), pues resultaría altamente costoso y redundante a la vez, debido a que dicha barra está protegida por switchgear, tal como se especificó en la descripción del cuarto de protección.

Protección por medio de relés: Protección de línea de transmisión.

La línea de transmisión al tener una longitud de 15 km, es considerada una línea de transmisión corta, por este motivo se recomienda el ajuste de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) y no direccional (ANSI 67) aplicada normalmente en líneas de transmisión largas. La protección de sobrecorriente proporciona la selectividad, seguridad y confiabilidad al

sistema eléctrico de potencia, en vista que los relés están comunicados entre sí por medio de teleprotección, reciben la información de los TC's y TP's de línea, conectados en la barra de Chachimiro y la barra de Ibarra. En este proyecto se mostrará el ajuste de la configuración de protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) y la protección de distancia (ANSI21) por el método de impedancia de la línea.

Malla puesta a tierra.

Se realizará el diseño de la malla de puesta a tierra para la subestación eléctrica Chachimiro, cumpliendo con los requerimientos establecidos en la norma IEEE Std. 80-2000, que indica una resistencia máxima de 3Ω .

2.6. Diseño de línea de transmisión.

Se requiere conectar la subestación Chachimiro al SNI en el punto más cercano. Para trazar la ruta de la línea de transmisión se debe considerar temas de carácter social, ambiental, geológico, tráfico aéreo, amenazas ambientales, tipo de suelo, accesibilidad, diseño actual del SNI, entre otros.

2.6.1. Ruta de línea de transmisión.

Analizando los mapas y con ayuda de Google Earth, se nota lo siguiente:

- Existencia de gran cantidad de montañas y volcanes, siendo el volcán Chachimiro el más cercano con una elevación de 4,1 Km.
- Las rutas de vuelo no interceptan el lugar, debido a que se cerró el único aeropuerto cercano a la ciudad en 2011.
- El recorrido de la línea de transmisión se centra en el cantón San Miguel de Urcuquí, y presenta amenazas de origen natural, mostradas en la Tabla 7.



Figura 2.7: Área de la reserva ecológica Cotacachi Cayapas.

Como se observa en la Figura 2.7, Chachimbiro se encuentra aproximadamente a 7 Km hacia el este, bordeando la reserva ecológica Cotacachi Cayapas, por ello, la construcción de una subestación en la zona no presenta mayor inconveniente.

En lo relacionado al SNI, se cuenta con tres líneas de transmisión cercanas a Chachimbiro, las cuales se muestran en la Figura 2.8 y se detallan a continuación:



Figura 2.8: Recorrido actual de las líneas de transmisión en Imbabura.

Con un nivel de voltaje de 230 KV se tiene dos líneas de transmisión a doble circuito que enlazan las subestaciones Pomasqui en Pichincha y Jamondino en Cauca (Colombia), tienen una longitud de 212 Km cada una. Esta línea de transmisión no cuenta con subestación de paso en su recorrido y el punto más cercano con Chachimbiro se encuentra a una distancia estimada de 25 Km.

Con un nivel de voltaje de 138 KV se tiene la línea de transmisión a doble circuito que enlaza las subestaciones Pomasqui en Pichincha e Ibarra en Imbabura, con una longitud de 60 Km. Se encuentra en el punto más cercano con Chachimbiro a una distancia estimada de 13 Km.

La S/E Ibarra cuenta con tres niveles de voltaje 138 KV, 69 KV y 13,8 KV y permite alimentar las cargas principalmente de la ciudad de Ibarra y sectores aledaños.

Tomando esta información como referencia, en esta etapa se analizan dos diferentes alternativas de diseño, las que se citan a continuación:

Alternativa 1:

Proyectar la S/E Chachimbiro como subestación elevadora con un nivel de voltaje de 138 KV. Para ello, es necesario conocer el diseño actual de la subestación Ibarra para establecer su interconexión con Chachimbiro a una distancia estimada de 13 Km (Anexo F).

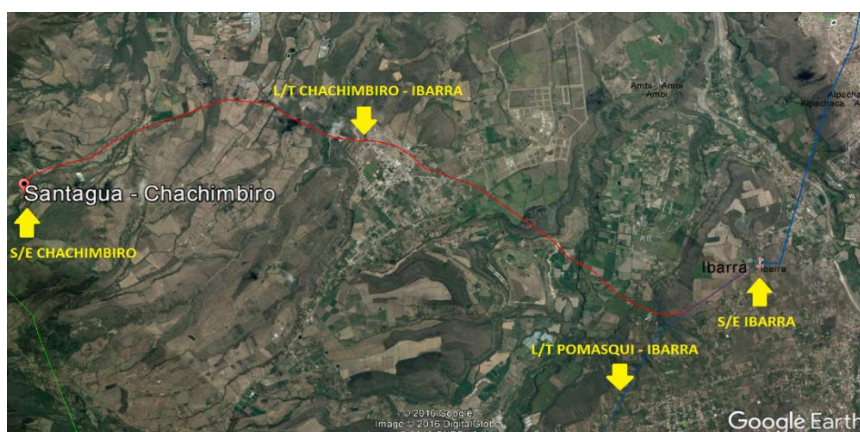


Figura 2.9: Recorrido de la nueva línea de transmisión con interconexión al SNI - Alternativa 1.

En la Figura 2.9 se muestra la ruta de la línea de transmisión a circuito simple (30 MW) inicialmente y a doble circuito en el futuro (50 MW) con un nivel de voltaje de 138 KV que enlaza las subestaciones Chachimbiro e Ibarra ambas localizadas en Imbabura. Tiene una longitud de aproximadamente 15 Km.

Presenta dos zonas críticas con respecto a la variación de pendiente las cuales son mostradas a continuación:

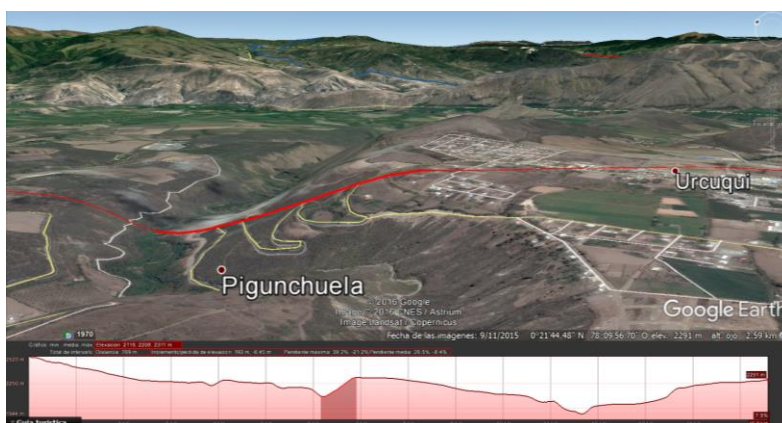


Figura 2.10: Perfil de elevación 1 L/T Chachimbiro – Ibarra.

En la Figura 2.10 se muestra una zona crítica que presenta la máxima pendiente la que toma un valor de 39,2% y se encuentra representada por la región sombreada en el perfil de elevación, tiene un incremento de elevación de aproximadamente 200 metros en una longitud de aproximadamente 800 metros.



Figura 2.11: Perfil de elevación 2 L/T Chachimbiro – Ibarra.

Otra zona crítica es la mostrada en la Figura 2.11, la cual presenta una pérdida de elevación de aproximadamente 150 metros y una longitud de aproximadamente 600 metros, siendo su pendiente 39,5% la que se encuentra representada en la región sombreada en el perfil de elevación.

Alternativa 2:

Proyectar la S/E Chachimbiro como subestación elevadora y de paso con un nivel de voltaje 138 KV, necesitará seccionar la antigua línea entre las subestaciones Pomasqui e Ibarra para que intercepten en su recorrido con la subestación Chachimbiro. Esto conlleva diseñar líneas a doble circuito que lleguen y que salgan de la subestación, esta ruta se muestra en la Figura 2.12.



Figura 2.12: Recorrido de las nuevas líneas de transmisión con interconexión al SNI - Alternativa 2.

Se toma la ruta de la línea de transmisión de la alternativa 1 (Figura 2.9) para enlazar las subestaciones Chachimbiro e Ibarra a doble circuito con el mismo nivel de voltaje y las mismas características de longitud. Presenta los mismos niveles de elevación mostrados en la Figura 2.10 y Figura 2.11.

Adicionalmente, se muestra la línea de transmisión a doble circuito con un nivel de voltaje de 138 KV que enlaza las subestaciones Pomasqui en Pichincha y Chachimbiro en Imbabura, tiene una longitud de

aproximadamente 74 Km. Presenta una zona crítica con respecto a la variación de pendiente la cual es mostrada a continuación.

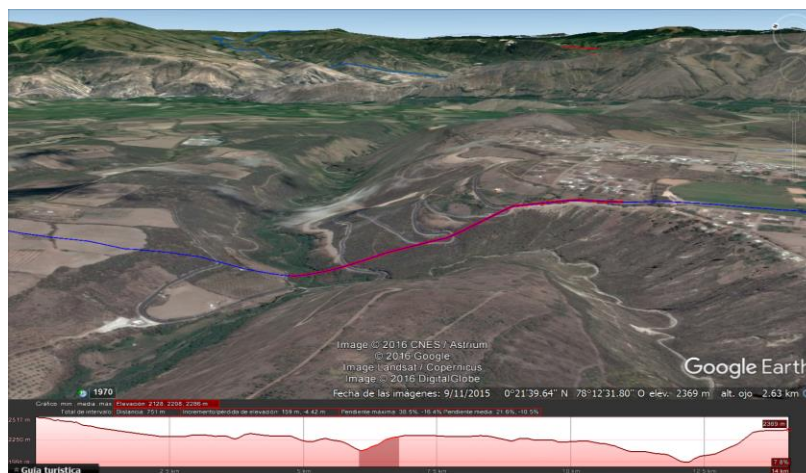


Figura 2.13: Perfil de elevación 3 L/T Chachimbiro – Pomasqui.

En la Figura 2.13 se muestra la zona crítica que presenta mayor pendiente, con un valor de 38,5%, con un su incremento de elevación aproximadamente 160 metros y con una longitud de aproximadamente 750 metros.

2.6.2. Dimensionamiento de torres.

Dado que el nivel de voltaje aplicado en el sistema creado para la transmisión de energía eléctrica es 138 KV, se toma como referencia el dimensionamiento de la torre con características similares a las torres circuito doble de la línea de transmisión que va de la S/E Salitral a la S/E Pascuales, la cual presenta una altura de 36,4 metros tal como se muestra en la Figura 2.14.

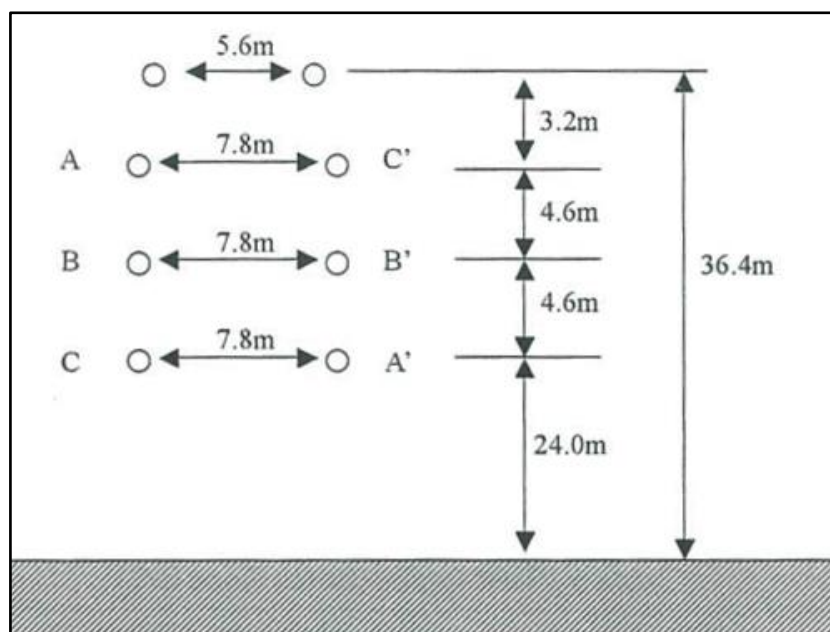


Figura 2.14: Disposición geométrica de conductores para la L/T.

Se debe considerar doble cable de guarda debido a que el nivel isocerámico en la zona de Ibarra es de 10, lo cual indica que existe la probabilidad de que caigan 10 rayos al año en esta zona.

La estructura metálica de las torres estará aterrizada en su base. El diseño de la estructura de la torre se muestra en el Anexo A.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS, SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS Y EQUIPOS.

3.1. Análisis y selección de tubería de vapor.

La eficiencia en las plantas geotérmicas es baja, alrededor del 18% para temperaturas superiores a 200°C, y esta se reduce a medida que el agua se convierte en vapor. Para evitar esto, es necesario el flujo de grandes masas y un incremento en el caudal, este último relacionado directamente con la velocidad provoca una caída de presión.

Para mantener la eficiencia y evitar que se reduzca la presión del fluido, se requiere reducir la velocidad. Esto es posible con revestimientos y tuberías de gran diámetro.

Este aumento en el diámetro de la tubería permite el paso de grandes masas, lo que resulta en la reducción de la velocidad del fluido para obtener el volumen requerido. Un beneficio añadido al reducir la velocidad es la reducción de ruido.

En síntesis, mientras mayor sea el diámetro menor será la caída de presión en la tubería. Lo cual es corroborado por la ecuación de pérdida de presión:

$$\Delta P = 0.8 \frac{Lm^{1.85}}{\rho D^{4.97}} \quad (3.1)$$

Donde:

L es el largo de la tubería (ft)

M es el flujo de masa (lbm/s)

ρ es la densidad (lbm/ft³)

D es el diámetro interno de la tubería (in)

Aunque es más beneficioso usar tuberías de gran diámetro, porque minimiza la caída de presión e incrementa la eficiencia térmica, resulta ser más costoso en cuanto a la perforación de los pozos productores. Por esto se considera un pozo con un diámetro de tubería de 9 5/8", y una tubería ranurada de 7" o 7 5/8" de

diámetro en una sección abierta de 12 ¼" de diámetro. La Figura 3.1 muestra con mayor detalle las características del pozo de perforación y la tubería de vapor.

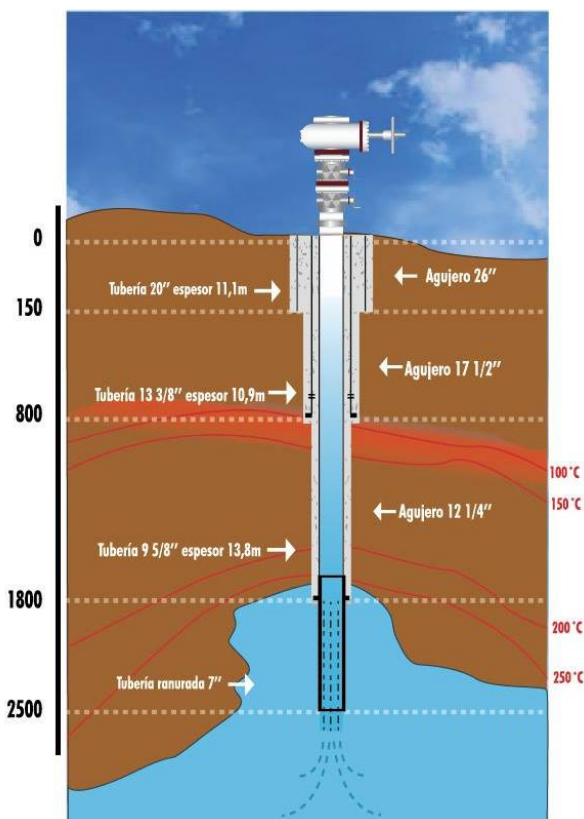


Figura 3.1: Perforación de pozo y tubería de vapor.

La cementación del revestimiento debe ser uniforme para evitar la concentración de tensión térmica (puntos de mayor calor). Las perforaciones de los pozos productores deberán ser orientado en diferentes direcciones para cubrir mayor volumen del reservorio que se encuentra a aproximadamente 1800 metros por debajo de la superficie.

Las tuberías que transportan el fluido desde las cabezas de pozo a las turbinas en la central eléctrica deberán ser lo más cortas posibles para evitar pérdida de temperatura y presión.

