



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

FACTIBILIDAD DE APORTES DE CENTRALES DE GEOTERMIA AL
CONTROL PRIMARIO DE FRECUENCIA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

JAIME EDUARDO ENRIQUE ARÉVALO SALGADO

PROFESOR GUÍA:
DR. LUIS VARGAS DÍAZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SR. NELSON MORALES OSORIO
SR. LORENZO REYES CHAMORRO

SANTIAGO DE CHILE
2013

FACTIBILIDAD DE APORTES DE CENTRALES DE GEOTERMIA AL CONTROL PRIMARIO DE FRECUENCIA

El objetivo principal de este trabajo de título es evaluar la factibilidad del aporte de centrales geotérmicas al Control Primario de Frecuencia (CPF) de un sistema interconectado, de acuerdo a lo establecido por la normativa publicada.

Primero se estudian las tecnologías de generación eléctrica disponibles a partir de la energía geotérmica, con el fin de determinar aquellas que poseen los elementos y equipos necesarios para poder controlar las variaciones de frecuencia de un sistema. Se concluye que las centrales *single flash* son las más adecuadas para participar en el CPF, debido a que sus sistemas de conversión de energía cuentan con equipos capaces de almacenar vapor.

A continuación, se crea un modelo representativo de central geotérmica para estudiar su comportamiento dinámico en un sistema ante contingencias en relación a variaciones de frecuencia. Se utilizó un modelo del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) para el *software* DIgSILENT PowerFactory provisto por el Centro de Despacho Económico de Carga de dicho sistema. El modelo mencionado fue creado en base a información extraída de la literatura pertinente y de información provista por referentes de generación geotérmica en el mundo. Específicamente, se trabaja con un modelo dinámico basado en una central de cuatro unidades *single flash* de 40 [MW] cada una.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis dinámico, se concluye que este tipo de centrales disminuyen de forma efectiva las variaciones de frecuencia y los tiempos de establecimiento del sistema, siempre y cuando cuenten con una reserva primaria pertinente y con equipos que sean capaces de contar con una reserva de vapor geotérmico para ser utilizada bajo estas condiciones. Las simulaciones indican que bajo condiciones de subfrecuencia, la frecuencia aumenta en 0,07 [Hz] por unidad conectada y el tiempo máximo de establecimiento disminuye en 2 [s] por unidad conectada, mientras que bajo condiciones de sobrefrecuencia, la frecuencia disminuye en 0,14 [Hz] por unidad conectada y el tiempo máximo de establecimiento disminuye entre 1,5 y 2 [s] por unidad conectada.

En conclusión, las centrales geotérmicas con tecnología *single flash* están en condiciones de contribuir significativamente al CPF de sistemas eléctricos que cuenten con una baja cantidad de generación de origen hidráulico.

Para futuras investigaciones se recomienda perfeccionar el modelo representativo de la central geotérmica, tomando en consideración cada uno de los procesos particulares que ocurren en los dispositivos que forman parte de ciclo de conversión de energía, la inclusión de una línea de transmisión al análisis dinámico y la factibilidad económica de contribuir con energía geotérmica a la reserva primaria del sistema.

A mi familia

Tabla de contenido

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| Capítulo 1 | Introducción..... | 1 |
| 1.1 | Motivación | 1 |
| 1.2 | Alcance | 2 |
| 1.3 | Objetivo general..... | 2 |
| 1.4 | Objetivos específicos | 3 |
| 1.5 | Estructura | 3 |
| Capítulo 2 | Estado del arte | 5 |
| 2.1 | Energía geotérmica | 5 |
| 2.1.1 | Sistemas geotérmicos | 7 |
| 2.1.2 | Tipos de campos geotérmicos | 9 |
| 2.1.3 | Impacto ambiental | 11 |
| 2.1.4 | Geotermia en Chile..... | 12 |
| 2.1.4.1 | Antecedentes históricos | 12 |
| 2.1.4.2 | Disponibilidad del recurso geotérmico en Chile | 13 |
| 2.1.4.3 | Legislación geotérmica chilena | 16 |
| 2.2 | Tecnologías de generación en centrales geotérmicas | 18 |
| 2.2.1 | <i>Single flash</i> (vaporización súbita) | 18 |
| 2.2.2 | <i>Double flash</i> (vaporización súbita doble)..... | 22 |
| 2.2.3 | <i>Dry steam</i> (vapor seco) | 24 |
| 2.2.4 | Ciclo binario | 26 |
| 2.2.5 | EGS (sistema geotérmico mejorado)..... | 29 |
| Capítulo 3 | Control en centrales generadoras | 32 |
| 3.1 | Control de frecuencia..... | 32 |
| 3.1.1 | Lazos de control de frecuencia..... | 34 |
| 3.2 | Sistemas de control en generadores sincrónicos..... | 36 |
| 3.2.1 | Gobernadores de velocidad | 37 |
| 3.2.1.1 | Modelo IEEEESGO | 37 |

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| 3.2.2 | Reguladores de tensión..... | 38 |
| 3.2.2.1 | Modelo ESAC5A..... | 39 |
| 3.3 | Control Primario de Frecuencia en la Norma Técnica..... | 41 |
| Capítulo 4 | Modelo dinámico de una central geotérmica | 44 |
| 4.1 | Antecedentes existentes | 44 |
| 4.2 | Elección de la tecnología geotérmica de generación eléctrica..... | 45 |
| 4.3 | Modelo adaptado a Control de Frecuencia | 48 |
| 4.3.1 | Gobernador de velocidad IEEESGO..... | 50 |
| 4.3.2 | Regulador de tensión ESAC5A..... | 54 |
| 4.3.3 | Modelo integrado | 55 |
| Capítulo 5 | Análisis dinámico..... | 57 |
| 5.1 | Alcance y condiciones de las pruebas..... | 57 |
| 5.2 | Variables a estudiar..... | 59 |
| 5.3 | Casos de estudio..... | 59 |
| 5.4 | Resultados | 60 |
| 5.4.1 | Subfrecuencia..... | 60 |
| 5.4.2 | Sobrefrecuencia..... | 63 |
| Capítulo 6 | Conclusiones..... | 67 |
| Anexo A | Estabilidad en sistemas eléctricos de potencia | 71 |
| A.1 | Estabilidad de ángulo del rotor | 72 |
| A.2 | Estabilidad de tensión | 73 |
| A.3 | Estabilidad de frecuencia | 73 |
| Anexo B | Modelo simplificado de un recipiente de vapor | 75 |
| Anexo C | Modelo de unidad generadora en DIgSILENT PowerFactory | 78 |
| C.1 | Descripción de los bloques de control | 80 |
| C.1.1 | Máquina sincrónica (SYM)..... | 80 |
| C.1.2 | Estabilizador de potencia (PSS)..... | 80 |
| C.1.3 | Regulador de tensión (VCO)..... | 81 |
| C.1.4 | Unidad de Control Primario (PCU)..... | 82 |