De acuerdo a DiPippo, una planta de energía Single-Flash de 30 MW requiere de 5 a 6 pozos de producción y de 2 a 3 pozos de inyección, es decir cada pozo de producción tiene una productividad promedio de 5 MW (ecuación 3.2).

$$\text{Número de pozos productores} = \frac{\text{Potencia a instalar}}{\text{Potencia por pozo}} \quad (3.2)$$

$$\text{Número de pozos productores} = \frac{30 \text{ MW}}{5 \text{ MW}} = 6 \text{ pozos}$$

$$\text{Número de pozos productores} = \frac{50 \text{ MW}}{5 \text{ MW}} = 10 \text{ pozos}$$

Además, se estima que 2 de 3 perforaciones serán pozos productores, es decir una probabilidad del 66% (ecuación 3.3).

$$\text{Número de pozos a perforar} = \frac{\text{Número de pozo productor}}{0,66} \quad (3.3)$$

$$\text{Número de pozos a perforar} = \frac{6}{0,66} \approx 10 \text{ perforaciones}$$

$$\text{Número de pozos a perforar} = \frac{10}{0,66} \approx 16 \text{ perforaciones}$$

Considerando la información expuesta, para el sistema creado inicialmente, con una potencia instalada de 30 MW se dispondrán de 6 perforaciones de pozos productores y 3 pozos de inyección, mientras que para una ampliación futura de 20 MW, se dispondrá de 4 perforaciones de pozos productores y 1 pozo de inyección adicionales.

3.2. Selección del sistema de inyección de salmuera.

Para inyectar la salmuera junto con los gases no condensables se implementa un sistema de inyección tipo cerrado, puesto que resulta ser el más adecuado para el diseño creado, porque consta de una tubería que conserva la temperatura de la salmuera antes de ser inyectada al reservorio. Esto permite que la energía térmica invertida y el tiempo de recuperación del fluido sean menores al trasladar el fluido de la zona de inyección hacia la zona de extracción. De esta manera, se completa el ciclo geotérmico de modo eficiente sin afectar al medio ambiente.

Al ser un sistema cerrado es necesario contar con un control de nivel que impida que el separador se sature de salmuera por variaciones de presión en la tubería de reinyección, este control se encargará de regular el nivel de agua y en caso de sobrepasar el nivel crítico liberarla al exterior.

3.3. Selección de Turbina-Generador SST-400 GEO (10MW).

La turbina desempeña un gran papel en cuanto a la eficiencia de la generación eléctrica, es por esto que se debe elegir el equipo con mejor desempeño.

La turbina recomendada es de marca Siemens modelo SST-400GEO SIZE 1 Steam Turbine. Soporta temperaturas de hasta 250°C y una presión de hasta 12bar, cubriendo las características necesarias en la zona de Chachimbiro especificadas en la Tabla 5. Esta turbina está acoplada al generador de tal manera que pueden ser intercambiados ambos elementos con otros de mayor capacidad según lo que requiera el usuario. En la Figura 3.2 se muestra las dimensiones del sistema acoplado turbina-generador.

En la turbina los álabes deben ser de un material especial para resistir los residuos de salmuera que se escapan del separador y que pueden afectar la vida útil de la misma. El material más utilizado para este tipo de procesos es acero cromado al 12%, que evita la corrosión de los alabes de la turbina.

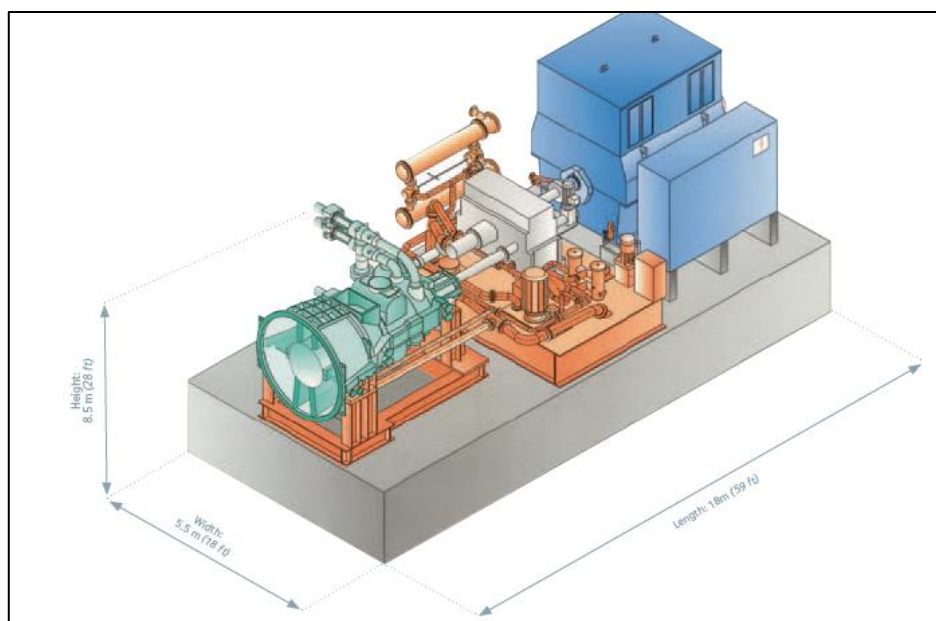


Figura 3.2: Diseño de turbina Siemens SST-400 GEO size 1.

La capacidad de generación de 10 MW hasta 15 MW es el rango potencia requerido por cada módulo de generación. En primera instancia se usarán 3 turbinas de esta capacidad con el fin de llegar a los 30 MW iniciales del proyecto.

Luego se considera la ampliación con dos turbinas adicionales teniendo un total de 50 MW. Las características completas de la turbina recomendada se encuentran en el Anexo B.

3.4. Diseño de la línea de transmisión.

En base a lo analizado en el Capítulo 2, se concluye que la alternativa 1 representa la mejor opción, debido a lo siguiente:

- La S/E Ibarra tiene una bahía con espacio necesario para la llegada de la línea de transmisión desde Chachimbiro.
- La trayectoria recorrida por la línea de transmisión es la mitad y a circuito simple representa la cuarta parte de la longitud del conductor.
- Al ser circuito simple se ocupa solo un extremo de la estructura de la torre dejando libre el otro extremo para una futura ampliación o crecimiento de la central geotérmica.

Debido a las amenazas naturales en el cantón San Miguel de Urcuquí, se optó por bordear la ciudad y asentar las bases de la estructura de la torre en zonas en las que presenta vegetación permanente para eludir áreas inestables, lo que significa un menor riesgo de deslizamientos. Es por ello que se modificó la ruta de la alternativa 1 en las cercanías de este sitio como se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Perfil de elevación, L/T Chachimbiro – Ibarra.

En la llegada a la S/E Ibarra se optó por seguir una trayectoria paralela a la línea de transmisión Pomasqui-Ibarra, debido a que esa área ya cuenta con los

permisos necesarios. Por lo anterior mencionado, la ruta seleccionada se muestra a continuación en la Figura 3.4.



Figura 3.4: Recorrido de la nueva línea de transmisión con interconexión al SNI.

3.4.1. Selección del conductor.

A un nivel de voltaje de 138 KV con un factor de potencia de 0,9 la corriente nominal para la carga de 30 MW es 140 A y para la de 50 MW una corriente de 233 A. Para evitar daños en el aislamiento por calentamiento se considera que el conductor debe operar hasta el 80% de su capacidad nominal.

Acorde con estas corrientes se procede a seleccionar la mejor alternativa entre los conductores ACSR, debido a que estos presentan alta resistencia mecánica, lo cual permitiría tener vanos más largos reduciendo el número de torres, aisladores y demás accesorios.

El conductor 266,8 MCM, posee una capacidad nominal de 401 A y consta en la lista de los conductores más usados a este nivel de voltaje. Existe en el mercado dos modelos de este conductor, el Waxwing que consta de 1 núcleo de acero reforzado y 18 hilos de aluminio, y el Partridge que consta de 7 hilos de acero reforzado y 28 hilos de aluminio.

Por la irregularidad del terreno el conductor 266,8 MCM con código Partridge es la mejor opción, porque presenta un núcleo variable que

agrega mayor dureza y una tensión de ruptura más elevada sin perjudicar la corriente máxima que soporta el conductor.

Al analizar la caída de tensión en la línea de transmisión con longitud de 15 kilómetros empleando este conductor, se obtiene que representa aproximadamente el 1% del voltaje nominal, constando dentro de los límites estipulados en la norma IEEE Std. 519-1992 en la que indica que no debe sobrepasar del 2,5% del voltaje nominal. Además, se prevé una pérdida de potencia de 5,2%, mientras que con un conductor de mayor calibre 300 MCM una pérdida de 4,6%, presentando una variación poco significativa que no perjudica a la selección del conductor. Por otro lado, al ser más costoso éste último conductor se selecciona el 266,8 MCM como la mejor alternativa.

Cabe recalcar que este conductor está sobredimensionado para 30 MW, pero cubre la capacidad de 50 MW en su totalidad, reduciendo el número de ternas y liberando un extremo en la estructura de la torre. Es por esto que se decide diseñar la línea de transmisión con conductor 266,8 MCM Partridge a circuito simple, considerando la ampliación proyectada en 50 MW a futuro.

3.5. Simulación del sistema de potencia y afectación en el Sistema Nacional Interconectado (SNI).

Con la finalidad de analizar la afectación en el Sistema Nacional Interconectado, se introdujo la planta de generación geotérmica Chachimbiro utilizando el software MATLAB, con ayuda de la librería denominada PSAT.

El sistema fue simulado usando las características de los equipos detallados anteriormente como el generador, el transformador, las barras de 13,8 KV y 138 KV y la línea de transmisión conectada a la barra de 138 KV de la subestación Ibarra.

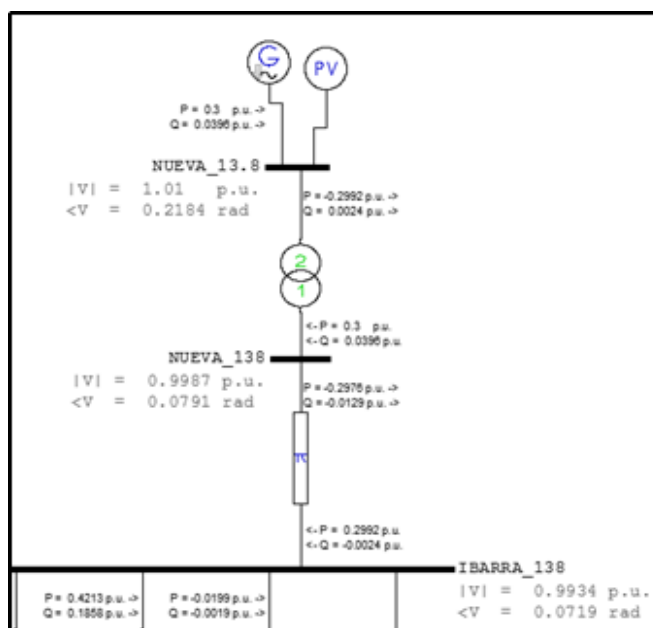


Figura 3.5: Diagrama unifilar de la planta geotérmica Chachimbiro conectada al SNI en la barra de 138 KV S/E Ibarra.

Para la simulación se realizó un diagrama unifilar que represente los generadores y transformadores (en la etapa de 30 MW y 50 MW) con sus valores respectivos de impedancia y capacidades nominales; y la línea de transmisión con sus respectivos parámetros de impedancia de acuerdo al conductor seleccionado. En cuanto a la simulación del generador se utilizó un modelo dinámico de la librería del software PSAT, escogiendo el modelo sincrónico número 6 porque se adapta a las características de las unidades geotérmicas. Para ejecutar la simulación se necesita el elemento llamado PV que permite ajustar la potencia y el voltaje del generador en la barra como se muestra en la Figura 3.5.

Los parámetros ingresados en el software PSAT en cuanto al generador se muestran en la Figura 3.6, los parámetros del transformador se muestran en la Figura 3.7 y los parámetros que corresponden a la línea de transmisión se muestran en la Figura 3.8:

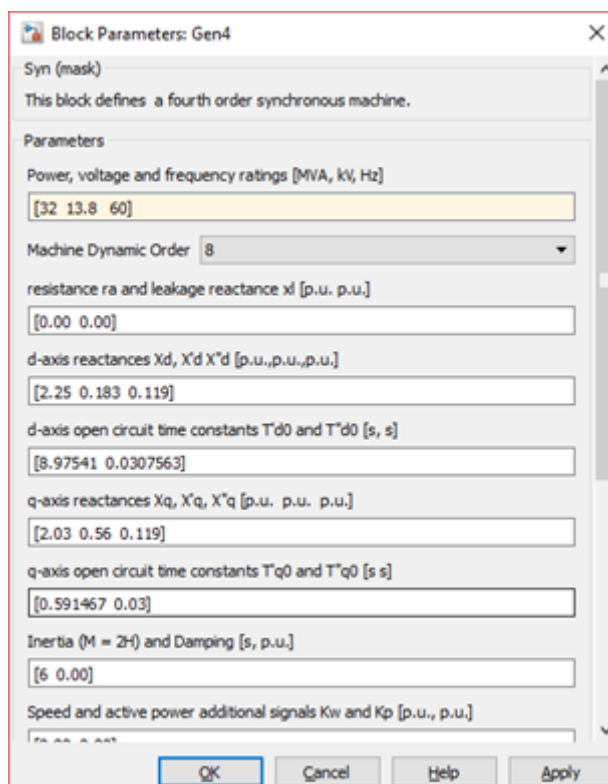


Figura 3.6: Parámetros del generador, modelo 6, librería PSAT.

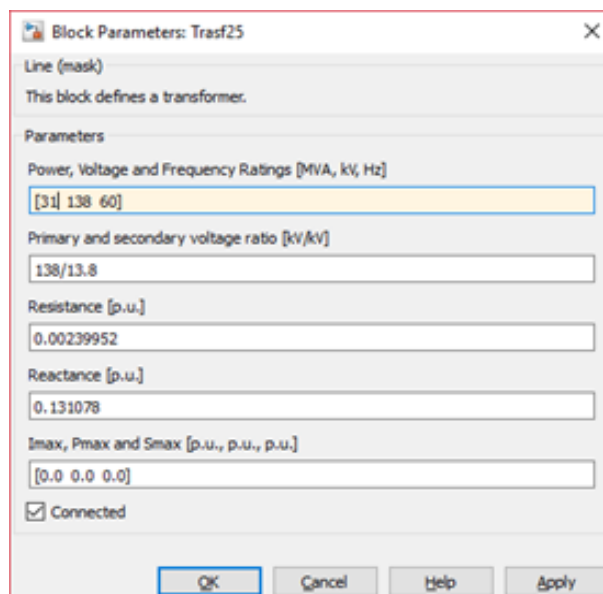


Figura 3.7: Parámetros del transformador de potencia.

Figura 3.8: Parámetros de la línea de transmisión.

El flujo de potencia, antes del ingreso de la planta geotérmica Chachimbiro, presenta que el voltaje en la barra en Ibarra es de 0,9872 p.u. (Tabla 8), es decir 136,23 KV. Mientras que con la entrada de la central geotérmica éste aumenta a 0,9941 p.u. (Tabla 9) representando un incremento favorable a 137,09 KV. De esta manera se mejora el nivel de voltaje en la barra de la S/E Ibarra.

Además, se analizó la afectación del sistema en las barras de Pomasqui (138 KV), Tulcán (138 KV) y la barra de 34,5 KV de generación en la S/E Ibarra, obteniendo los siguientes valores de voltaje en por unidad:

Subestación	Pomasqui (138KV)	Tulcán (138KV)	Ibarra (138KV)	Ibarra (34,5KV)
Voltaje p.u.	0,99002	0,9990	0,9872	0.9934

Tabla 8: Voltajes en p.u. sin planta de generación Chachimbiro.

Subestación	Pomasqui (138KV)	Tulcán (138KV)	Ibarra (138KV)	Ibarra (34,5KV)	Chachimbiro (138KV)
GENERACION A 30MW					
Voltaje p.u.	0,99023	1,0255	0,99356	0,99522	1,0032
GENERACION A 50MW					
Voltaje p.u.	0,99405	1,0455	0,99371	0,99545	1,0450

Tabla 9: Voltajes en p.u. con la planta de generación Chachimbiro.

En la Tabla 9 se observa el beneficio obtenido con la entrada de la planta geotérmica Chachimbiro al SNI. Mejora el nivel de voltajes en las barras aledañas. El impacto que causa dentro del SNI es favorable, debido a que reduce la caída de tensión en las barras, presentado valores de voltaje dentro del límite establecido por el CONELEC ($\pm 5\%$ voltaje nominal).

Subestación	Pomasqui (138KV)	Tulcán (138KV)	Ibarra (138KV)	Ibarra (34,5KV)	Chachimbiro (138KV)
GENERACION A 30MW					
Voltaje p.u.	0,99023	1,0255	0,99356	0,99522	1,0032
GENERACION A 50MW					
Voltaje p.u.	0,99405	1,0455	0,99371	0,99545	1,0450

Tabla 10: Cargas de subestaciones importantes para el análisis del ingreso de la planta geotérmica Chachimbiro al SNI.

Se analiza la Tabla 10, la que infiere que la planta geotérmica Chachimbiro cubre la carga de la S/E Tulcán en su totalidad y una fracción de la carga de la S/E Ibarra, que depende de la capacidad de generación de la planta (30 MW o 50 MW).

Por la reducción de corriente en la barra de Pomasqui se disminuyen las pérdidas, mejorando el voltaje en esta barra. Además, con el ingreso de la planta geotérmica Chachimbiro como barra de generación mejora el voltaje tanto en la barra de Ibarra como en la barra de Tulcán. En el Anexo C se muestran las gráficas de voltajes y corrientes obtenidas con la entrada de la planta Chachimbiro.

3.6. Coordinación de protecciones y selección de Relés de protección.

Para la coordinación de protecciones se utilizarán los criterios de las normas ANSI e IEEE, con la finalidad de cumplir con los estándares para fijar correctamente los ajustes de las protecciones a implementar. En el Anexo D se detallan las características de los relés que se escogieron en el siguiente desarrollo.

3.6.1. Protección de generador.

Para la protección del generador se recomienda el relé numérico de marca SEL-300G (Generator Relay), el cual cumple con los estándares de protección de turbinas IEEE 115.

Se hará énfasis en las protecciones más importantes analizadas a continuación:

Configuración de protección diferencial (ANSI 87):

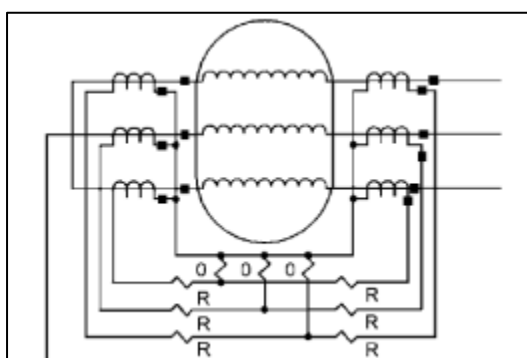


Figura 3.9: Conexión del relé diferencial porcentual.

Para proteger los bobinados del estator en el generador contra fallas de cortocircuito, se requiere de la protección diferencial (ANSI 87) como se muestra en la Figura 3.9. El valor de ajuste recomendado por la norma IEEE C37.102, fija una corriente de pick up mínima de 0,2 [A] con un SLOPE de 10%.

En el caso del generador acoplado a la turbina SST-400 GEO se tiene acceso al neutro del generador, por lo que se realiza una conexión sólidamente aterrizada.

En presencia de una falla, las corrientes que circulan por las resistencias de restricción serán distintas, produciendo una diferencia de corrientes que se dirige a la resistencia de operación. Cuando la relación la corriente de operación y restricción sea superior al Slope ajustado el relé actuará.

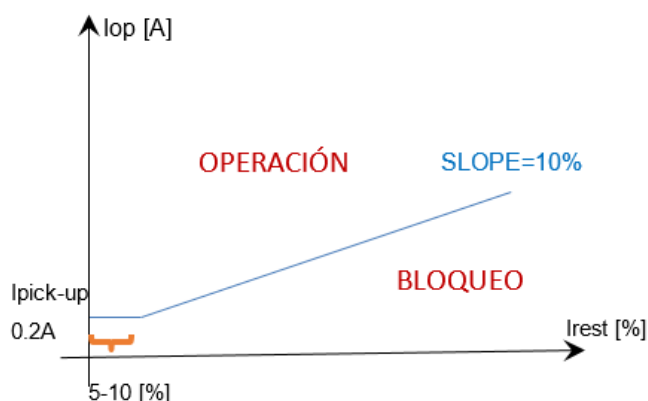


Figura 3.10: Gráfico de configuración de protección diferencial de generador.

El SLOPE del error que presente en los núcleos de protección de los transformadores de corriente. Este valor es del 5% para TC, dando como resultado un error esperado máximo del 10%, por lo tanto, el Slope se fija en 10%. Ver Figura 3.10

3.6.2. Protección de transformadores.

Para la protección del transformador se recomienda utilizar el relé SEL-787-3E/-3S/-4X. Este equipo está diseñado para proteger y supervisar la mayoría de transformadores y terminales de tres y cuatro bobinados.

Configuración de protección diferencial (ANSI 87T).

Para el ajuste de la protección diferencial según las normas IEEE Std. C37.91.2000 para protección de transformadores, es necesario utilizar el TAP del transformador (25%) con el fin de obtener el valor de la corriente de pick-up mínima que debe percibir el relé para su actuación (ecuación 3.4):

$$I_{PICK-UP} = 0,3 \times TAP \quad (3.4)$$

$$I_{PICK-UP} = 0,3 \times (2,5) = 0,75A$$

Para obtener el Slope de la protección diferencial se necesita calcular el porcentaje de error total esperado por los equipos de instrumentación

(TC'S), junto con el error de conmutación del TAP del transformador (10%).

Adicional a esto, se debe tomar en cuenta el error de seguridad según la norma IEEE Std. C37.91.2000 (5%). Este error se usa en la protección de transformadores porque al energizar este equipo se produce una corriente de magnetización que se aproxima al valor de una corriente de falla. Ante este acontecimiento el relé debe ser selectivo y no permitir la actuación del disyuntor. Por este motivo, se suma el porcentaje de seguridad al cálculo final del Slope para el ajuste de la protección diferencial (ecuación 3.5).

$$\text{SLOPE} = 10\% (\text{Error de exactitud TC's}) + 10\% (\text{Error de conmutación}) + 5\% (\text{Error de seguridad}) = 25\%. \quad (3.5)$$

En la Figura 3.11 se muestra la curva característica con su respectiva zona de operación y de bloqueo para el ajuste de la protección diferencial.

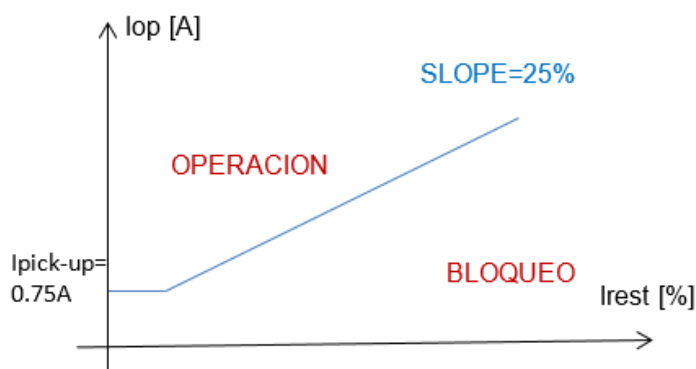


Figura 3.11: Gráfico de configuración de protección diferencial de transformador.

Protección sobrecorriente (ANSI 50/51).

Según la norma IEEE Std. C57.12.20-1998, para el ajuste correcto de la protección de sobrecorriente, se debe seleccionar de acuerdo a la potencia del transformador el tipo de curva de protección que se ajuste al criterio de selectividad:

Categoría	Potencia monofasica (KVA)	Potencia trifasica (KVA)
I	5 a 500	15 a 500
II	501 a 1667	501 a 5000
III	1668 a 10000	5001 a 30000
IV	superior 10000	superior 30000

Tabla 11: Criterio de categoría para ajuste de protección de sobrecorriente transformadores.

Se escoge el tipo de curva de la categoría IV de potencia trifásica (Tabla 11), porque el transformador tiene una capacidad superior a 30 MVA. Ver Figura 3.12.

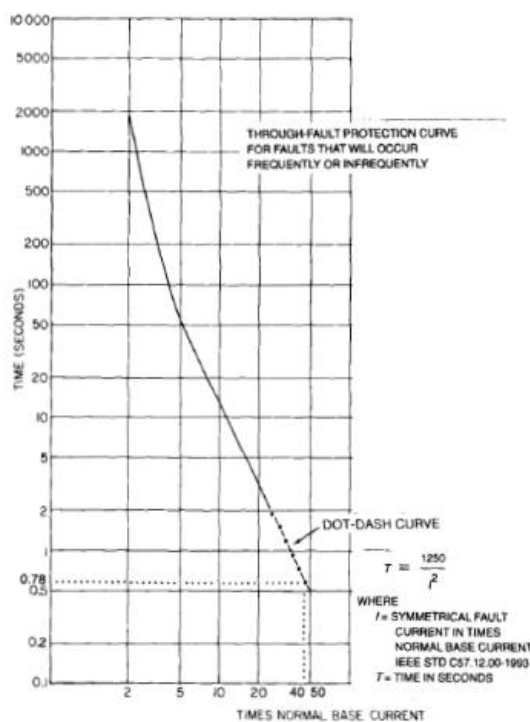


Figura 3.12: Curva de protección característica categoría IV para protección de transformador.

En la Figura 3.13 se aprecia la curva de selectividad de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) para el transformador de la S/E Chachimbiro:

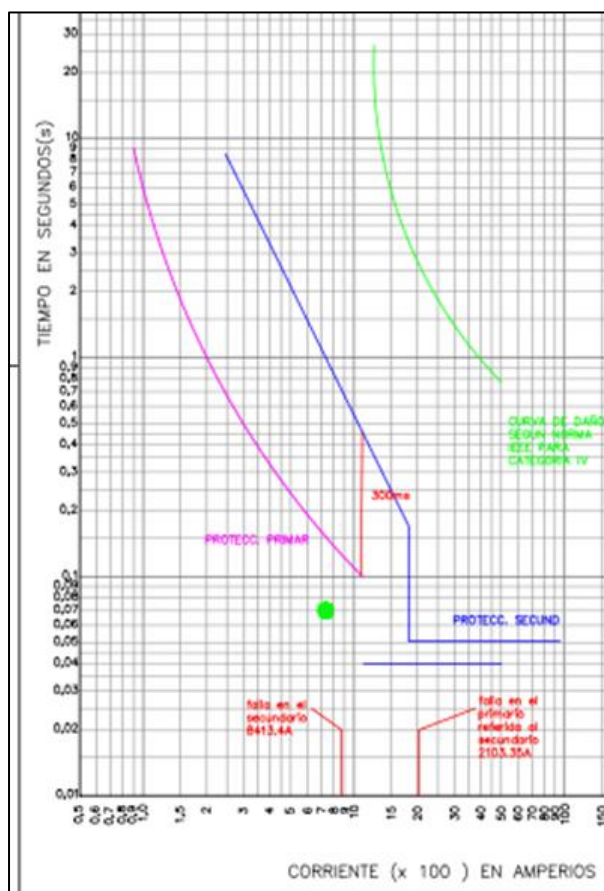


Figura 3.13: Curva de selectividad para protección de transformador por sobrecorriente (50/51).

3.6.3. Protección de barras en la subestación.

Para la configuración de protección de barra se muestra en este proyecto el ajuste de la protección diferencial, que es la primera línea de defensa ante una falla en las barras de un sistema de potencia.

Con la finalidad de obtener los mejores resultados de selectividad, rapidez y confiabilidad, se recomienda utilizar el relé SEL-387. Este relé proporciona protección, control y medición para transformadores, barras, interruptores y alimentadores. Las características incluyen cuatro entradas trifásicas de corriente con protección diferencial independiente y restringida. Adicional a la característica diferencial este relé también posee el ajuste de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51).

En vista de la interconexión al SNI de la planta Chachimbiro, es necesario reajustar la configuración diferencial existente en la barra de la S/E Ibarra. El ingreso de una nueva línea debe ser considerado en el sistema de coordinación de protecciones de la S/E de llegada (S/E Ibarra), para que ante la presencia de una falla esta sea despejada sin inconvenientes.

El esquema general para el ajuste de la protección ANSI 87 en las barras se muestra a continuación en la Figura 3.14:

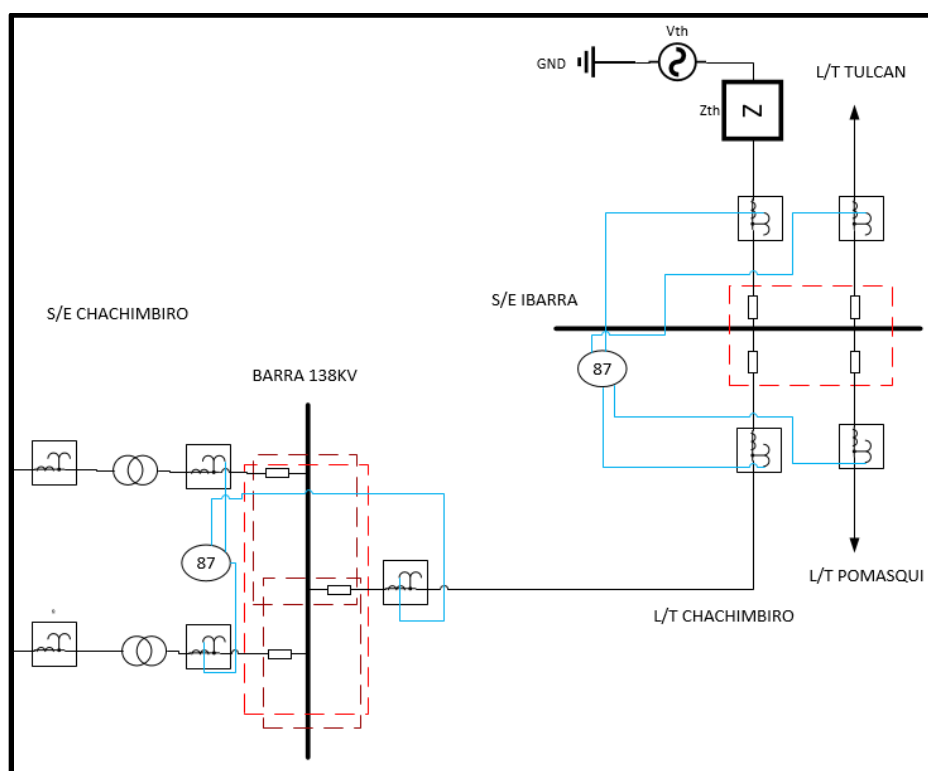


Figura 3.14: Esquema para el ajuste de la protección diferencial en las barras de las S/E Chachimbiro e Ibarra.

Configuración para barra de 138 KV – Chachimbiro.

Para el ajuste de la protección diferencial de barra 138 KV en la subestación de la planta Chachimbiro se recomienda una corriente mínima de operación ($I_{op\min}$) de 0,2 A.

Para obtener el Slope de la protección diferencial se necesita calcular el porcentaje de error total esperado por los equipos de instrumentación (TC'S) que es de 5% por cada uno de ellos (ecuación 3.6).

$$I_{pick-up} = I_{opmín} = 0,2 \text{ A} \quad (3.6)$$

$$SLOPE = \text{Error de TC'S de (15\%)} = 15\%$$

El esquema general para el ajuste de la protección en la barra de 138 KV en Chachimbiro se muestra en la Figura 3.15, junto con la curva característica del ajuste de la protección diferencial de barra.

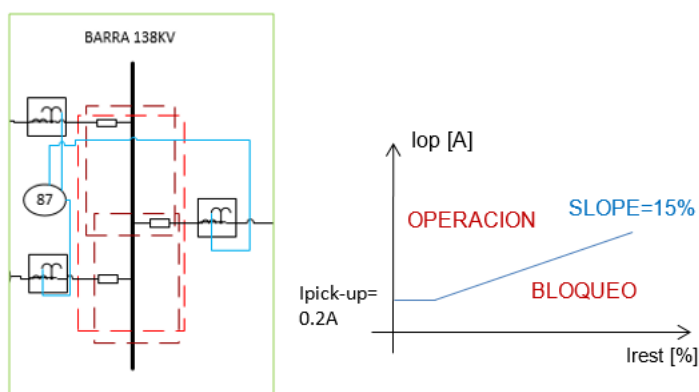


Figura 3.15: Configuración para barra de 138 KV Chachimbiro.

Configuración para barra de 138 KV – Ibarra.

Debido a que no se conoce la configuración de los ajustes de las protecciones en la subestación de Ibarra se recomienda el ajuste de la corriente mínima de operación ($I_{opmín}$) en 0,25 A.

Para obtener el Slope de la protección diferencial se necesita calcular el porcentaje de error total esperado por los equipos de instrumentación (TC'S) que es de 5% por cada uno de ellos (ecuación 3.7).

$$I_{pick-up} = I_{opmín} = 0,25 \text{ A} \quad (3.7)$$

$$SLOPE = \text{Error de TC'S de (20\%)} = 20\%$$

El esquema general para el ajuste de la protección en la barra de 138 KV en Ibarra se muestra en la Figura 3.16, junto con la curva característica del ajuste de la protección diferencial de barra.