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| Anexo D | Unilineal del Sistema Interconectado del Norte Grande | 83 |
| Anexo E | Potencia generada por la central geotérmica bajo contingencia..... | 84 |
| E.1 | Subfrecuencia..... | 84 |
| E.2 | Sobrefrecuencia..... | 86 |
| Anexo F | Producción de energía geotérmica a nivel mundial..... | 88 |
| Bibliografía | | 91 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Modelo de un sistema geotérmico. Fuente: [1]. | 8 |
| Figura 2: Ubicación de volcanes y zonas con actividad termal en Chile. Fuente: [3]. | 14 |
| Figura 3: Ciclo esquemático de una central <i>single flash</i> . | 20 |
| Figura 4: Ciclo esquemático de una central <i>double flash</i> . | 23 |
| Figura 5: Ciclo esquemático de una central <i>dry steam</i> . | 26 |
| Figura 6: Esquema de una central de ciclo binario. | 28 |
| Figura 7: Diagrama de corte de un sistema geotérmico mejorado. Fuente: [8]. | 30 |
| Figura 8: Esquema general de un gobernador de velocidad. | 37 |
| Figura 9: Diagrama de bloques del gobernador de velocidad IEEESGO. | 38 |
| Figura 10: Diagrama de bloques del sistema de excitación ESAC5A. | 39 |
| Figura 11: Separador ciclónico adaptado. | 47 |
| Figura 12: Central <i>single flash</i> simplificada. | 49 |
| Figura 13: Especificaciones generales de diseño de un separador ciclónico | 51 |
| Figura 14: Diagrama de bloques del modelo de unidad geotérmica. | 55 |
| Figura 15: Frecuencia del sistema bajo contingencia de subfrecuencia. | 60 |
| Figura 16: Frecuencia del sistema bajo contingencia de sobrefrecuencia. | 64 |
| Figura 17: Clasificación de los tipos de estabilidad en sistemas de potencia. | 72 |
| Figura 18: Esquema de un recipiente de vapor. | 75 |
| Figura 19: Estimación de $\partial\rho/\partial P$. | 77 |
| Figura 20: Armazón IEEE Frame No Droop. | 79 |
| Figura 21: Unilineal simplificado del SING. Fuente: [18]. | 83 |
| Figura 22: Potencia eléctrica de las unidades bajo contingencia de subfrecuencia. | 84 |
| Figura 23: Potencia mecánica de las unidades bajo contingencia de subfrecuencia. | 85 |
| Figura 24: Potencia eléctrica de las unidades bajo contingencia de sobrefrecuencia. | 86 |
| Figura 25: Potencia mecánica de las unidades bajo contingencia de sobrefrecuencia. | 87 |
| Figura 26: Evolución de la generación geotérmica en el mundo. | 89 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Potencial de energía geotérmica en Chile. | 13 |
| Tabla 2: Sitios en Chile con potencial geotérmico..... | 15 |
| Tabla 3: Características de las concesiones puntualizadas en la Ley N°19.657. | 17 |
| Tabla 4: Constantes de tiempo de los transitorios en unidades térmicas | 35 |
| Tabla 5: Descripción de los parámetros del modelo IEEEESGO. | 38 |
| Tabla 6: Descripción de los parámetros del modelo ESAC5A. | 40 |
| Tabla 7: Condiciones óptimas de operación del separador ciclónico. | 50 |
| Tabla 8: Propiedades termodinámicas del geofluido. | 50 |
| Tabla 9: Propiedades termodinámicas de vapor saturado en torno a P_0 | 52 |
| Tabla 10: Valores de los parámetros del controlador IEESGO. | 54 |
| Tabla 11: Valores de los parámetros del controlador ESAC5A. | 54 |
| Tabla 12: Parámetros de modelación de una unidad generadora geotérmica. | 56 |
| Tabla 13: Programa de obras de generación geotérmica. | 57 |
| Tabla 14: Cargas desconectadas para la contingencia de sobrefrecuencia. | 58 |
| Tabla 15: Datos relevantes de frecuencia bajo contingencia de subfrecuencia. | 61 |
| Tabla 16: Potencia consumida por punto de conexión..... | 62 |
| Tabla 17: Variación del tiempo máximo de establecimiento bajo contingencia de subfrecuencia..... | 62 |
| Tabla 18: Datos relevantes de frecuencia bajo contingencia de sobrefrecuencia. | 65 |
| Tabla 19: Variación del tiempo máximo de establecimiento bajo contingencia de sobrefrecuencia. | 66 |
| Tabla 20: Entradas y salidas del generador sincrónico. | 80 |
| Tabla 21: Entradas y salida del PSS..... | 81 |
| Tabla 22: Entradas y salida del VCO..... | 82 |
| Tabla 23: Entradas y salida del PCU..... | 82 |
| Tabla 24: Generación geotérmica por país..... | 89 |
| Tabla 25: Incremento de la capacidad geotérmica instalada en el mundo. | 90 |

Capítulo 1 Introducción

1.1 Motivación

El suministro energético de Chile en el último tiempo se ha visto comprometido debido al rechazo de grandes proyectos de generación por parte de la autoridad y a la gran dependencia de fuentes foráneas de energía para generar electricidad, tales como el gas natural y el petróleo. En vista de esto, una de las alternativas para solucionar este problema es aprovechar la riqueza natural de Chile en lo que se refiere a la explotación de energías renovables no convencionales (ERNC).

Dentro de la lista de las ERNC con mayor potencial de desarrollo, la energía geotérmica cobra un alto grado de importancia para ayudar a diversificar la matriz energética actual. Los recursos geotérmicos adquieren un valor significativo en el desarrollo energético de países como Chile, en donde no existen fuentes importantes endógenas de combustibles fósiles.

A pesar de que actualmente no existe una central que explote este tipo de energía en Chile, son consideradas en los programas de obras futuras de los sistemas interconectados del país.

Por otro lado, también ha surgido el problema de la estabilidad de servicio y operación, por lo que es necesario determinar el grado de aporte que pueden entregar las ERNC a los mecanismos que mantienen la seguridad y la calidad de servicio en los sistemas eléctricos.

1.2 Alcance

La evaluación de la factibilidad para determinar el aporte de centrales geotérmicas al Control Primario de Frecuencia (CPF) se basa en el análisis de cada tecnología de generación geotérmica en función de las características de los sistemas de conversión de energía de cada una de ellas.

El estudio técnico consiste en un análisis dinámico de la operación del sistema bajo las condiciones que impone cada caso de estudio determinado.

El trabajo sólo engloba estudios sobre la operación del sistema eléctrico. No considera las etapas de implementación, de ingeniería básica ni de detalle.

1.3 Objetivo general

El objetivo de este trabajo es determinar el aporte que podrían entregar las centrales de energía geotérmica al CPF de un sistema interconectado.

1.4 Objetivos específicos

A partir del objetivo general previamente definido, se reconocen los siguientes objetivos específicos:

- Plantear las tecnologías de generación eléctrica a partir de energía geotérmica factibles en Chile.
- Crear un modelo dinámico representativo de una central geotérmica.
- Estudiar la respuesta dinámica de una central geotérmica ante las variaciones naturales de la demanda de un sistema.
- Exponer las diferencias que existen entre las centrales geotérmicas con las de centrales térmicas convencionales en relación al control de frecuencia.

1.5 Estructura

La presente memoria cuenta con 6 capítulos principales, comenzando con la introducción, en la cual se presentan la motivación, el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo.

En el capítulo 2 se expone al estado del arte de la energía geotérmica. Se revisan las tecnologías de generación eléctrica empleadas y posibles puntos de explotación de este tipo de energía en el país.

En el capítulo 3 se especifican los métodos de control empleados en una unidad generadora, haciendo hincapié en aquellos que tienen directa relación con el control de frecuencia y por lo exigido en la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.

En el capítulo 4 se explica el procedimiento efectuado para crear el modelo dinámico representativo de una unidad geotérmica, para así estudiar el comportamiento de dichas unidades ante variaciones de frecuencia.

En el capítulo 5 se describe el análisis dinámico del sistema con el modelo de central geotérmica implementado. Se exponen las consideraciones previas, la evolución de las variables relevantes en función del tiempo y la interpretación de dichos resultados.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones finales del trabajo desarrollado. Se puntualizan las ventajas y desventajas de utilizar centrales de energía geotérmica en el CPF en relación a los resultados entregados por el modelo. Además, se proponen futuros avances para seguir desarrollando esta línea de trabajo.

Para terminar, al final del documento se encuentran las referencias bibliográficas empleadas a lo largo de este trabajo y anexos.

Capítulo 2 Estado del arte

2.1 Energía geotérmica

La energía geotérmica corresponde al calor generado y contenido en el interior de la Tierra, la cual proviene principalmente de la convección y conducción ascendente de calor desde el núcleo y manto terrestre hacia la superficie y por el calor generado por el decaimiento de elementos radioactivos en la corteza. Sin embargo, en la actualidad, este término se utiliza para referirse a la proporción del calor de la Tierra que puede ser explotado por el hombre. Este tipo de energía es considerado como un recurso renovable y sustentable debido a que el calor proveniente de la Tierra es prácticamente ilimitado [1].

La energía geotérmica se impone ante las fuentes de energía convencionales como una alternativa rentable, sostenible y ecológica. Aun así, históricamente su explotación se ha limitado a zonas cercanas a los límites de placas tectónicas. Los recientes avances tecnológicos en el área han ampliado dramáticamente la magnitud y el alcance de los recursos viables. De los pozos geotérmicos emanan gases de efecto invernadero (GEI) retenidos en lo profundo de la tierra, pero dichas emisiones son mucho menor por unidad de energía generada que las de los combustibles fósiles.

Consecuentemente, la energía geotérmica tiene el potencial para ayudar a mitigar el calentamiento global si es utilizada en lugar de los combustibles fósiles.

El uso de fuentes de energía geotérmicas también puede ayudar a mantener regímenes de precio estables de electricidad. Para cualquier tipo de central, el precio del combustible usado afecta directamente el precio de la electricidad producida. Algunos combustibles como el petróleo y el gas natural van presentando alzas tanto esperados como impredecibles en el tiempo, lo que genera incertidumbre en los precios de la electricidad.