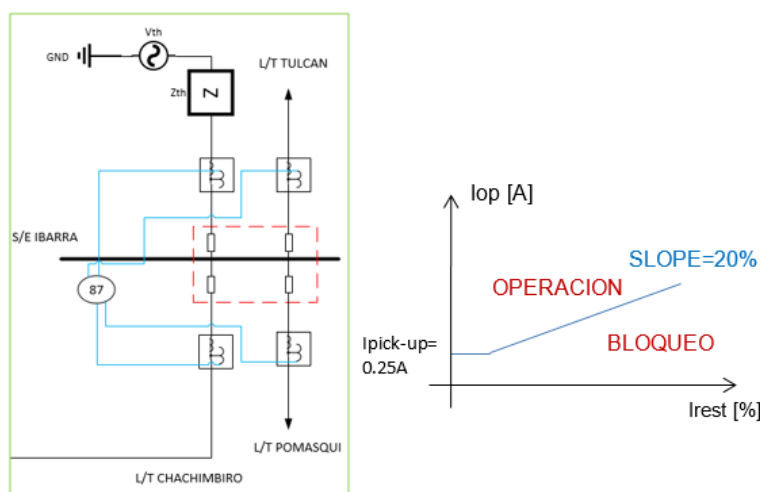


Figura 3.16: Configuración para barra de 138 KV Ibarra.

3.6.4. Protección de líneas de transmisión.

Al ser una línea corta, se ajusta la función de sobrecorriente (ANSI 50/51) en lugar de la protección direccional (ANSI 67). Para la protección de la línea de transmisión se recomienda el uso del relé SEL 311C, que tiene la posibilidad de la configuración de protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) y distancia (ANSI 21). La protección de distancia debe ajustarse para diferentes porcentajes de la línea de transmisión, 80%, 120% y 150%. En el 120% y 150% se utiliza el porcentaje excedente de la siguiente línea, es decir 20% y 50% de la línea adyacente eléctricamente más larga.

Configuración de la protección de distancia (ANSI 21).

Para el ajuste de la protección de distancia se necesita calcular la impedancia de la línea en los tres porcentajes anteriormente mencionados. Para obtener los porcentajes (20% y 50%) de la línea adyacente, se debe seleccionar las impedancias de las líneas conectadas a la barra de la S/E Ibarra, puesto que para la coordinación de línea se usará el método impedancia. Los valores de impedancia se muestran en la Tabla 12:

Línea	Rresistencia R[Ω]	Reactancia jX _L [Ω]
Chachimbiro	0,1748	0,0429
Pomasqui	0,001575	0,00786
Tulcan	0,053	0,19428

Tabla 12: Impedancias de L/T conectadas a la subestación Ibarra.

En la Tabla 12 se puede notar que la línea eléctricamente más larga es Tulcán, debido a que solo consta de una terna a circuito simple.

En cuanto a la coordinación de protecciones se tienen dos casos; la línea vista desde la S/E Chachimbiro en dirección a la S/E Ibarra y la línea vista desde la S/E Ibarra en dirección a la S/E Chachimbiro. Lo segundo podría incluir porcentajes de impedancia del transformador y del generador.

Los resultados de los cálculos de estas impedancias se muestran en la Tabla 13:

IMPEDANCIA DE LA LINEA DESDE CHACHIMBIRO EN DIRECCION A IBARRA			
Porcentaje[%]	80%	120%	150%
Z[Ω]	0.144<13.78	0.1673<25.98	0.2120<38.32
IMPEDANCIA DE LA LINEA DESDE IBARRA EN DIRECCION A CHACHIMBIRO			
Porcentaje[%]	80%	120%	150%
Z[Ω]	0.144<13.78	0.2159<13.78	0.2699<13.8

Tabla 13: Impedancias resultantes según el cálculo porcentual.

Para el siguiente caso al calcular el 120% de impedancia de la línea, se alcanza a cubrir el 72,1% de la impedancia del transformador, mientras que al calcular el 150% de la impedancia de la línea, se logra proteger hasta un 11,3% de la impedancia del generador. Significa entonces que el relé recomendado, podría proteger el generador de Chachimbiro ante una falla (vista desde la S/E Ibarra).

El esquema completo para la protección de distancia vista desde la S/E Chachimbiro, mostrando las zonas de alcance que cubre relé de protección, tanto en el esquema unifilar, Figura 3.17, como el diagrama característico, Figura 3.18.

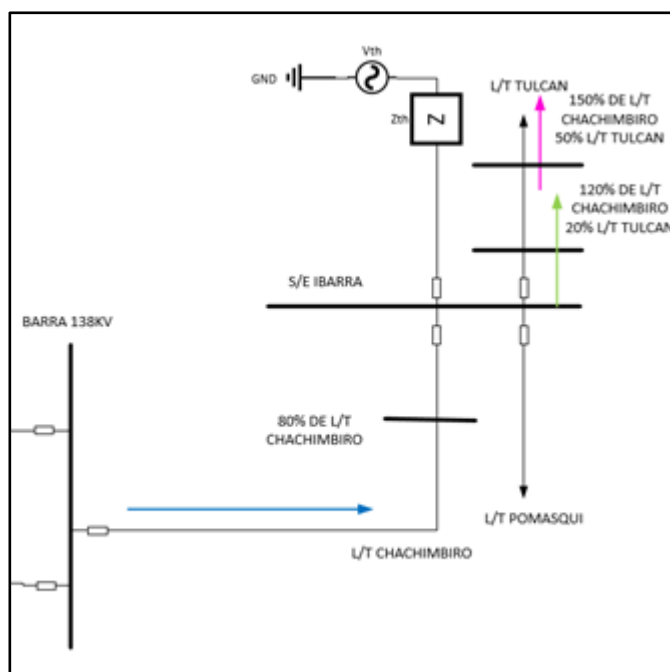


Figura 3.17: Esquema de ajuste de protección de distancia vista desde S/E Chachimbiro.

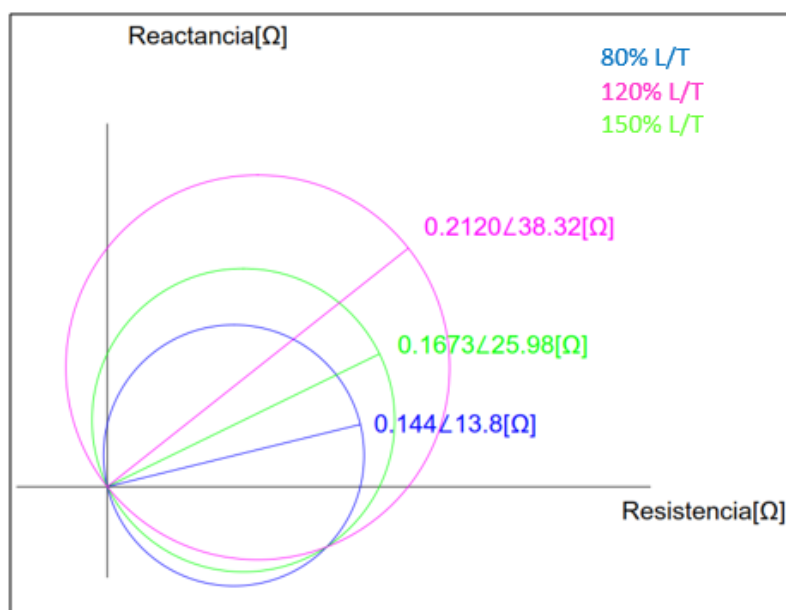


Figura 3.18: Diagrama de porcentajes de impedancias.

El esquema completo para la protección de distancia vista desde la S/E Ibarra, mostrando las zonas de alcance que cubre relé de protección,

tanto en el esquema unifilar, Figura 3.19, como el diagrama característico, Figura 3.20.

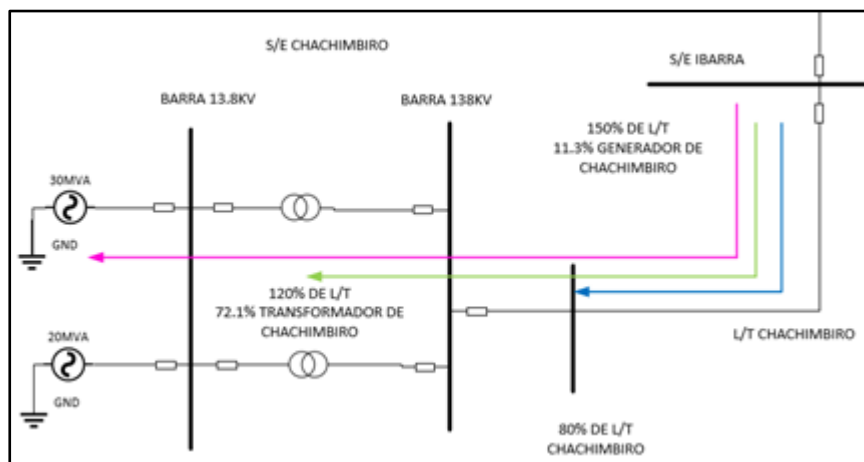


Figura 3.19: Esquema de ajuste de protección de distancia vista desde S/E Ibarra.

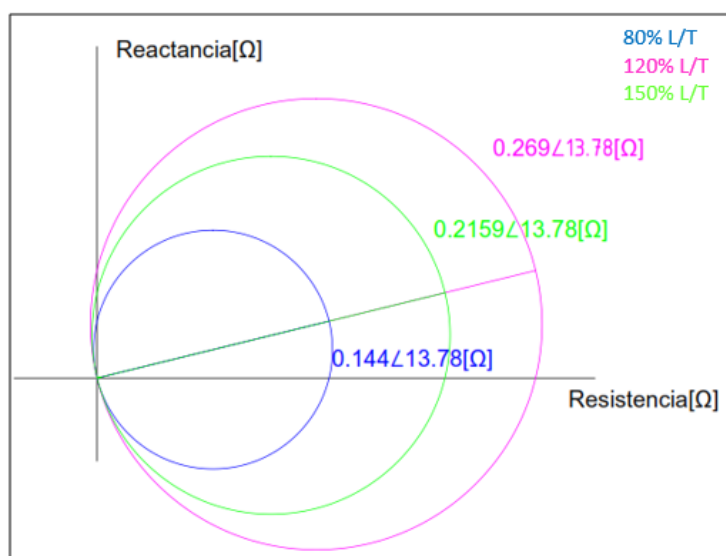


Figura 3.20: Diagrama de porcentajes de impedancias.

Configuración de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51).

Para el ajuste de la protección por sobrecorrientes se deben realizar dos análisis de falla. Una falla trifásica a máxima generación al 80% de la línea de transmisión de Chachimbi, cuya corriente indicará el ajuste de la protección instantánea (ANSI 50) y una falla bifásica a mínima generación

al 120% de la línea que permitirá con el ajuste anterior fijar el TAP de la protección temporizada como se muestra en la siguiente fórmula (3.8):

$$\frac{I_{cargamax}}{RTC} < TAP < \frac{I_{cc2\phi min}}{RTC} \quad (3.8)$$

Los valores de luego del análisis de falla trifásica y bifásica se muestran en la Tabla 14:

Corriente de falla	Capacidad de generación		
	10 MW	30MW	50MW
Trifásica [A]	369	1107,45	1845,742
Bifásica [A]	319,63	959,084	1598,458

Tabla 14: Resultados de cálculos de cortocircuito.

Con los cálculos obtenidos el ajuste de la protección instantánea se recomienda fijar con una corriente mínima de 1800 A, mientras que el TAP se recomienda fijar con una corriente aproximada de 500 A para asegurar la eficacia de la protección.

Para el retardo de tiempo de la función temporizada (ANSI 51) se necesita conocer el ajuste de retardo de tiempo para protección de distancia en la L/T hacia Tulcán. Para obedecer los parámetros de selectividad y precisión en la coordinación de las protecciones se toma un intervalo de tiempo para la coordinación (Δt) de 300 ms, mismo que está formado por el tiempo de apertura del mecanismo del interruptor, tiempo de extinción del arco, tiempo de inercia y un margen de seguridad. Ver Figura 3.21.

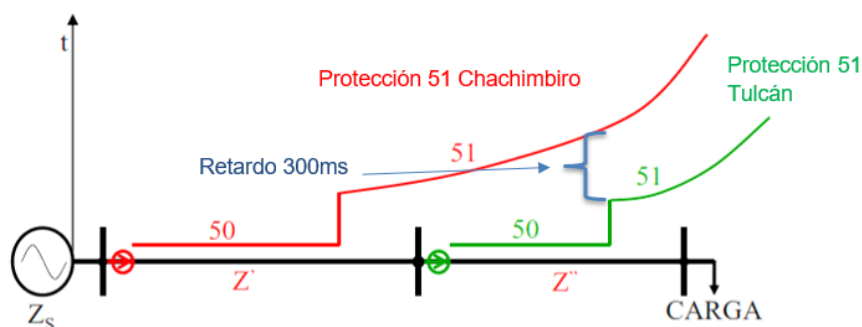


Figura 3.21: Esquema para el ajuste de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) de la L/T de Chachimbiro.

Para el ajuste de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) de la L/T de Chachimbiro se utilizó el esquema mostrado en la Figura 3.22:

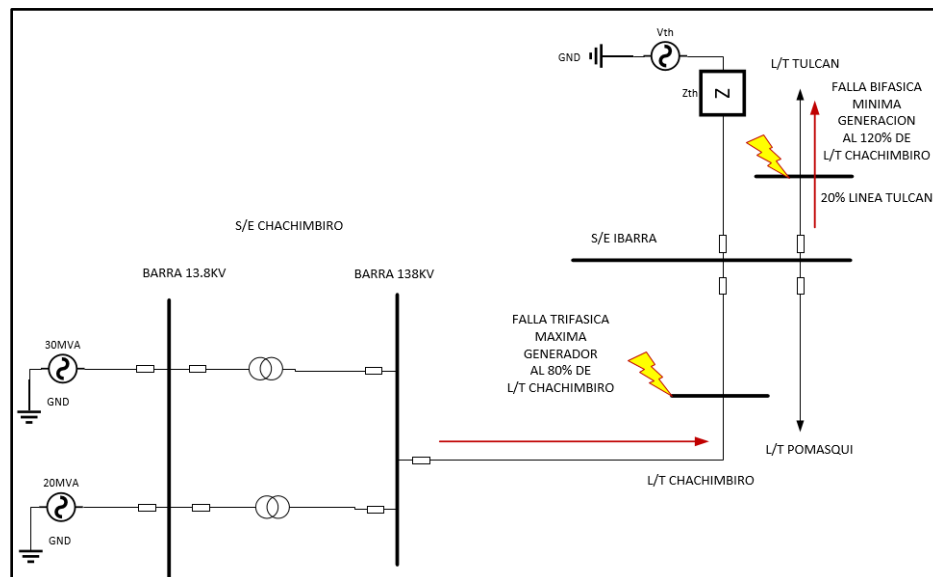


Figura 3.22: Esquema para el ajuste de la protección de sobrecorriente (ANSI 50/51) de la L/T de Chachimbiro.

3.7. Detalles de subestación eléctrica y sus esquemas.

3.7.1. Malla puesta a tierra.

La malla de puesta a tierra es diseñada de acuerdo a la normativa IEEE Std. 80-2000, para el cálculo de voltaje de paso y de toque máximos considerando un peso de 50 Kg por persona.

De acuerdo al estudio geofísico realizado en la zona, el terreno está compuesto principalmente de arcilla con una resistividad de 300 ohmios metros. Para la seguridad de los trabajadores la superficie del terreno se cubrirá con una capa de 10 centímetros de piedra chispa gruesa de 5/8" a 3/4" con una resistividad de 3000 ohmios metros, con la finalidad de aumentar la resistencia en la superficie; misma que además ayudará con el drenaje de las aguas lluvias evitando la formación de charcos.

La longitud total del conductor que conforma la malla es de 1910 metros con un largo de 110 metros y un ancho de 40 metros con cuadrículas de 5x5 metros ubicada a 1,5 metros por debajo de la superficie. El diseño

estará conformado con un cable de calibre 2/0 AWG de cobre, con varillas Copperweld de 5/8" x 8' en todos sus puntos unidos con soldadura exotérmica para evitar el calentamiento del conductor y la corrosión del mismo.

La resistencia de la malla es de 2,05 ohmios y cumple con el máximo requerido que es de 3 ohmios.

Este diseño garantiza que los voltajes de toque y paso cumplan con lo máximo permisible de acuerdo a la norma antes mencionada. Todos los detalles en cuanto a los parámetros del diseño de la malla de puesta a tierra se muestran en el Anexo E.

3.7.2. Esquema de diagrama unifilar de la subestación eléctrica Chachimbiro.

El diagrama unifilar del sistema creado está compuesto por el diseño de 5 unidades de generación. Como se explicó anteriormente se presentan dos casos de generación, 3 generadores de 10 MW que producen una potencia inicial de 30 MW y una propuesta de ampliación futura a 50 MW gracias a la entrada de 2 generadores adicionales.

En el diseño también se incluye la simbología y numeración de los demás equipos utilizados, tales como seccionadores (ANSI 89), interruptores de potencia (ANSI 52), equipos de instrumentación (TC's y TP's), pararrayos, transformadores de potencia (etapa inicial y futura ampliación) y la salida de la línea de transmisión. En el Anexo G se muestra con mayor detalle este diagrama unifilar.