La ventaja que poseen las centrales geotérmicas en este aspecto es que éstas ya tienen asegurada su fuente de energía antes de que comiencen su período de operación, por lo que los costos de usarla no cambian, por lo que es posible estimar el precio de la electricidad generada con fuentes geotérmicas. También son capaces de producir electricidad en todo momento independientemente de las variaciones en la demanda y de las condiciones climáticas a las que se encuentren, lo que resulta ser una clara ventaja frente a otras centrales con fuentes de energía renovables como la eólica y la solar, que generan electricidad de forma intermitente. En términos de superficie ocupada, son mucho más compactas que las centrales a carbón y solares fotovoltaicas y ayudan a diversificar la matriz energética del país [2].

2.1.1 Sistemas geotérmicos

Un sistema geotérmico se define como un volumen de roca con una temperatura elevada ubicado en la corteza de la Tierra capaz de transferir calor desde una fuente hasta la superficie. Pueden ser encontrados en regiones con un gradiente geotérmico igual o ligeramente superior al promedio y especialmente en regiones cercanas a fallas geológicas, debido a que poseen un gradiente geotérmico significativamente mayor al promedio [1].

La información proporcionada por investigaciones geológicas, geofísicas y geoquímicas hechas en numerosos sistemas geotérmicos permite confeccionar un modelo básico de ellos.

- Fuente de calor: Consiste típicamente en una cámara de magma ubicada a menos de 10 [km] de profundidad con respecto a la superficie que transfiere calor a rocas adyacentes.
- Reservorio: Volumen de rocas permeables a una profundidad accesible por el hombre, donde se acumula agua caliente o vapor. El agua debe tener la facultad de poder filtrarse en el subsuelo hasta alcanzar la profundidad necesaria para ser calentada.
- Cubierta y roca impermeable: Impide el escape del fluido presente en el reservorio hacia el exterior del sistema geotérmico. Compuesta usualmente de

rocas arcillosas o de la precipitación de sales minerales provenientes de las fuentes termales.

En la siguiente figura se muestra una representación esquemática de un sistema geotérmico ideal:

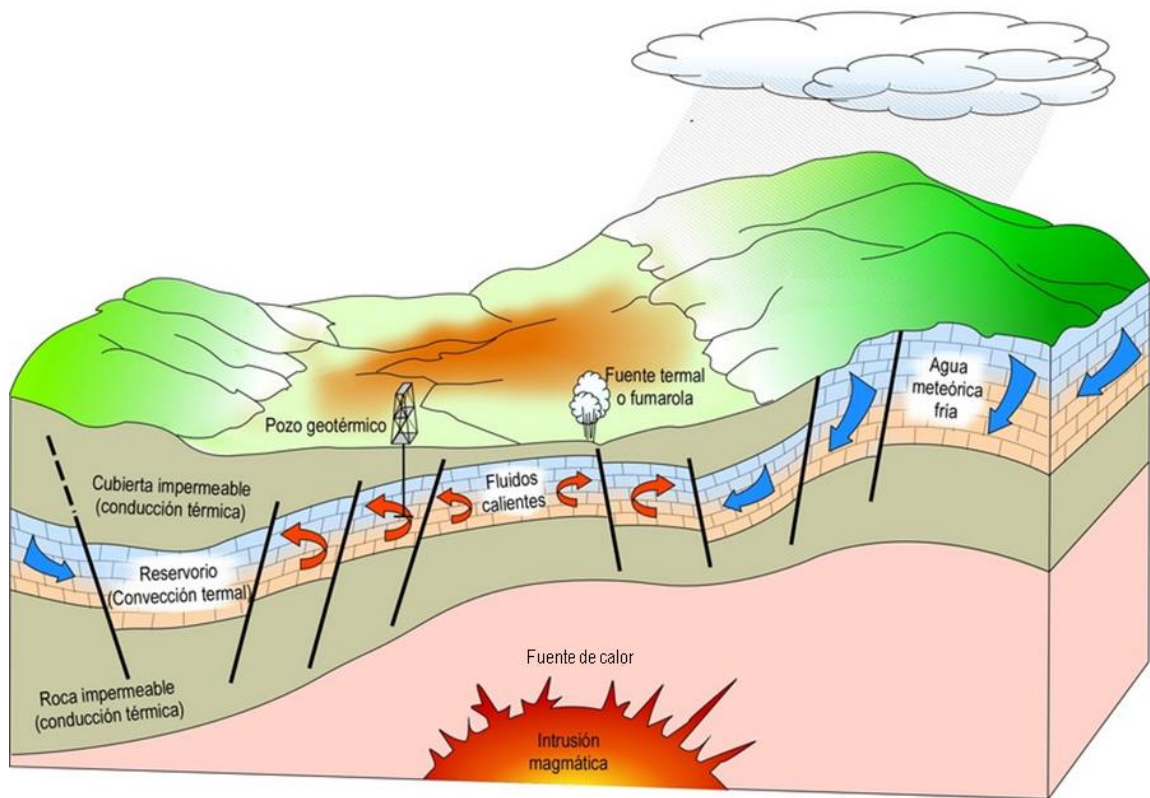


Figura 1: Modelo de un sistema geotérmico. Fuente: [1].

De todas las partes de un sistema geotérmico, sólo la fuente de calor debe ser natural. Los otros dos elementos pueden ser de origen artificial, si las condiciones del sistema lo permiten.

Uno de los parámetros utilizados para determinar la calidad de un potencial sistema geotérmico es el gradiente geotérmico. El gradiente geotérmico denota el aumento de temperatura con respecto a la profundidad en las capas internas de la Tierra. El gradiente geotérmico promedio hasta una profundidad de 10 [km] (la máxima accesible por las tecnologías de perforación actuales) es de 25 a 30 [°C/km]. Dicho aumento de temperatura no es el suficiente para ser aprovechado como energía útil; no obstante, hay regiones con un gradiente geotérmico muy por sobre el promedio debido a la manifestación de actividad sísmica y volcánica. La intrusión de grandes masas de roca fundida en una zona determinada puede aumentar este flujo de calor normal a nivel local [3].

2.1.2 Tipos de campos geotérmicos

El criterio más común para clasificar los recursos geotérmicos se basa en la temperatura de los fluidos que cumplen con la función de transportar el calor de las rocas ubicadas en el interior de la tierra hacia la superficie. La temperatura de un campo geotérmico determina la forma en que puede ser explotado, ya sea de forma directa o para generar electricidad [3].

De acuerdo a esta clasificación, es posible determinar tres tipos de campos geotérmicos:

- Campos geotérmicos de alta entalpía: La temperatura que alcanzan los fluidos sobre los 150 [°C]. Este tipo de campos existen esencialmente en las zonas activas de la corteza terrestre y son explotados por medio de técnicas de perforación casi idénticas a las de la extracción del petróleo. Los fluidos son enviados directamente a las turbinas de generación eléctrica.
- Campos geotérmicos de mediana entalpía: La temperatura de los fluidos va entre los 90 [°C] y 150 [°C]. Dado que las temperaturas son menos elevadas, la conversión vapor-electricidad tiene un menor rendimiento, por lo que se debe utilizar un fluido volátil como intermediario para generar electricidad. En general, son las centrales pequeñas las que pueden explotar este tipo de campos. Los requisitos de implementación de las tecnologías asociadas a explotar la energía latente en este tipo de campos dependen directamente de la disponibilidad del recurso geotérmico.
- Campos geotérmicos de baja entalpía: La temperatura de los fluidos no supera los 90 [°C]. Luego de ser calentados, éstos suelen ser llevados a un intercambiador de calor, con el cual es posible explotar la energía térmica presente en los fluidos. La energía extraída de este tipo de campos se usa esencialmente para actividades domésticas, urbanas o agrícolas y no para generar electricidad, ya que no se consigue un rendimiento aceptable.

Por otro lado, también se suele agrupar a los sistemas geotérmicos de acuerdo a su estructura geológica y al estado en que se encuentran los fluidos de sus reservorios:

- Sistemas de agua caliente: Poseen agua a temperaturas entre los 30 [°C] y 100 [°C]. Estos sistemas son utilizados principalmente en la agroindustria y como fuentes directas de calefacción.
- Sistemas de vapor húmedo: Contienen agua bajo presión a temperaturas sobre los 100 [°C] hasta llegar a los 350 [°C], por lo que también coexiste con vapor. Este tipo de sistemas son los más explotados en la actualidad.
- Sistemas de vapor seco: Sus reservorios producen vapor sobrecalentado, en donde el grado de sobrecalentamiento puede variar entre 0 [°C] y 50 [°C]. Estos sistemas son poco comunes en el mundo, debido a las circunstancias particulares que se deben dar en una zona determinada para su creación.
- Sistemas de rocas secas calientes: Zonas impermeables con un alto flujo calórico capaces de impedir la circulación de fluidos que pueden transportar calor. Gracias a las tecnologías más actuales de generación geotérmica, es posible crear artificialmente reservorios a los cuales se les podría inyectar agua fría y extraer agua caliente o vapor.

2.1.3 Impacto ambiental

El grado en que la explotación de energía geotérmica afecta al medio ambiente es directamente proporcional a la magnitud de dicha explotación. Uno de los mayores impactos atribuidos a una central geotérmica es el visual, ya que suelen estar ubicadas en lugares con un gran valor turístico (volcanes, termas, géiseres, entre otros).

Las emisiones de GEI producidas por una central geotérmica son sólo una pequeña fracción de la cantidad emitida por centrales térmicas y son de la misma magnitud que las de otras fuentes de energía renovables, como la solar e hidro. Si se reemplaza la energía eléctrica generada de una central térmica por una de energía geotérmica, las emisiones de GEI se ven reducidas en un 90% e incluso, como se da en la gran mayoría de los casos, pueden ser completamente eliminadas.

2.1.4 Geotermia en Chile

2.1.4.1 Antecedentes históricos

Existen más de 300 zonas de aguas termales a lo largo de la Cordillera de los Andes, asociadas a volcanismo cuaternario. La exploración geotérmica sistemática en el norte de Chile comenzó a fines del año 1968 gracias a un proyecto suscrito por la CORFO y el PNUD y fue seguida por estudios geológicos, geoquímicos y volcanológicos básicos en varias áreas geotérmicas del sur de Chile. Estos estudios, junto con los pozos perforados en el norte de Chile entre los años 1921 y 1922 (El Tatio y Puchundiza) permitieron realizar una valoración preliminar del potencial geotérmico del país por miles de [MW]. No fue hasta los inicios del año 2000, donde gracias la promulgación de la Ley 19.657 Concesiones de Energía Geotérmica que regula la otorgación de las dichas concesiones, surgió de nuevo el interés por la exploración geotérmica [3].

2.1.4.2 Disponibilidad del recurso geotérmico en Chile

Chile posee un gran potencial de generación geotérmica. Existen más de 300 fuentes de aguas termales entre los 15 [°C] y 100 [°C], más de 150 volcanes activos y una cifra similar de centros volcánicos inactivos con actividad geotérmica. Se estima un potencial bruto de 16.000 [MW] (1,2 veces más que la capacidad instalada actual).

Las zonas de Chile que manifiestan actividad geotérmica están ubicadas en áreas con una reconocida actividad volcánica actual o plio-pleistocena debido a que el país se encuentra dentro de la zona afectada por la subducción de la placa de Nazca debajo de la subducción de la placa Sudamericana, parte del denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”.

Se infiere que las fuentes de calor generadas por la actividad geotérmica se deban al magmatismo reciente. Aun así, no se deben descartar otras fuentes de calor viables, como por ejemplo, zonas de cizallamiento intenso en la corteza terrestre, las cuales también son comunes en Chile.

| | |
|---|--------------------|
| Potencial bruto | 16.000 [MW] |
| Potencial explotable estimado | 1.235 – 3.350 [MW] |
| Capacidad instalada para uso directo | 8,7 [MWt] |

Tabla 1: Potencial de energía geotérmica en Chile.

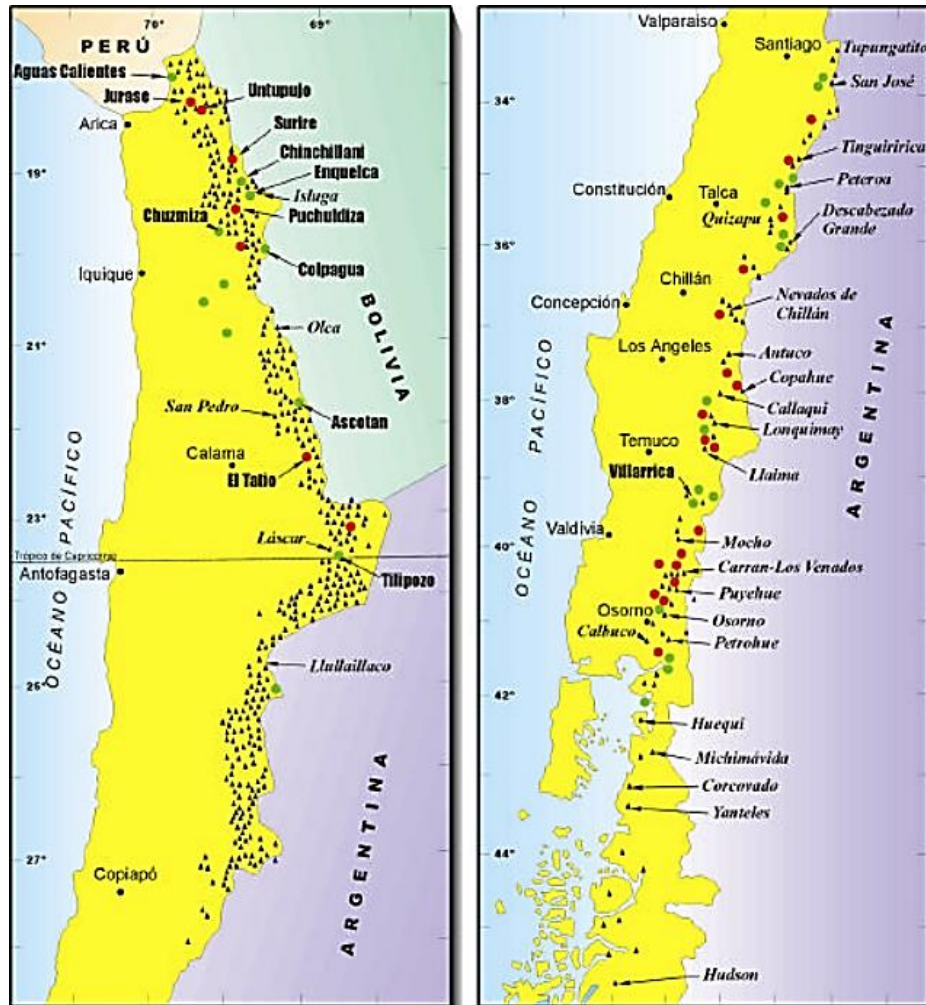


Figura 2: Ubicación de volcanes y zonas con actividad termal en Chile. Fuente: [3].

A pesar de que las exploraciones de geotermia en Chile datan desde el año 1931, no se ha llevado a cabo ningún proyecto de generación eléctrica. Esto se debe principalmente a los altos costos de exploración de campos geotérmicos e inversión en los proyectos de centrales, así como también al bajo nivel de competitividad que tiene la generación geotérmica con respecto a las fuentes de generación convencionales. Sin embargo, a la fecha hay varias compañías con proyectos en etapas avanzadas de desarrollo planeados para el año 2014.

El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) mantiene un catastro de los sitios en los cuales se estima un potencial geotérmico aprovechable energéticamente:

| Región | Comuna | Sitios | Región | Comuna | Sitios |
|---------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Primera | Putre | 5 | Séptima | Curicó | 3 |
| | Huara | 1 | | Molina | 1 |
| | Camiña | 1 | | San Clemente | 1 |
| | Colchane | 6 | | Linares | 2 |
| | Pica | 9 | | Longaví | 1 |
| | Pozo Almonte | 1 | | Parral | 1 |
| Segunda | Ollague | 1 | Octava | San Fabián | 1 |
| | Calama | 3 | | Coihueco | 1 |
| | San Pedro de Atacama | 8 | | Santa Bárbara | 7 |
| | Antofagasta | 1 | | Quilaco | 1 |
| Tercera | Diego de Almagro | 2 | Novena | Curacautín | 2 |
| | Copiapó | 3 | | Melipeuco | 1 |
| | Tierra Amarilla | 2 | | Curarrehue | 3 |
| Cuarta | Vicuña | 1 | Décima | Pucón | 7 |
| | Combarbalá | 1 | | Lanco | 2 |
| Quinta | Santa María | 2 | | Futrono | 3 |
| | San Esteban | 1 | | Panguipulli | 2 |
| Metropolitana | Colina | 1 | | Puyehue | 2 |
| | Las Condes | 1 | | Puerto Varas | 3 |
| | San José de Maipo | 5 | | Cochamó | 3 |
| Sexta | Cauquenes | 1 | | Chaitén | 6 |
| | San Fernando | 1 | | Hualaihué | 4 |
| | | | | Undécima | Cisnes |
| | | | | Río Ibañez | 2 |

Tabla 2: Sitios en Chile con potencial geotérmico.