3.7.3. Esquema detallado de la subestación eléctrica Chachimbiro.

El esquema completo de la subestación se detalla de izquierda a derecha. Empezando con el diseño del galpón donde se encuentran ubicadas las 5 unidades de generación. El galpón se diseñó en un espacio óptimo, con el fin de permitir la circulación al personal de supervisión y mantenimiento.

Se tienen dos cuartos, uno para los equipos de protección de las unidades de generación y otro para los equipos de control de la subestación, detallados anteriormente.

Los equipos de medición y protección, tales como los transformadores de instrumentación, disyuntores y seccionadores se encuentran detallados en este esquema. Adicionalmente se detallan los aisladores y pararrayos utilizados en el diseño de la subestación.

En el diseño se detallan las obras civiles para las bases de los equipos, caminos, canales para conductores subterráneos y estructuras metálicas o pórticos, elementos que son requeridos en la subestación.

En el Anexo G, se muestra el esquema completo de la subestación donde se puede apreciar la vista superior y lateral con las medidas específicas de los equipos y demás elementos que la conforman.

3.7.4. Esquema del sistema de protección.

Para el esquema de protección de la subestación se utilizó el diagrama unifilar integrando los relés numéricos utilizados para protección y medición de energía. Este esquema mencionado se encuentra detallado en el Anexo G.

3.7.5. Esquema de comunicación de la subestación.

Este esquema se encuentra dividido en dos partes, la primera parte muestra los equipos de protección de generación (sección superior) y la segunda parte los equipos de control para los niveles de 13,8 KV y 138 KV (sección inferior). En este diseño se usaron switches que permitan la recopilación de información, conectados entre ellos para una mayor eficiencia de comunicación. También se utilizaron elementos como un GPS para la referencia de fecha y hora en el histórico de datos, concentradores de datos que envían la información al centro de control (CENACE), HMI's que permitan la visualización de la información de todo el sistema de control y protección a los operadores. Los equipos de comunicación y monitoreo juntos con los conductores de fibra óptica

presentan redundancia, para asegurar la eficacia y seguridad del sistema ante cualquier tipo de contingencia como falla de un equipo o una línea de comunicación. Este esquema se encuentra detallado en el Anexo G.

3.8. Análisis económico de la planta geotérmica Chachimbiro.

Para implementar la central de generación geotérmica Chachimbiro, es necesario analizar el costo de los equipos, construcción de la central, operación y mantenimiento.

Existen factores fundamentales tales como la temperatura, la profundidad del reservorio, método de generación, composición del fluido geotérmico, tamaño de la central, entre otros que determinen el costo.

3.8.1. Costo de inversión.

Una aproximación en base a estudios realizados en otros países plantea, que las plantas geotérmicas cuya capacidad se encuentren dentro del rango de 50 MW a 150 MW, presentan un crecimiento en costo de forma exponencial.

Mientras el costo para una planta tipo flash de 20 MW a 50 MW varía entre 2100 \$/KW a 2600 \$/KW.

El costo de inversión es modelado por la ecuación 3.9:

$$CI = 2500e^{0,0025(P-5)} \quad (3.9)$$

Donde:

CI, representa el capital invertido

P, es la capacidad de energía del proyecto

Por lo tanto, el costo de inversión para una planta geotérmica de 50 MW es de 2797,68 \$/KW. Mientras que, para una planta geotérmica de 30 MW se estima un costo de 2257,00 \$/KW.

A continuación, en la Tabla 15 se detalla el costo de acuerdo a las etapas de construcción:

CONCEPTO	PORCENTAJE (%)	COSTO PARA 30 MW (\$/KW)	COSTO PARA 50 MW (\$/KW)
Reconocimiento y pre factibilidad	1	22,57	27,97
Factibilidad y permisos	3	67,71	83,93
Sondeos de producción	42	947,94	1175,03
Central geotérmica e instalaciones en superficie	51	1151,07	1426,82
Línea de Transmisión	3	67,71	83,93
		2257,00	2797,68

Tabla 15: Costo de inversión de la central geotérmica Chachimbiro.

De manera que el costo de producción total para la planta geotérmica de 30 MW es de \$67'710,000 y para la de 50 MW es de \$139'884,000.

3.8.2. Costo de operación y mantenimiento.

Al igual que el costo de inversión, el costo de operación y mantenimiento presentan un crecimiento en costo de forma exponencial.

El costo de operación se ha modelado de acuerdo a la ecuación 3.10:

$$CO\&M = 2e^{-0,0025(P-5)} \quad (3.10)$$

Por lo tanto, el costo de operación y mantenimiento para la planta geotérmica de 30 MW es de 0,0187 \$/KWh y para la de 50 MW es de 0,0178 \$/KWh. Todos estos valores son variables en el tiempo, pero relativamente bajos y que de acuerdo a especialistas el tiempo de recuperación del capital generalmente es de 7 años.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los costos de inversión dependen directamente de la capacidad de generación. Debido a que existe una diferencia representativa de \$72'174,000 entre los costos de las capacidades analizadas. Resulta mejor alternativa invertir inicialmente en una central de generación con capacidad de 30 MW cuyo costo de inversión es de \$67'710.000. Por otra parte, al ser un diseño netamente modular puede incorporar generadoras de 10 MW adicionales, una vez verificada la viabilidad del recurso geotérmico. El tiempo de recuperación del capital puede reducirse hasta 6 años debido a que el país ya no dependerá del combustible fósil.

La planta geotérmica consta de equipos modulares que aumentan la confiabilidad del sistema, de manera que al salir de servicio una unidad por falla o mantenimiento, la energía eléctrica suministrada por la planta no produce mayor afectación al SNT.

Las turbinas, las tuberías de vapor y de inyección están compuestas de acero cromado al 12%, con el fin de soportar la corrosión producida por los gases no condensados, impidiendo reducir la vida útil de la planta geotérmica, estimada en 30 años. Para esto, el sistema cuenta con un separador que se encarga de separar la salmuera del vapor para reinyectarla nuevamente al reservorio.

Para evitar la exposición de los gases no condensados con el medio ambiente, la salmuera es inyectada al reservorio por medio de un sistema de inyección tipo cerrado, conservando su temperatura en todo el proceso. Esto permite tener mayor eficiencia al reducir el tiempo y la energía invertida al recuperar las características del fluido, completando el ciclo geotérmico para evitar la escasez del recurso.

La línea de transmisión Chachimbiro - Ibarra a circuito simple con conductor 266,8 MCM Partridge cumple con los límites en cuanto a pérdidas (1%) y caída de tensión (5%). Al ser circuito simple nos concede libertad en un extremo de la estructura de la torre, siendo aprovechada en un futuro para el crecimiento o construcción de una nueva central por la zona.

Mediante el análisis de flujo de potencia con la planta geotérmica Chachimbiro dentro del sistema, se observó un impacto favorable en el SNI. Presenta una mejora

de voltaje en las barras aledañas al sector porque cubre la carga conectada en la barra de Tulcán, lo cual reduce la entrega de potencia desde la barra de Pomasqui y al ser una barra de generación mejora el voltaje de la barra de Ibarra y la de Tulcán.

La planta geotérmica Chachimbiro inyecta una mínima cantidad de reactivos en su ingreso al sistema de potencia, debido a que la S/E Ibarra cuenta con dos bancos de capacitores de 6 MVAR instalados. Esto explica la buena regulación de voltaje existen en la zona.

El sistema de protecciones, al estar coordinado y ajustado según los criterios de IEEE permite tener una mayor selectividad, rapidez, confiabilidad y eficacia de las protecciones. Los relés numéricos escogidos presentan un alto grado de sensibilidad, por lo cual se garantiza la seguridad en cuanto a protección de equipos.

El sistema de comunicación considera un análisis de contingencia n-1, es decir si ocurre una falla en alguno de los equipos de comunicación o en la fibra óptica, se cuenta con un respaldo que permitirá accionar el sistema normalmente.

El sistema de control se enfoca en el control de la frecuencia de forma descentralizada, ya que este método permite retroalimentar la señal de salida de la posición de la válvula, lo que permite tener una regulación de forma precisa, reduciendo el margen de error, al aplicar criterios de eficiencia energética.

Realizar las perforaciones exploratorias en el sector, para implementar el diseño de la planta de generación geotérmica en Chachimbiro.

Realizar un análisis profundo del sistema de generación con posibilidad de cogeneración a un nivel inferior, con la finalidad de producir electricidad para los sistemas auxiliares o abastecimiento en sectores cercanos a la zona.

Plantear un estudio de generación híbrida, que utilice un recurso como el diésel o biodiésel, para aumentar la temperatura del fluido geotérmico, por ende, aumentar la producción de energía.

Plantear un sistema de comunicación por medio de un estudio de contingencia n-2, con la finalidad de obtener un mayor grado de respaldo.

Evaluar el impacto ambiental que podría ocasionar la entrada de una central geotérmica en el país, ya que existen residuos de ciertos gases, que a pesar de presentar un bajo grado de contaminación afectan al medio ambiente.

Plantear un estudio de cortocircuito con el ingreso de la planta geotérmica al SNI, analizando el comportamiento de los sistemas de generación en la cercanos a la zona, incluso con conexión a Colombia.

Realizar el análisis de contingencia en las unidades de generación, un estudio de despacho económico y costos de operación por cada MW generado por la planta geotérmica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Poveda, “Posibilidades de generación de energía en base al potencial geotérmico de la península de Santa Elena”, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador, 2013.
- [2] N. Yildirim y G. Gokcen, “Performance Analysis of Single-Flash Geothermal Power Plants: Gas Removal Systems Point of View”, Instituto de Tecnología Izmir, Izmir, Turquía, Abril, 2010.
- [3] CELEC EP, “Estudio de prefactibilidad inicial para elaborar el modelo geotérmico conceptual del proyecto Chachimbiro”, Quito, Ecuador, 2016.
- [4] A. Piedra, “Proyecto de una central de generación geotérmica en el Ecuador”, Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, noviembre, 2011.
- [6] INER, CELEC EP, “Avances en el desarrollo de la Geotermia en Ecuador”, Quito, Ecuador, abril, 2013.
- [5] C. Parra, “Situación de la geotermia Latinoamericana y el Caribe”, Taller Energía Geotérmica, OLADE, Quito, Ecuador, abril, 2013.
- [7] GeoElec, “Tecnología: Situación actual y evoluciones”, Consorcio del Proyecto GeoElec, noviembre, 2013.
- [8] G. Hiriart, “Evaluación de energía geométrica en México”, Comisión Reguladora de Energía, DF, México, mayo, 2011.
- [9] M. Trujillo y R. D’Ercole, “Amenazas, Vulnerabilidad, Capacidades y Riesgos en el Ecuador”, Institut de Recherche pour le Developpement, Quito, Ecuador, mayo, 2003.
- [10] M. Dickson y M. Fanelli, “Geothermal energy: Utilization and technology”, United Nations Educational, Paris, Francia, 2003.
- [11] R. DiPippo, “Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact”, University of Massachusetts Dartmouth, Waltham, USA, 2012.
- [12] CONELEC, “Procedimientos de despacho y operación”, Quito, Ecuador, agosto, 2000.

- [13] J. Asdrúbal y O. Castro, "Calculo de la malla de puesta a tierra de una subestación", Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, octubre, 2003.
- [14] Manual para el diseño y construcción de mallas conectadas a tierra para subestaciones y equipos, Autoridad de energía eléctrica de Puerto Rico, Puerto Rico, diciembre, 2004.
- [15] G. Hiriart, "Tecnologías de punta y costos asociados para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México", Energy Sector Management Assistance Program, México, mayo, 2011.
- [16] C. Chávez, M. Perreira, W. Méndez y H. Torres. "Fundamentos para líneas de transmisión", Rutas para líneas de transmisión.
- [17] P. Díaz y R. Peña, "Estudio de campo de la generación hibrida diésel/renovable para electrificación rural, Universidad de Alicia Escuela Politécnica Superior, Perú, Cusco, septiembre, 2011.
- [18] M. Vignolo y F. Berrutti, "Mallas de Tierra en Alta Tensión, Normas IEEE 80 - 2000", Universidad de la República, 2011.
- [19] A. Parsotam, "Fundamentals of calculation or earth potential rise in the underground power distribution cable network", Power & Telecommunications System Coordination Conference Bayside Novotel, Melbourne, Nueva Zelanda, marzo, 1997.
- [20] L. Barrios, "Desarrollo de los Recursos Geotérmicos en El Salvador", La GEO, El Salvador.
- [21] G. Nava, "Cálculo Eléctrico de las líneas de transmisión", U.T.O., F.N.I., 2015
- [22] Mannvit, "Geothermal Power Plant EIA Summary and National Planning Agency Opinion", mayo, 2015.
- [23] H. Gupta y S. Roy, "Geothermal Energy, an Alternative Resource for the 21st Century", ELSERVER, First Edition, 2007.
- [24] SIEMENS, SST 400 Steam Turbine, Industrial Steam Turbine, CATALOG.
- [25] SEL-387 Current Differential and Overcurrent Protection Relay, Versatile Solutions for Power Apparatus Protection, CATALOG.

[26] General Electric, Grid Solutions, "Double side break disconnectors S3C", CATALOG.

[27] SEL-311C-1 "Transmission Protection System Power Solutions for Transmission Line Protection", CATALOG.

[28] SEL-300G Generator Relay CATALOG.

[29] SEL-787-3-4 Transformer Protection Relay, CATALOG.

[30] O. Jaimovich, "Costos de Generación Geotérmica", Buenos Aires, Argentina, mayo, 2007.

[31] R. Kaisinger, "Electrical Modeling of a Thermal Power Station", Degree project in Electric Power System, XR-EE-ES, Suecia, 2011.

ANEXO A

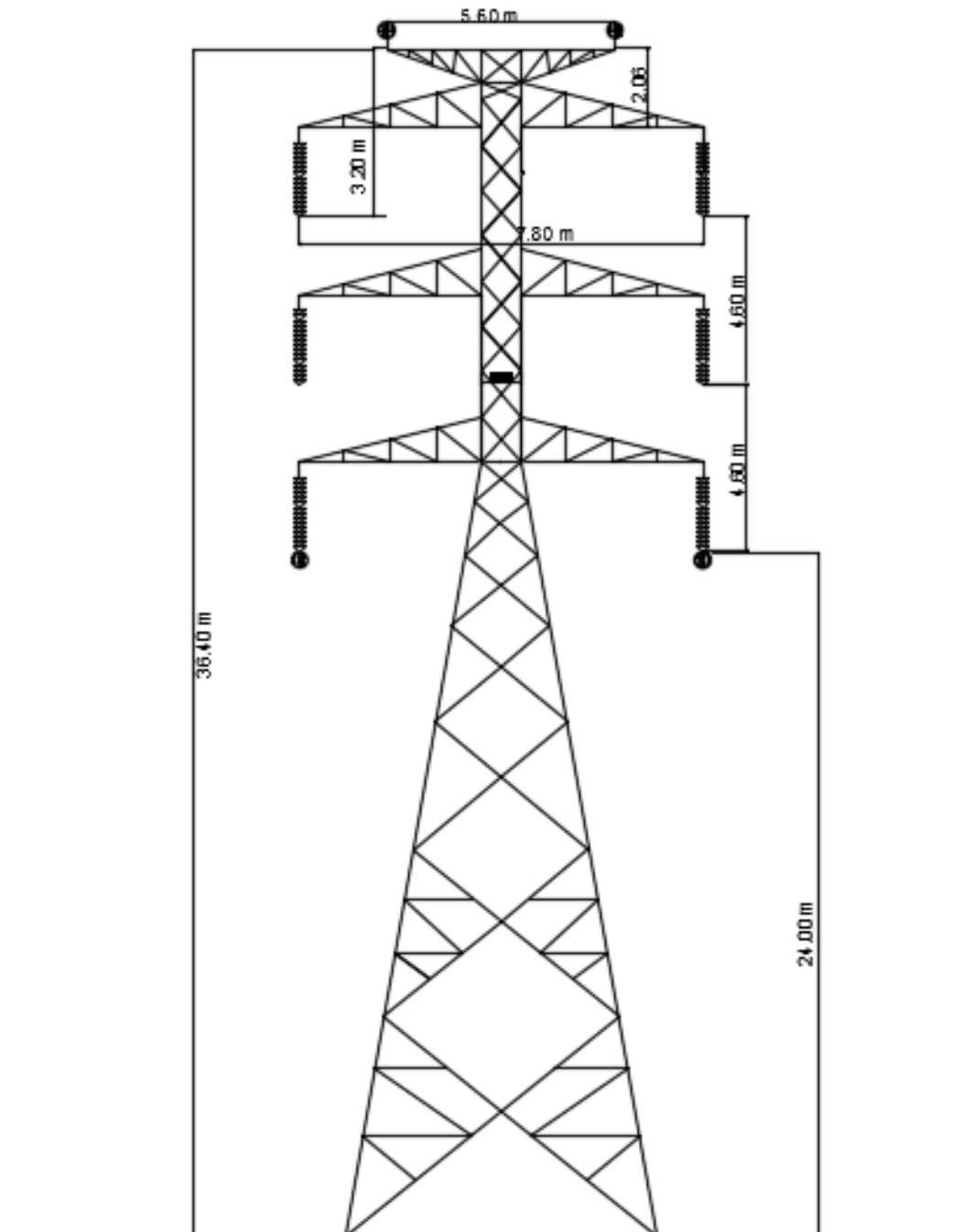


Figura A.1: Estructura metálica de la torre de transmisión, doble circuito.