En la zona norte del país existe una veintena de zonas con fuentes termales ubicadas entre los 18 [°S] y 24 [°S] de latitud llegando hasta los 4.000 [m.s.n.m.] de altura, alcanzando temperaturas de hasta 86 [°C] en la superficie y entre 180 [°C] y 250 [°C] debajo de ella. Algunas de estas zonas comprenden un área extensa y exhiben una considerable cantidad de manifestaciones y una alta alteración hidrotermal en las rocas adyacentes al sistema geotérmico. Las aguas presentes en estas fuentes contienen cantidades variables de SiO₂, Na, K, Ca, Mg y en menor medida de Li, Cs, As y B [4].

2.1.4.3 Legislación geotérmica chilena

La Ley N°19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmica y su respectivo Reglamento, el Decreto N°32 del Ministerio de Minería, corresponden a la normativa que dispone de las obligaciones reglamentarias a las empresas privadas sobre las actividades de exploración y explotación de energía geotérmica que deseen realizar en una concesión previamente otorgada por el Estado.

También regula las relaciones existentes entre el Estado, los dueños de territorios dentro de la concesión, las empresas concesionarias, los titulares de concesiones mineras, las partes involucradas en contratos de operación petrolera, las empresas autorizadas por ley para la exploración y explotación de hidrocarburos y los titulares de derechos de aguas.

Las características generales de las concesiones otorgables por la Ley se resumen en la siguiente tabla:

| Característica | Exploración | Explotación |
|-----------------------------|--|--|
| Superficie máxima | 100.000 [ha] | 20.000 [ha] |
| Duración | 2 años (prorrogables a 2 más) | Indefinida |
| Garantía | No tiene | Patente anual |
| Término | Caducidad del período | Patente impaga |
| | Renuncia | Renuncia |
| Titular | Persona natural chilena | Explotación no desarrollada |
| | Persona jurídica | Persona natural chilena |
| Patrimonio o capital mínimo | 5.000 UF (personas naturales) | Persona jurídica |
| | 10.000 UF (personas jurídicas) | 5.000 UF (personas naturales) |
| Técnica de asignación | Directa | 10.000 UF (personas jurídicas) |
| | Licitación (obligatoria para fuentes probables de energía) | Directa |
| | | Licitación (obligatoria para fuentes probables de energía) |

Tabla 3: Características de las concesiones puntualizadas en la Ley N°19.657.

La Ley excluye el uso de aguas termales utilizadas con fines sanitarios, turísticos o de esparcimiento [5].

2.2 Tecnologías de generación en centrales geotérmicas

2.2.1 *Single flash* (vaporización súbita)

Las centrales *single flash* conforman el pilar principal de la industria de la generación geotérmica. A menudo son las primeras centrales a instalar en campos geotérmicos dominados por líquido. Al año 2010 hay 145 centrales operativas en el mundo, lo que representa el 42% de la capacidad total instalada de energía geotérmica en el mundo [6] - [7].

La potencia instalada de las centrales que implementan esta tecnología varía entre los 3 y 90 [MW], con un promedio de 32 [MW]. Una central *single flash* típica de 30 [MW] requiere de 5-6 pozos de producción y 2-3 pozos de inyección. Estos pozos pueden ser perforados en sectores distribuidos a lo largo del reservorio o desde un punto específico usando perforación direccional a fin de abarcar una amplia zona del reservorio.

Esta tecnología se aplica principalmente en reservorios geotérmicos de vapor con una alta proporción de agua (vapor húmedo). El fluido extraído es llevado a un pozo de producción que está a una presión más baja que la del fluido, lo que provoca que la proporción de agua del fluido se evapore rápidamente (*flashing*). Luego, este vapor es utilizado para mover las turbinas de los generadores.

El proceso de vaporización puede ocurrir en los siguientes lugares:

- En el reservorio cuando el geofluido fluye a través de sus capas permeables acompañado por una caída de presión
- En cualquier parte del pozo de producción debido a la fricción y a la gravedad.
- En la entrada del separador ciclónico como consecuencia de un proceso de estrangulamiento inducido por una válvula de control.

Con el fin de aprovechar el recurso geotérmico al máximo, el pozo de producción se diseña de forma tal que el punto donde ocurre el proceso de vaporización se ubique en la boca del pozo. A medida que el campo geotérmico va desgastándose debido a la explotación continua del recurso, la presión en el reservorio va cayendo, provocando que este punto se desplace en dirección hacia el reservorio, incluso hasta llegar a ubicarse dentro del él. Mientras más lejos esté el punto de vaporización de la boca del pozo de producción, mayor es el riesgo a que el geofluido se condense al subir por el pozo y obtener vapor de pésima calidad con una alta concentración de líquido.

Una de las funciones de los pozos de inyección es la de disminuir dicho desgaste, devolviendo los residuos del proceso de generación energética que ocurre en la central al reservorio.

La siguiente imagen muestra un esquema simple de los equipos empleados en una central *single flash*:

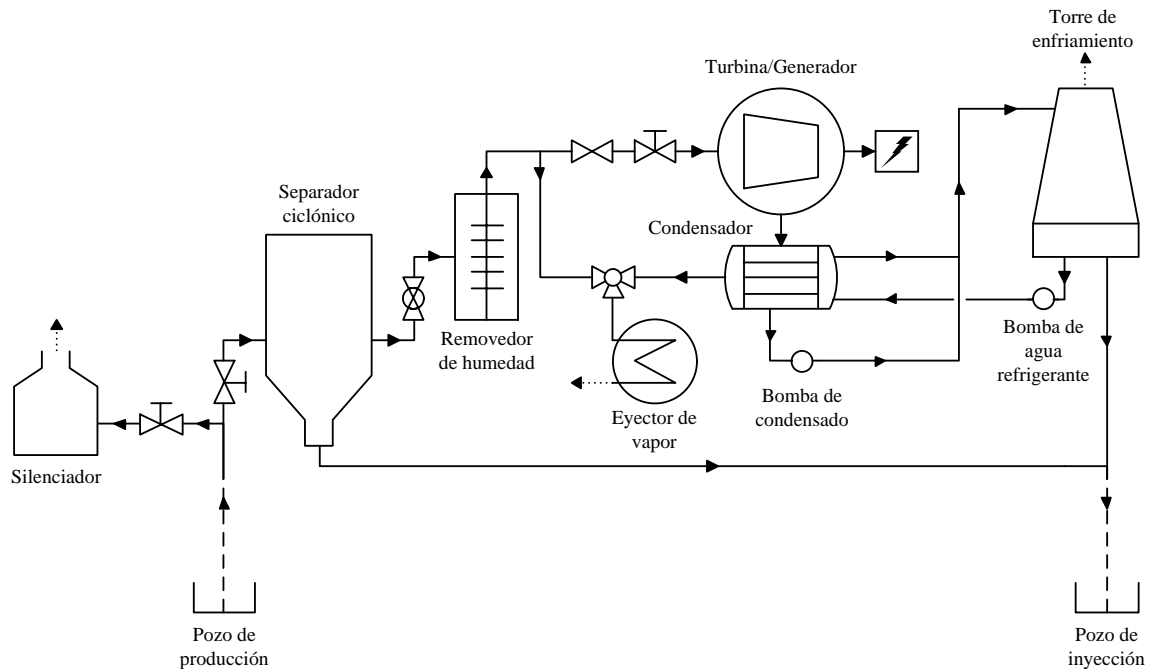


Figura 3: Ciclo esquemático de una central *single flash*.

En cada pozo de producción hay instalados un conjunto de equipos encargados de controlar y monitorear el flujo del geofluido desde el pozo hasta la planta generadora, tales como válvulas de control, silenciadores (separadores ciclónicos simples utilizado en emergencias para evacuar vapor) e instrumentación (medidores de presión y de temperatura).

El geofluido es despresurizado por el sistema de válvulas ubicado en la boca del pozo hasta alcanzar la presión de operación del separador ciclónico y entra a éste en dirección tangencial. El separador ciclónico es el encargado de separar y filtrar las fases líquida y gaseosa del geofluido. El líquido presente en el geofluido contiene una alta concentración de minerales, pudiendo causar escalamiento y/o erosión en las tuberías y

en la turbina si no es filtrado correctamente. El vapor es extraído desde el centro del separador para ser enviado hacia el grupo turbina-generator, mientras que el líquido es devuelto al reservorio a través de un pozo de inyección. En la salida de vapor se encuentra instalada una válvula de bola, la cual se encarga de regular la presión dentro del separador.

En las tuberías comprendidas entre el separador ciclónico y la turbina, suelen aparecer gotas de condensación a lo largo de ellas. Existe un alto grado de humedad en las tuberías a medida que la temperatura disminuye. Para mantener la calidad del vapor que entra a la turbina, se emplea un removedor de humedad para remover estas gotas del vapor.

El vapor que entra a la turbina es esencialmente vapor saturado a una presión moderada o baja, lo que es completamente distinto de una central térmica convencional, en las cuales se utiliza vapor altamente sobrecalentado.

Para condensar el vapor, la mayoría de las centrales geotérmicas emplean condensadores de superficie (*surface-type condensers*) ya que son aptos para mantener el vapor geotérmico física y químicamente separado del líquido de enfriamiento. El vapor circula por el armazón del condensador mientras que el líquido lo hace por los tubos. Esto ayuda a llevar a cabo de forma más efectiva el tratamiento y eliminación de

gases no condensables presentes en el vapor geotérmico. Para esto se emplean eyectores de chorros de vapor y/o bombas de vacío.

El líquido de enfriamiento es proporcionado por una torre de enfriamiento a partir de la recirculación de una fracción del vapor condensado después de haber sido enfriado parcialmente.

La tecnología *flash steam* es una de las más utilizada en la actualidad debido a que los reservorios de vapor húmedo son más numerosos que los de vapor seco. Sin embargo, esta tecnología se encuentra condicionada a reservorios de temperatura elevada y con forma de acuífero confinado, por lo que su potencial de aplicación se ve marcadamente reducido.

Las centrales *single flash* no requieren de un suministro significativo de agua de enfriamiento, lo que resulta ser una ventaja en zonas áridas, en las cuales suelen estar ubicados los reservorios geotérmicos y existe escasez de agua fresca. De todas maneras, aun así se requiere una exigua cantidad de agua como reemplazo en casos de purga para remover sólidos acumulados.

2.2.2 *Double flash* (vaporización súbita doble)

Las centrales *double flash* son una mejora de las centrales *single flash*, capaces de generar entre un 15 y un 25% más de energía con un geofluido en las mismas

condiciones. La diferencia fundamental entre una tecnología y otra radica en el segundo proceso de vaporización aplicado al líquido que sale del separador primario con el fin de generar vapor adicional, aunque a una presión más baja que la del vapor primario. Estas centrales representan el 20% del total de centrales geotérmicas instaladas en el mundo [6]- [7].

Las centrales que implementan esta tecnología son más complejas, más costosas y requieren de un mayor mantenimiento, pero la energía adicional que generan justifica la instalación de dichas centrales.

La Figura 4 muestra un esquema simplificado de una central *double flash*:

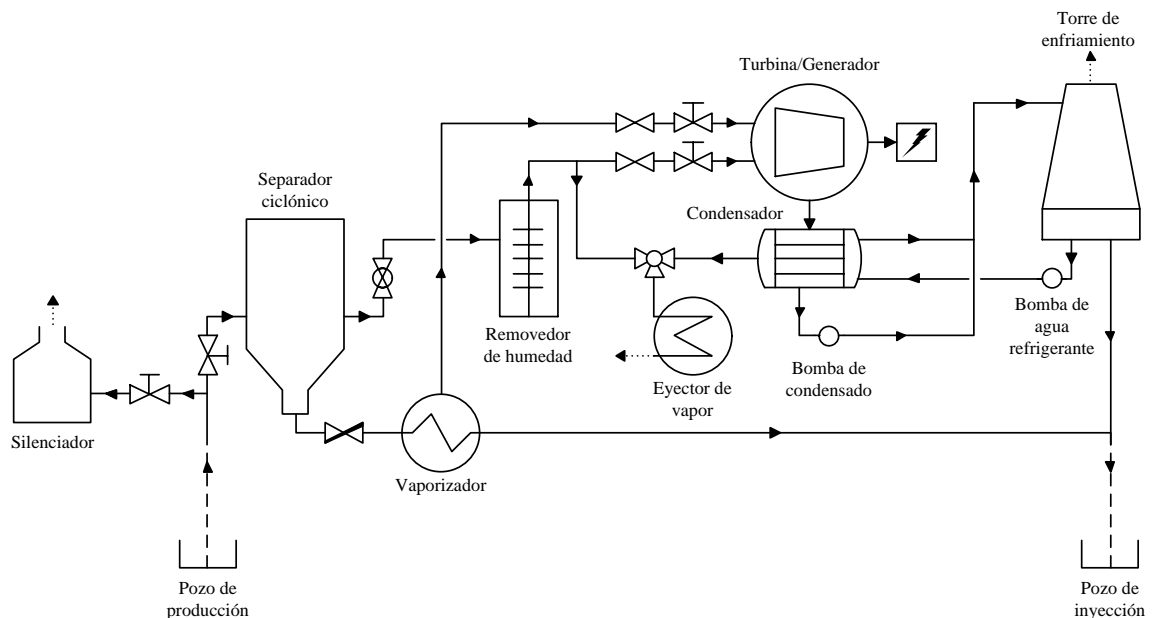


Figura 4: Ciclo esquemático de una central *double flash*.

El líquido separado que en un principio era desechado o devuelto al reservorio, ahora es enviado a un vaporizador por el que sale una línea de vapor a baja presión que va directamente a la turbina como complemento a la línea de alta presión que sale del separador. La turbina es una máquina de doble entrada con un sólo flujo de salida en donde el vapor de baja presión es añadido apropiadamente a la línea de vapor principal para ser combinado sin problemas con el vapor de alta presión. Es necesario destacar que existen otras configuraciones para el sistema de conversión energética de las centrales *double flash*.

2.2.3 *Dry steam* (vapor seco)

Las centrales de vapor seco son técnicamente más simples y menos costosas que aquellas que emplean tecnologías de vaporización debido a que su principio de funcionamiento se basa en explotar vapor extraído directamente del reservorio, sin tener que tratar con la salmuera que extraen dichas centrales. Es por esto que estas centrales son instaladas sobre depósitos naturales dominados por vapor, en los cuales hay una baja proporción de agua. El 26% de la cantidad de centrales geotérmicas instaladas en el mundo emplean la tecnología de vapor seco, con tamaño promedio de 31 [MW] por central [6].

Los pozos de producción se perforan hasta la parte más baja de la capa de agua, por lo que el vapor extraído viene altamente presurizado. El vapor es inyectado

directamente a las turbinas del generador eléctrico a través de un ducto de succión. Las turbinas están compuestas por álabes de impulso-reacción a presión única y, dependiendo del tamaño de la central, pueden tener una sola entrada de flujo (para unidades de hasta 60 [MW]) o una doble (para unidades sobre 60 [MW]). Para unidades pequeñas, es conveniente que la turbina y el condensador estén lado a lado en vez de la disposición usual del condensador debajo de la turbina.

Cuando el vapor llega al sistema de conversión de energía de la central, ésta funciona igual como una central *single flash*. En el esquema simplificado mostrado en la siguiente figura se puede observar que la línea de flujo es idéntica a la del ciclo *single flash*, con la sola excepción de que el separador ciclónico es reemplazado por un removedor de material particulado. El calor perdido en el proceso es ventilado mediante torres de enfriamiento.

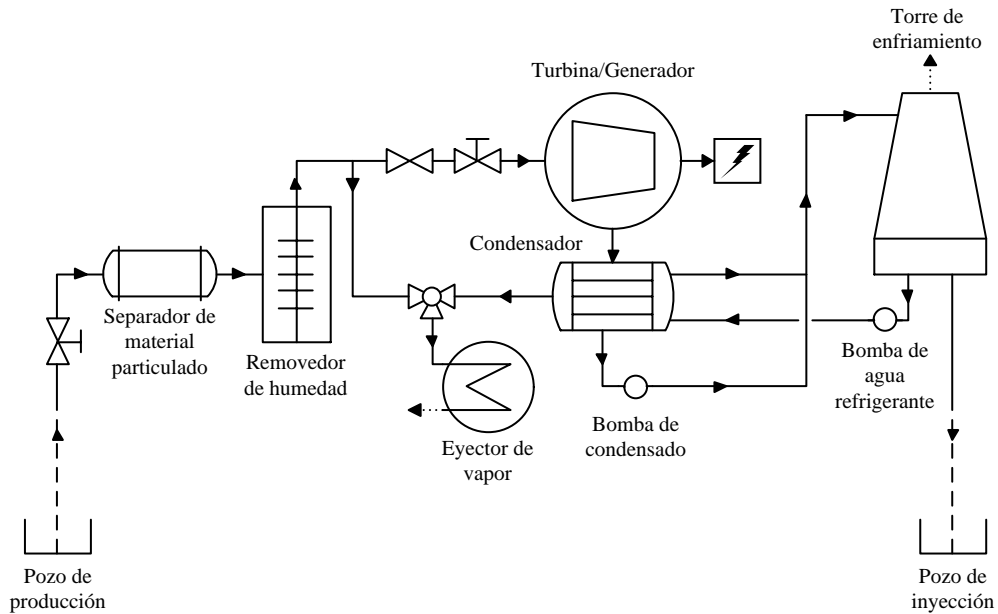


Figura 5: Ciclo esquemático de una central *dry steam*.