ANEXO B

Características de la turbina – generador SST-400 GEO.

Características generales de la turbina de las Turbina-Generador SST-400 GEO:

- Camino de vapor personalizado
- Modular
- Diseño termo flexible
- Diseño compacto que minimiza el requerimiento de espacio
- Fácil acceso a la mecánica y fácil mantenimiento
- Alta fiabilidad, disponibilidad y alta eficiencia
- Válvulas de control y disparo tipo mariposa de alto rendimiento para condiciones exigentes de vapor geotérmico.
- Cubiertas integrales para reducir la tensión alterna y resistir fatiga por corrosión
- Aleación de “Stellite” aplicada por láser en la última etapa
- Boquillas ampliamente espaciadas para resistir contaminación de los depósitos
- Colas de hormigón que reducen el estrés de la turbina al máximo y resisten corrosión bajo tensión.
- Rotor cromado al 2%.
- Álabes de acero cromado al 12% o titanio (opcional).
- Separador integrado que extraen la humedad en la punta de los álabes con el fin de minimizar la erosión y minimizar el rendimiento debido a efectos de calentamiento. Menor humedad produce una mayor entalpía que pasa por la turbina mejorando su eficiencia a lo que se llama como Reheat.

Características generales del generador de las Turbina-Generador SST-400 GEO:

- Generador sincrónico de 10 MW
- Potencia de salida hasta 15MW (condensador incluido)
- Rango de velocidad de 3000 rpm
- Condiciones de vapor en vivo
- Presión hasta 12 bar / 175psia (Condensación hasta 0.4 bar)
- Temperaturas de hasta 250°C / 482°F

ANEXO C

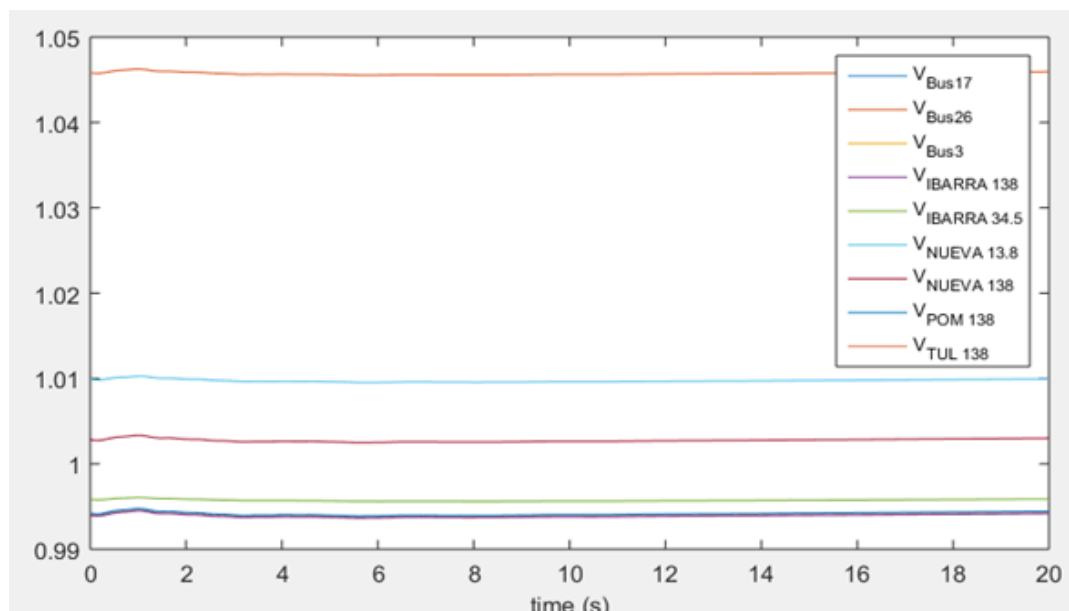


Figura C.1: Gráfica de voltajes de la simulación para la planta generadora Chachimbiro conectada al SNI.

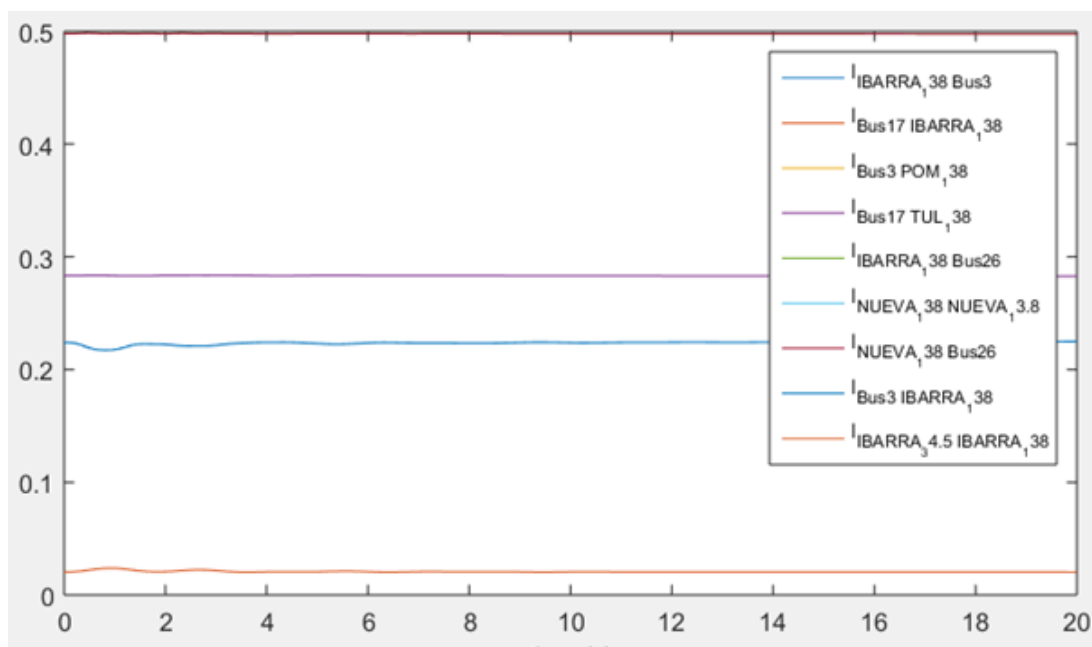


Figura C.2: Gráfica de corrientes de la simulación para la planta generadora Chachimbiro conectada al SNI.

ANEXO D

Relés de protección y sus esquemas:

Relé de protección para generador.

SEL-300G (Generator Relay).

Para que la tecnología esté disponible por primera vez y cumpla con los estándares de protección de turbinas IEEE, SEL ha aplicado su experiencia en la producción de relés basados en microprocesadores para crear el SEL-300G. SEL diseñó el SEL-300G para satisfacer las necesidades de una variedad de usuarios, incluyendo plantas eléctricas de utilidad e industriales y fabricantes de grupos electrógenos.



Figura D.1: Relé de protección para generador

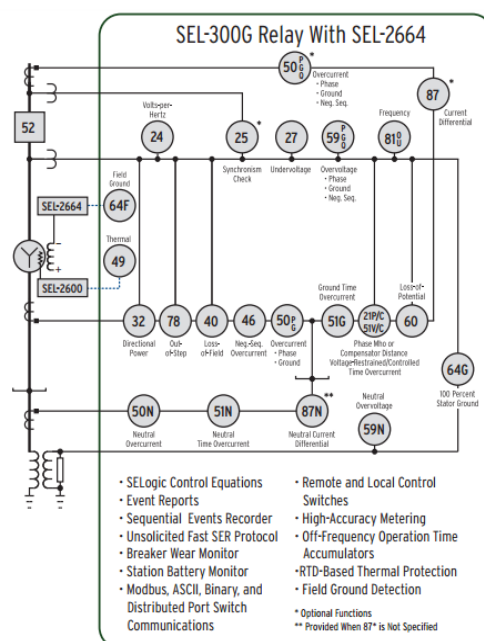


Figure 2 Functional Overview

Figura D.2: Esquema de relé de protección para generador.

Relé de protección para barra.

SEL-387 (Current Differential and Overcurrent Relay).

El relé de diferencial de corriente y sobrecorriente SEL-387 proporciona protección, control y medición para transformadores, buses, interruptores y alimentadores. Las características incluyen cuatro entradas trifásicas de corriente con protección diferencial independiente y restringida, característica diferencial programable de una sola o doble pendiente, monitor de interruptor automático, monitor de voltaje de batería y ecuaciones de control SELogic mejoradas.



Figura D.4: Relé de protección para barra.

Functional Overview

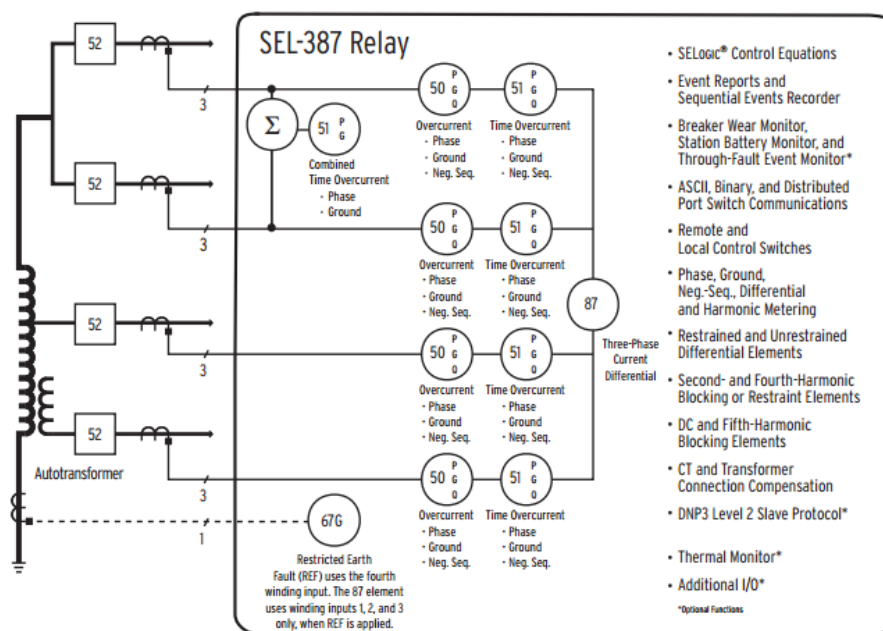


Figure 1 Functional Diagram

Figura D.5: Esquema de relé de protección para barra.

Relé de protección para línea.

Aplique el relé SEL-311C para protección, reenganche, monitoreo y control de líneas de transmisión. Las características incluyen un reconectador de cuatro disparos, una lógica de sobrecarga transitoria del transformador de voltaje de capacitancia patentada (CVT) para mejorar la seguridad de los elementos de distancia de la Zona 1 y elementos de sobrecorriente con control direccional, monitoreo y medición. Aplique una lógica de disparo tripolar o seleccione el SEL-311C-3 para disparar un solo polo.



Figura D.6: Relé de protección para línea.

Functional Overview

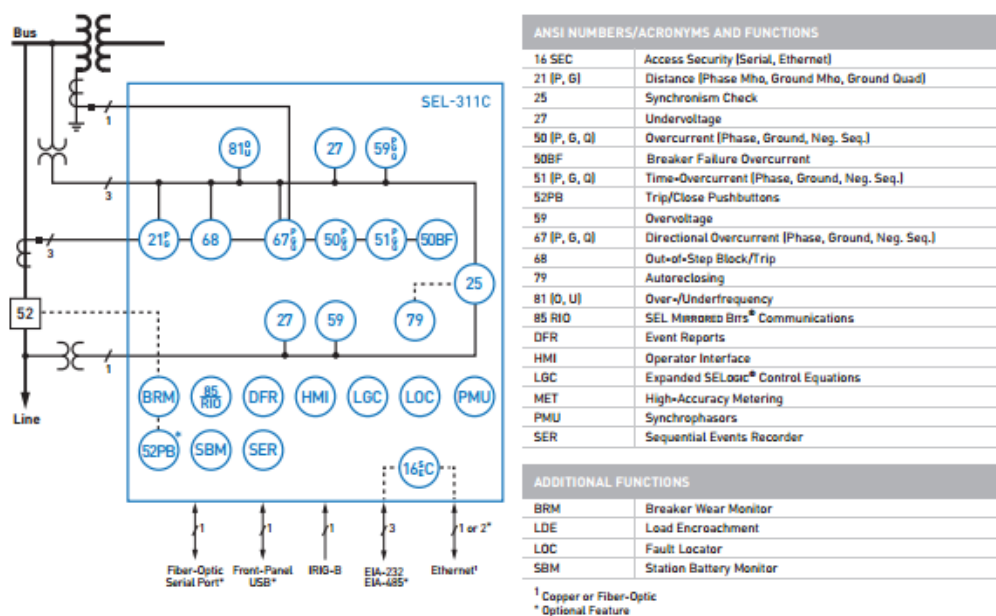


Figure 1 Functional Diagram

Figura D.7: Esquema de relé de protección para línea.

ANEXO E

Malla Puesta a Tierra.

Mediante las investigaciones geofísicas realizadas para determinar la composición del suelo en el estudio de prefactibilidad inicial del proyecto Chachimbiro, se obtuvo los valores de resistividad del terreno en el que se sitúa el reservorio. Se observa una resistividad de 300 ohmios metros en la superficie de la zona.

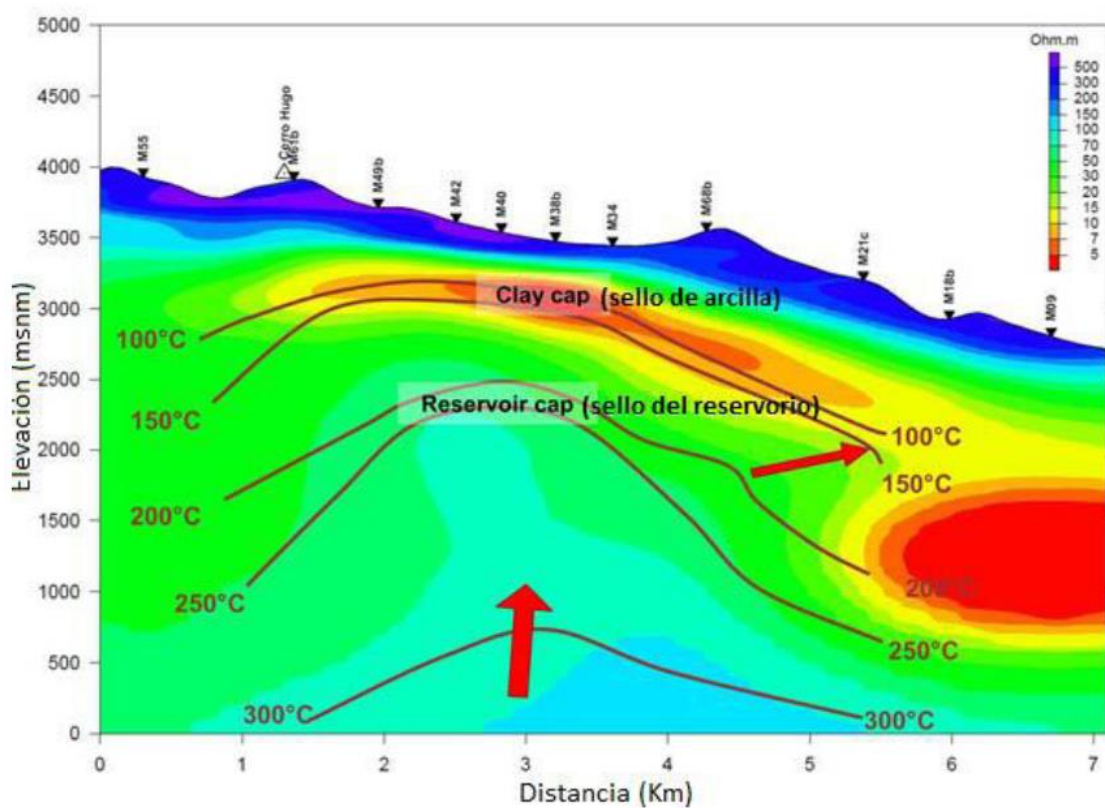


Figura E.1: Sección transversal de la resistividad del terreno.

Para cumplir con los requerimientos establecidos en la norma IEEE Std. 80-2000, nos apoyamos en la hoja de cálculo diseñada por el Sr. Fidel Moreno, en la que situamos la información solicitada en cada uno de los campos de acuerdo a las consideraciones de nuestro diseño.

Se ensayó con disposiciones de cuadrículas de 6 m, 7m y 8m, los cuales no cumplieron con el diseño, mostrando valores de voltaje de paso y toque muy elevados superiores a los máximos establecidos en la norma.

Cabe indicar que la duración de la falla es de 0,2 segundos la cual considera corrientes en periodo de régimen permanente.

Datos del Suelo

ρ	300	Ohm/m	(resistividad del suelo)
ρ_s	3000	Ohm/m	(resistividad superficial)
h_s	0,1	m	(Profundidad de la capa superficial)

Geometría de la malla

[Ver Diagrama](#)

Largo (X):	110	m	Cantidad de varillas:	207	
Ancho (Y):	40	m	Largo:	2,4	m
Área:	4400	m ²	Con varillas en las esquinas		
Espacio Vertical (Ey)	5	m	LR:	496,8	m
Espacio Horizontal (Ex)	5	m	↓		
Conductores verticales:	23		Lm:	2692,47	m
Conductores Horizontales:	9		Lt:	2406,80	m
Lc:	1910	m (Longitud total de la malla)			
h:	1,50	m (Profundidad de la malla)			

Parámetros eléctricos

Ts:	0,2	s (Tiempo de duración de la falla)
3I0:	11160	A (3X I0 Corriente de falla)

Conductor de la malla

Tipo:	Acero recubierto de cobre	
Conductividad:	40 % respecto al cobre puro	IEEE 80-2000 Sec 11.3 Tabla 1 Con temperatura de referencia 20°C
Factor ar:	0,00378 @20°C [1/°C]	
K0 a 0°C:	245	
Tm:	1084 [°C] (Temperatura de fusion)	
pr a 20°C:	4,4 [μΩ·cm]	
TCAP:	3,85 [J/cm3·°C] Capacidad termica	
Tipo de Union:	Soldada	
Temp Max de la Union:	450 °C	
Ta:	25 °C (temperatura ambiente)	Características mínimas del conductor de tierra
Akcmil:	51,29 kcmil	
Area minima:	25,99 mm2	
Diámetro mínimo:	0,0058 mm	
Conductor de diseño:	2/0 AWG	
área:	67,42 mm2	
diámetro:	0,0093 mm	

Factores de paso y toque

K: -0,82 (factor de reflexión)
 Cs: 0,72 (factor de reducción)
 Peso de la persona: 50 kg
 Es: 3624,22 V (Voltaje de paso Max, para el peso indicado)
 Et: 1100,59 V (Voltaje de toque Max)

Resistencia de la malla

Rg: 2,05 Ω (Resistencia de la malla)

Corriente de Malla

IG: 5,94 kA

[Calcular](#)

Calculo de corriente de malla IG	
3I0: 0,06 kA (Corriente de falla)	
Ts: 0,2 s (Tiempo de duracion de la falla)	
X/R: 10 Relacion X/R	
Df: 1,064 Factor de decremento	
Sf: 0,50 Factor de división	
IG: 5,94 kA	Volver

Corriente de malla

Usar 3I0

Introducir Valor

11,16 kA

Incremento de potencial

GPR: 12195,93 V (Incremento de potencial en la malla)

Voltaje de malla

Em: 1091,66 V (Voltaje de la malla en falla)

Voltaje de paso

Es: 535,18 V

El Diseño cumple con la norma

En el diseño propuesto, observamos que de voltaje de paso y el voltaje de toque son menores que los establecidos y cumplen con la norma IEEE Std. 80-2000:

Voltaje de paso: 535,18 V < 3624,22 V

Voltaje de toque: 1091,66 V < 1100,59 V

ANEXO F

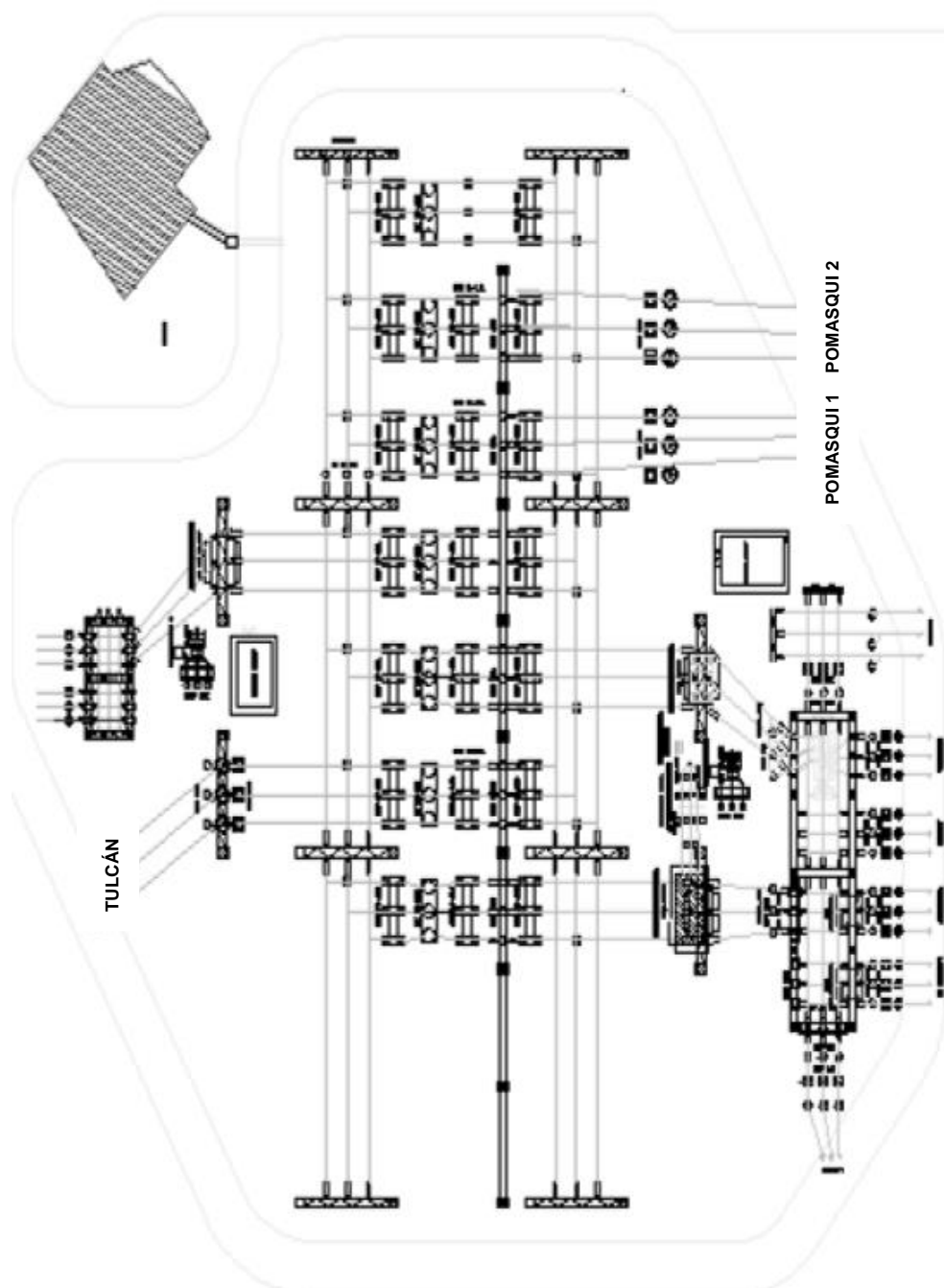


Figura F.1: Subestación Ibarra actualmente.

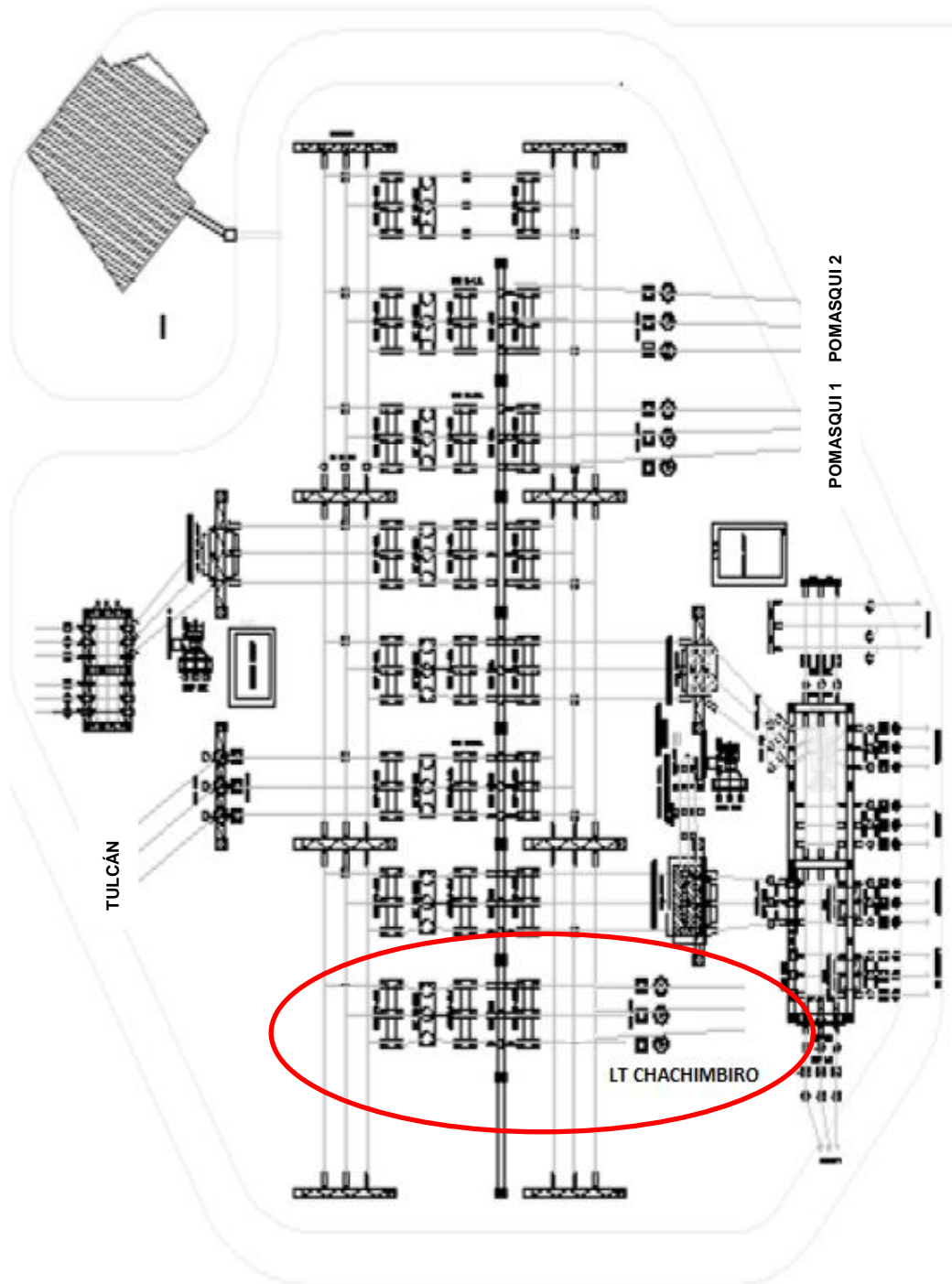


Figura F.2: Subestación Ibarra con L/T Chachimbiro.