La eficiencia y rentabilidad de las centrales de vapor seco dependen de la presión que los gases no condensables (tales como hidrógeno, dióxido de carbono y ácido sulfúrico) ejercen sobre las turbinas generadoras. A su vez, la eliminación sustentable de estos gases también aumenta los costos de operación de la central.

2.2.4 Ciclo binario

Esta tecnología es empleada en centrales que dependen de un recurso geotérmico insuficiente para generar vapor con la temperatura ideal, tales como campos geotérmicos de baja y mediana entalpía o uno que contiene fluidos con demasiadas impurezas químicas que impiden la evaporación como, por ejemplo, agua con una alta

concentración de sal disuelta. Se basa en utilizar la energía térmica del vapor para poner sistemas de turbinas generadoras en operación [6].

Los generadores hacen circular el fluido extraído del reservorio geotérmico por un intercambiador de calor en donde se encuentra otro fluido de punto de ebullición mucho más bajo que el agua (por lo general es un compuesto orgánico) formando el vapor necesario para impulsar las turbinas del generador. Los fluidos más utilizados son propano (C_3H_8), isobutano (C_4H_{10}), pentano (C_5H_{12}), amoníaco (NH_3) y clorofluorocarbonos como Freon™ y Frigen™. Este proceso se denomina como Ciclo de Rankine orgánico.

Posteriormente, el vapor es llevado nuevamente al intercambiador de calor en donde es condensado para ser reutilizado.

El factor de planta de esta tecnología ronda entre un 80% y un 95%. La eficiencia de conversión energética va entre un 16% y un 54% en generación térmica y entre un 8% y 15% en generación eléctrica.

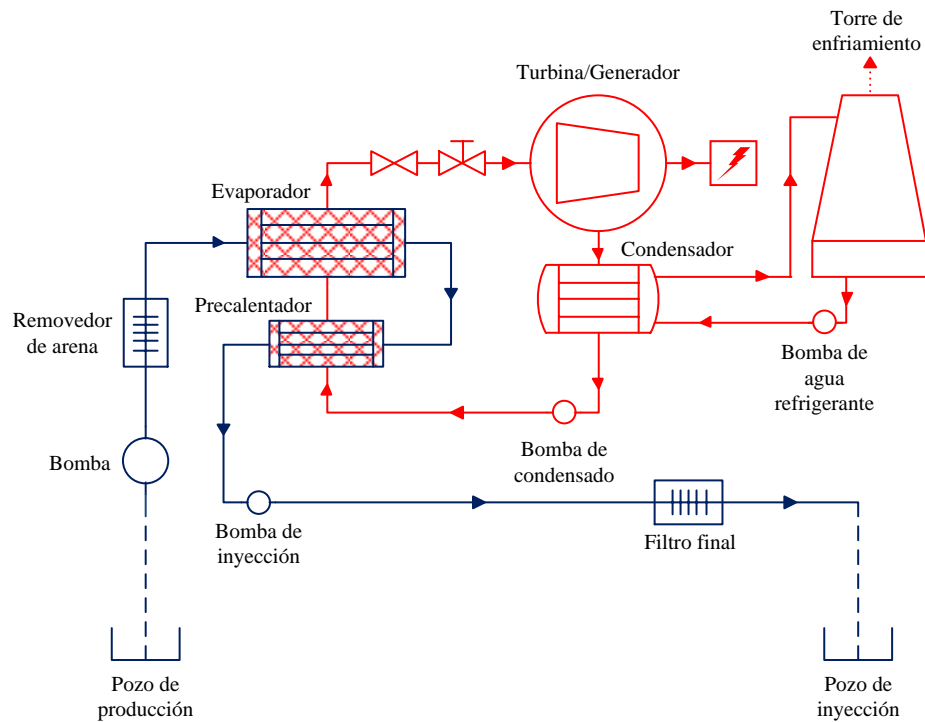


Figura 6: Esquema de una central de ciclo binario.

Las centrales binarias, desde un punto de vista termodinámico, son el tipo de central geotérmica más similar a una térmica convencional principalmente debido a que el fluido de trabajo es sujeto a un ciclo cerrado de operación, a diferencia de las centrales *flash* que se encargan de devolver el fluido al reservorio.

El fluido de trabajo recibe calor del geofluido hasta evaporarse, se expande dentro de la turbina y se condensa para ser devuelto al evaporador a través de una bomba de alimentación.

El proceso de calentamiento del fluido de trabajo consta de dos etapas: primero, el fluido alcanza su punto de evaporación en el precalentador y luego se convierte en vapor saturado en el evaporador.

En todo el proceso, el geofluido se mantiene siempre a una temperatura y presión tales que evitan escalamiento en el sistema de tuberías y en el precalentador.

Las turbinas usadas en centrales geotérmicas deben estar construidas con materiales resistentes a la corrosión debido a la presencia de gases capaces de degradar el acero ordinario.

2.2.5 EGS (sistema geotérmico mejorado)

La tecnología EGS (*Enhanced Geothermal System*) se diferencia de las anteriores en el hecho de explotar reservorios geotérmicos de alta entalpía en donde la cantidad de fluidos y la permeabilidad de las rocas son bajas.

Los reservorios EGS son creados al perforar un pozo de inyección en la roca caliente por donde se bombea un fluido de alta presión (que por lo general es agua), fracturándola y aumentando la presión natural de los fluidos en la roca para así mejorar la permeabilidad de dicho sistema geotérmico. Al igual que en los reservorios convencionales, las profundidades de los pozos implementados en la tecnología EGS van desde los 3 a los 10 [km].

El fluido fluye a través de las rocas fracturadas, acumulando calor en el proceso, y sale del reservorio por pozos de producción. Luego, en la superficie, el fluido es enviado a las turbinas para generar electricidad. Luego de ser utilizado, el fluido es devuelto al reservorio por un pozo de inyección, completando el ciclo de circulación. En el caso de que la central generadora emplee un ciclo binario cerrado en la generación de electricidad, los fluidos extraídos no son liberados a la atmósfera.

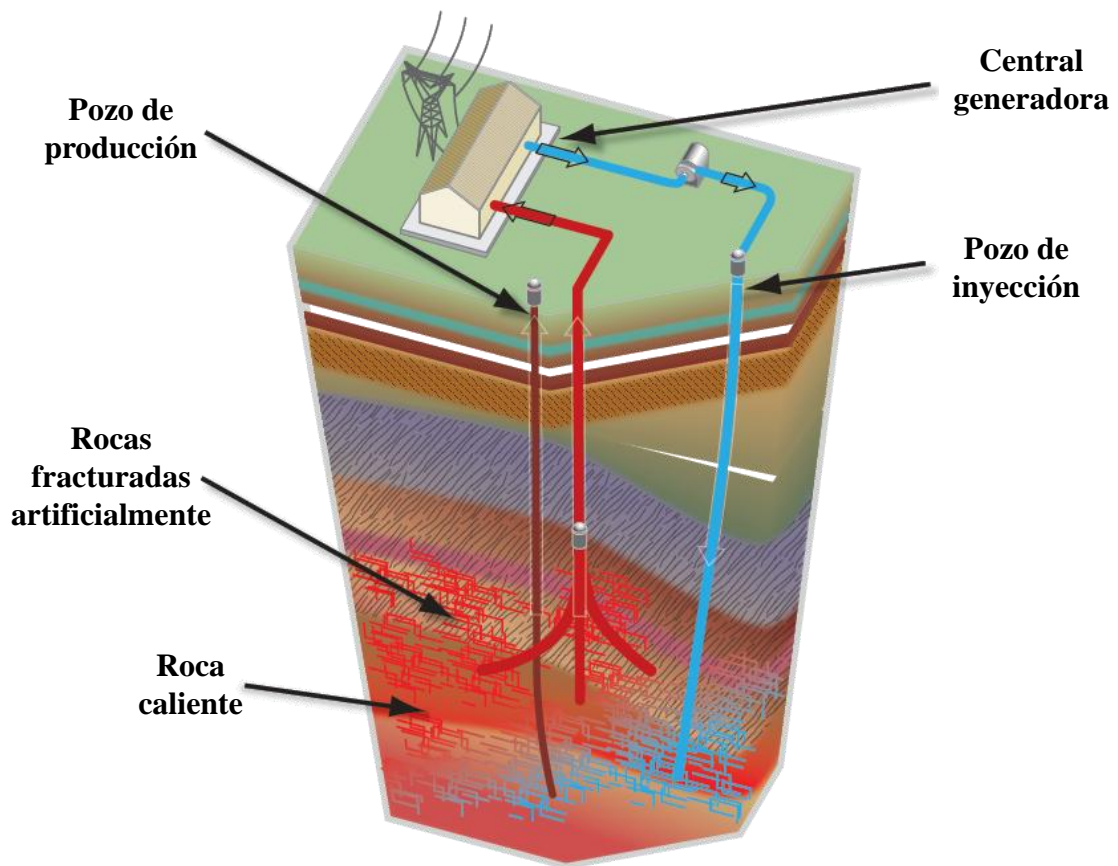


Figura 7: Diagrama de corte de un sistema geotérmico mejorado. Fuente: [8].