ANEXO G

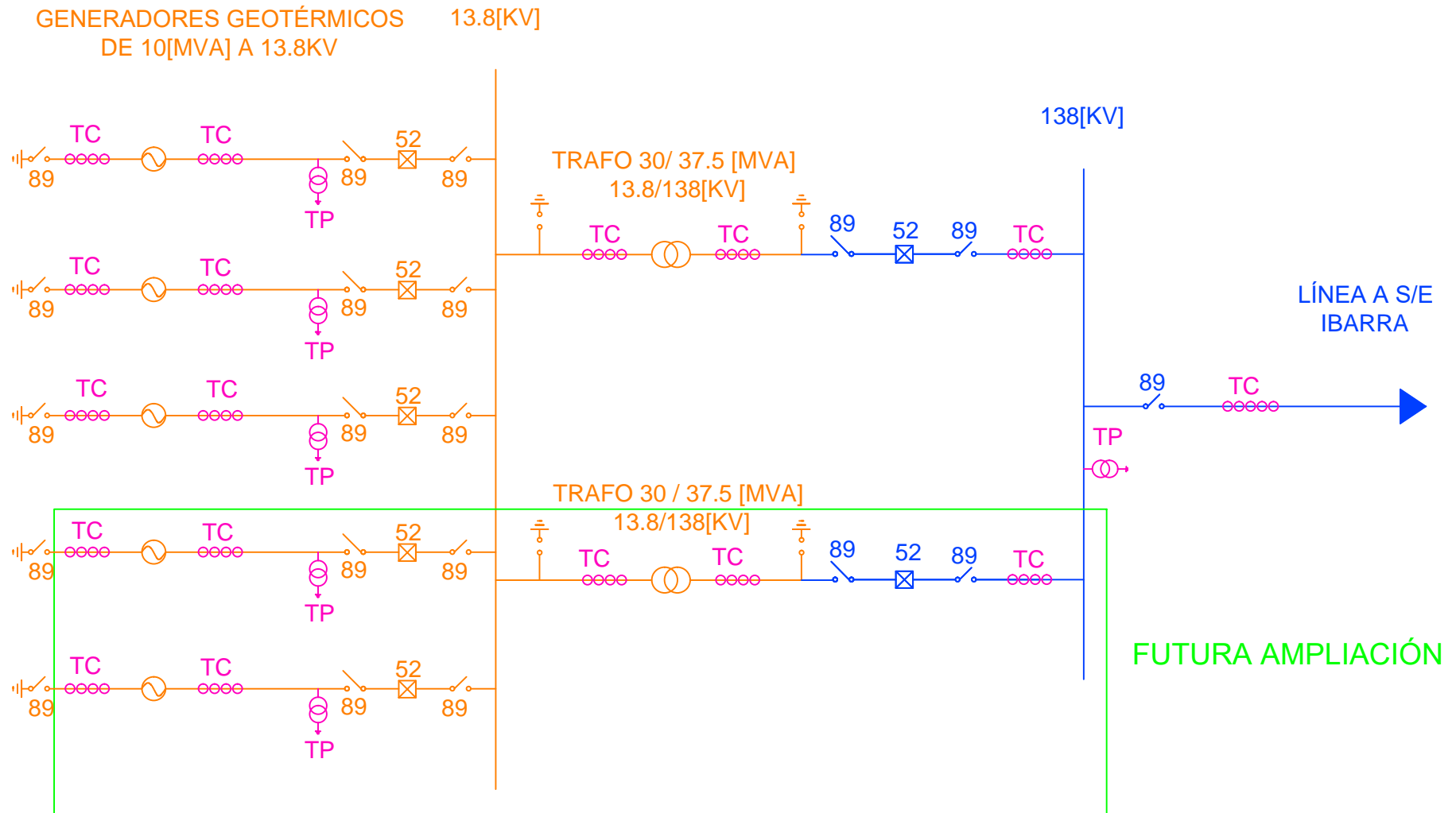


Figura G.1: Esquema unifilar de la S/E Chachimbiro

GENERADORES GEOTÉRMICOS 13.8[KV]
DE 10[MVA] A 13.8KV

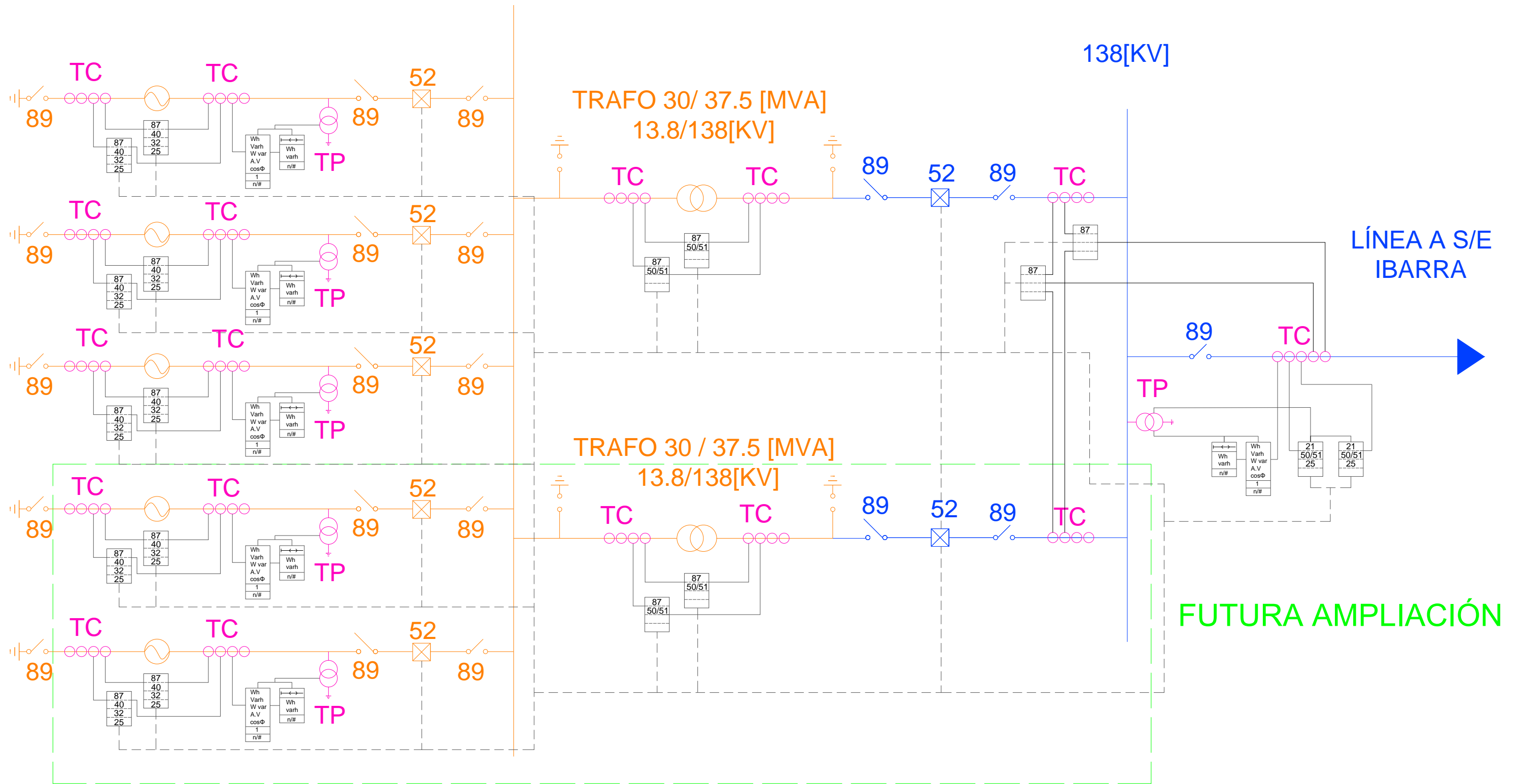


Figura G.2: Esquema de protección de la S/E Chachimbiro

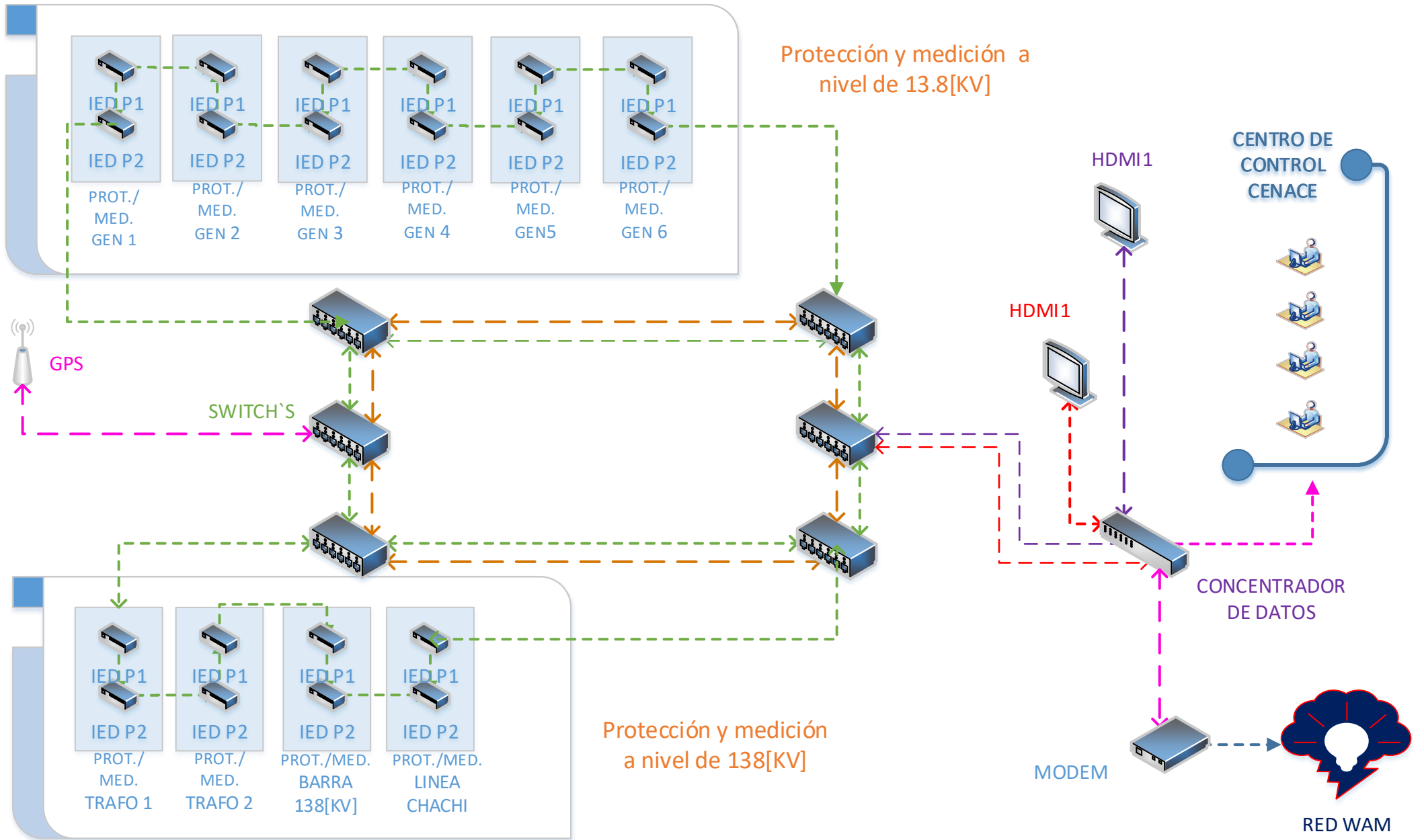


Figura G.3: Esquema de comunicación de la S/E Chachimbiro

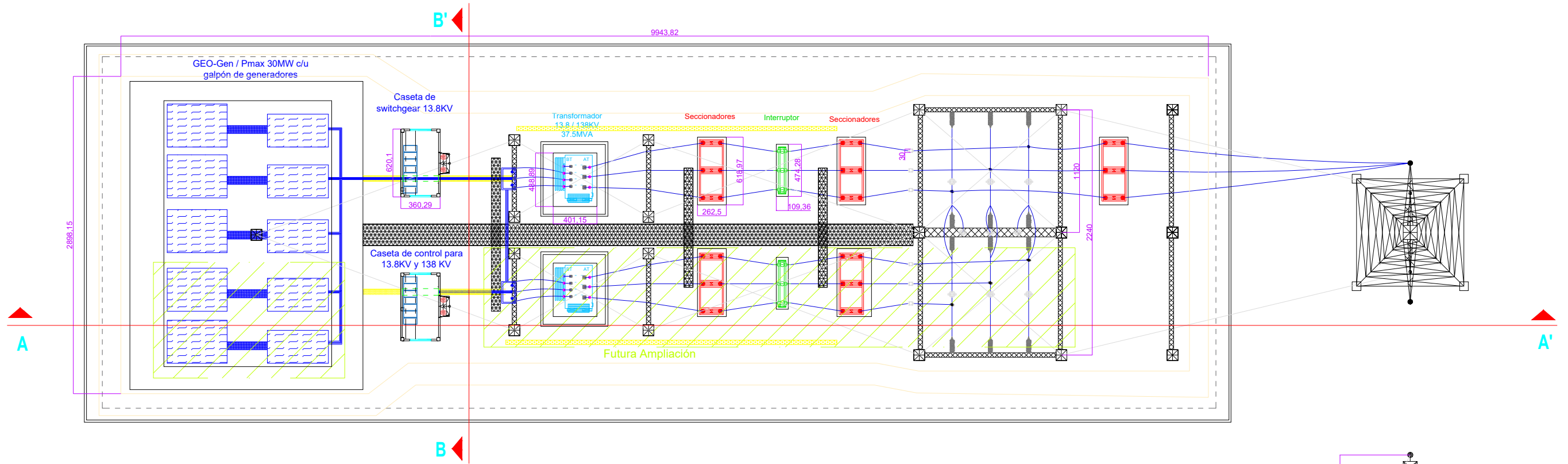


Figura G.4: Vista en planta de la S/E Chachimbiro

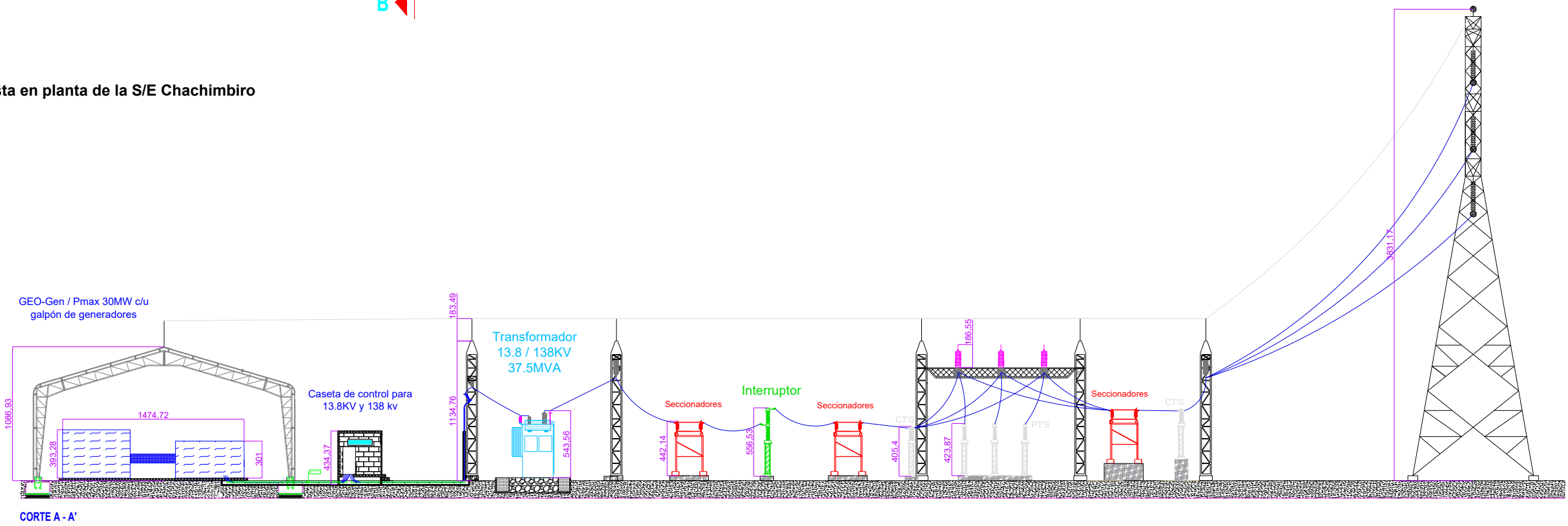


Figura G.5: Vista lateral de la S/E Chachimbiro, Corte A-A'

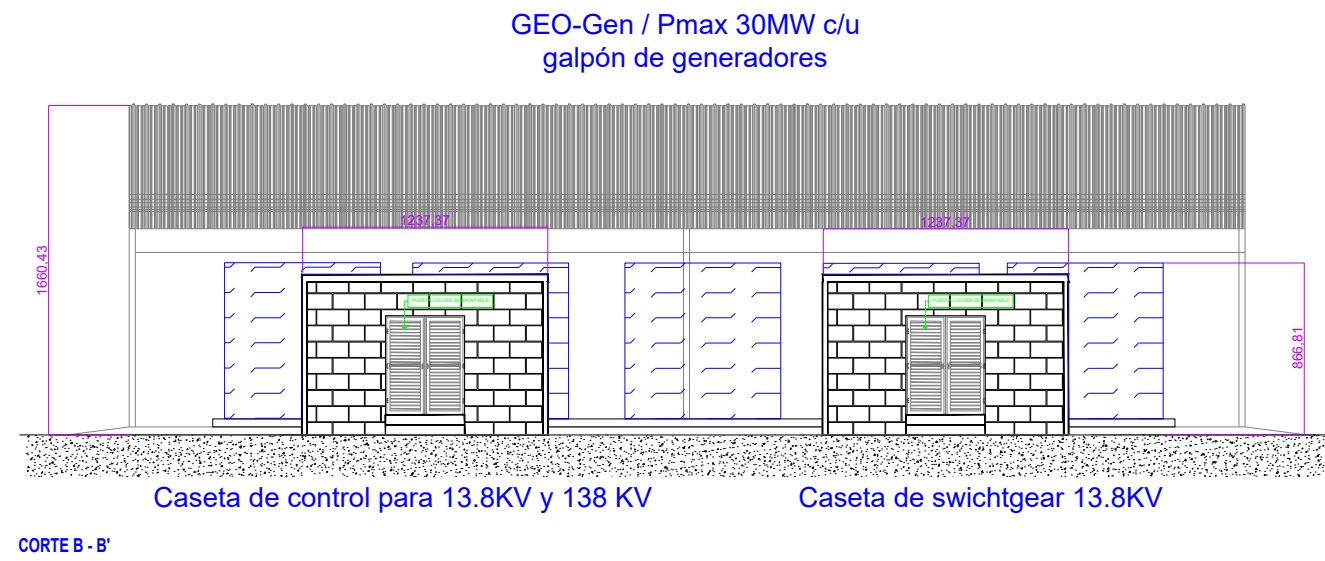


Figura G.6: Vista lateral de las casetas de protección y control para 13,8 KV y 138 KV, Corte B-B'

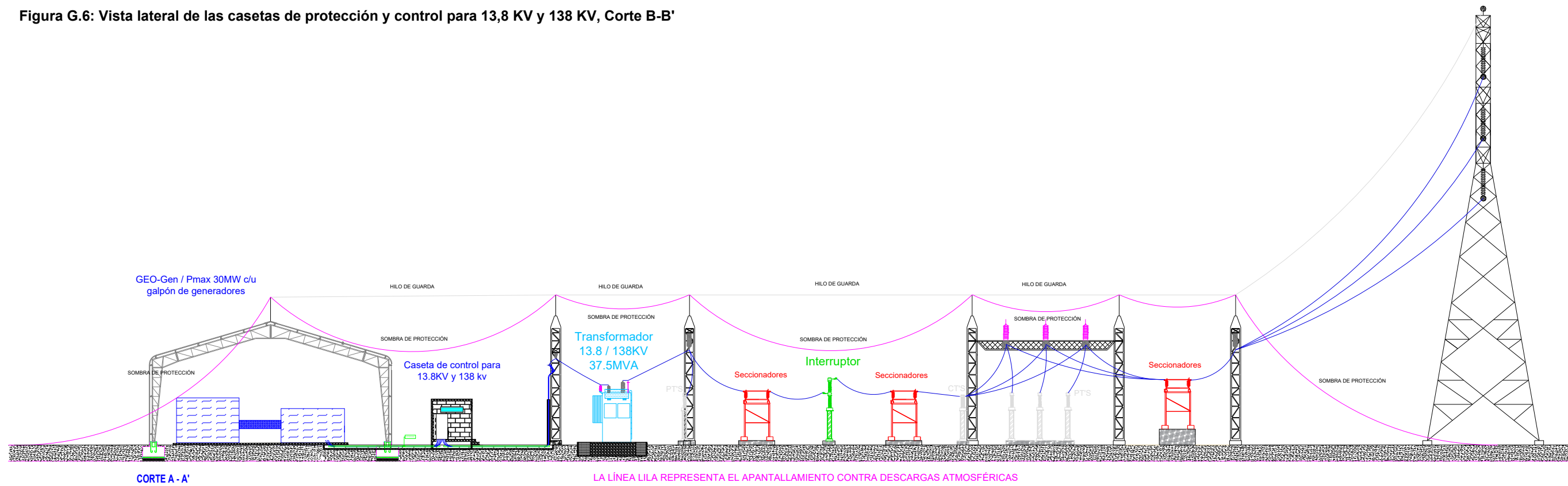


Figura G.7: Vista lateral de la S/E con zona de protección contra descargas atmosféricas con hilo de guarda