La tecnología EGS incrementa la productividad de un potencial reservorio geotérmico y extiende la vida útil de los ya existentes para así establecer un técnica que

asegure la continuidad de los recursos geotérmicos, desde los reservorios hidrotermales convencionales hasta los del roca seca caliente. El propósito de fondo de esta tecnología es la de emular la productividad de un sistema geotérmico viable en lugares que no posean las características naturales de uno [8].

Los sistemas EGS son versátiles, intrínsecamente modulares y escalables desde 1 hasta 50 [MW], lo que permite que sea utilizada en aplicaciones diversas de generación distribuida como para parques generadores. Por otra parte, también pueden ser implementados en aplicaciones de calefacción a gran escala y de calefacción y generación combinada sin necesidad de tener un sistema de almacenamiento in situ. Para otras opciones de energías renovables (solar, eólica, hidro) estos usos no son posibles. Por otro lado, los estudios de desarrollo tanto de los recursos hidrotermales y de los recursos EGS se complementan entre sí; el perfeccionamiento de los procesos de perforación y de conversión de energía, así como también tener un mejor entendimiento de la estructura de la roca fracturada y de las propiedades del fluido en el reservorio beneficia el desarrollo de todos los escenarios de generación geotérmica [9].

Capítulo 3 Control en centrales generadoras

3.1 Control de frecuencia

A continuación se mencionarán los alcances de los componentes principales que conforman el control de frecuencia de un sistema eléctrico de potencia.

La regulación de frecuencia está estrechamente vinculada con el balance entre la producción y el consumo de potencia activa. Por esto, un cambio en la potencia demandada en un punto determinado de la red se manifiesta en todo el sistema como un ajuste de la frecuencia. Los gobernadores de velocidad se encargan de que los generadores satisfagan estos cambios de demanda de forma que se mantenga el balance de potencia activa.

Los gobernadores isócronos ajustan la posición de la válvula para regular el flujo de vapor que pasa por la turbina y, en consecuencia, controlar la potencia entregada por la turbina y así llevar la frecuencia a su valor nominal o programado. Con este tipo de gobernador, el generador alcanza un nuevo estado estacionario solamente cuando la desviación de frecuencia es igual a cero, lo que los hace idóneos para controlar frecuencia en sistemas aislados donde un único generador alimenta la carga [10].

En cambio, en un sistema con más de una unidad generadora conviene utilizar gobernadores con regulación en lugar de un gobernador isócrono, debido a que se requiere que los generadores compartan carga. Los gobernadores isócronos no pueden ser usados cuando hay dos o más generadores conectados al mismo sistema ya que tendrían que tener exactamente la misma configuración de velocidad. En caso contrario, cada gobernador trataría de controlar la frecuencia del sistema de acuerdo a propia configuración [11].

En un sistema aislado, el comportamiento dinámico del sistema es más susceptible a los cambios de carga debido a que no existe un respaldo adicional en frecuencia por parte de sistemas vecinos. En ausencia de un gobernador de velocidad, la respuesta del sistema ante variaciones de carga depende de la constante de inercia de los generadores (H) y de la constante de amortiguamiento de la carga (D). La variación de velocidad en régimen permanente es tal que el cambio en la carga queda totalmente compensado por la variación de carga dependiente de la frecuencia.

Los incrementos de frecuencia pueden producir embalamiento en las partes rotatorias de los generadores conectados al sistema, mientras que las disminuciones pueden provocar esfuerzos excesivos en los generadores incitados por oscilaciones bruscas. Todas las unidades que participan en el control de frecuencia deben contribuir al cambio total en la generación del sistema, independiente del lugar en dónde varió la carga.

3.1.1 Lazos de control de frecuencia

El control de frecuencia en sistemas de potencia se divide en dos lazos principales de control:

- El lazo primario de control lleva a cabo el reajuste inicial de frecuencia. La acción de los gobernadores de velocidad de las unidades que participan en el control de frecuencia permite que los generadores sigan las variaciones de la carga y la comparten de acuerdo con su regulación. Los tiempos de respuesta de este lazo están limitados sólo por los retrasos intrínsecos de las turbinas y de sus componentes. Dependiendo del tipo de turbina, el lazo primario de control opera en un rango de tiempo típico de 2 a 30 [s].
- El lazo secundario de control se conoce por el nombre de Control Automático de Generación (AGC). El AGC efectúa el ajuste fino de la frecuencia al cambiar el valor de las potencias de referencia de las unidades generadores que participan en el control de frecuencia por medio de una acción de control integral hasta que el error de la frecuencia en el sistema sea igual a cero. Este lazo es comparativamente mucho más lento y entra en operación únicamente cuando el lazo primario de control ya ha actuado. El tiempo de respuesta del lazo es del orden de un minuto.

Los lazos primario y secundario basan sus decisiones de control en el error de frecuencia, el cual puede ser medido directamente desde las centrales generadoras, por lo que pueden ser implementados de forma local en ellas.

El componente principal del CPF corresponde a la unidad generadora de las centrales de energía eléctrica. La siguiente tabla muestra las magnitudes de tiempo típicas de los transitorios eléctricos y mecánicos para unidades de generación térmicas:

| | | Intervalo de tiempo [s] |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Transitorios eléctricos | Transitorios de estator | 0,04 – 0,35 |
| | Transitorios de rotor | 0,4 – 1,8 |
| | Subtransitorios | 0,02 – 0,05 |
| Transitorios mecánicos | Transitorio inercial | 2,5 – 10 |

Tabla 4: Constantes de tiempo de los transitorios en unidades térmicas

Los transitorios eléctricos de los generadores sincrónicos que forman parte de dichas unidades son muy rápidos en comparación con el período de interés de un estudio de control de frecuencia, mientras que los transitorios mecánicos están dentro del período de interés.

Por lo previamente presentado, los objetos principales de estudio en esta memoria son aquellos que representan los transitorios mecánicos de la unidad generadora, es decir, el generador sincrónico, las turbinas y los gobernadores de velocidad del rotor y se analizará la acción del lazo primario de control, dejando fuera del campo de estudio la acción del lazo secundario [10].

3.2 Sistemas de control en generadores sincrónicos

En esta sección se expondrán los sistemas de control de tensión y de potencia activa implementados en el modelo de una unidad generadora, los cuales cumplen con la función de que ésta opere de forma estable en base a las siguientes condiciones [12]:

- La tensión en los terminales de todos los dispositivos eléctricos de una unidad generadora tales como transformadores, motores, entre otros, deben estar dentro de límites aceptables debido a que éstos son diseñados en base a una tensión nominal a partir de la cual se define un rango de tensiones de operación bajo los cuales no experimentarán daños.
- La frecuencia eléctrica del sistema está asociada a la velocidad de rotación de las máquinas sincrónicas, por lo que es necesario mantener el sistema sin aceleraciones.
- Las partes mecánicas de los generadores y turbinas que forman parte de las unidades generadoras están diseñadas para trabajar en rangos definidos de frecuencia y potencia. Si dichos rangos son transgredidos, se merma la vida útil de estos elementos.

3.2.1 Gobernadores de velocidad

Los gobernadores de velocidad cumplen con la función de regular la velocidad angular de la máquina a través de un control sobre la potencia mecánica de la turbina. Esto se logra mediante el ajuste de las posiciones de la o las válvulas de control que regulan el flujo de vapor que va hacia la turbina.

Un esquema básico de un gobernador de velocidad se muestra en la siguiente figura [13]:

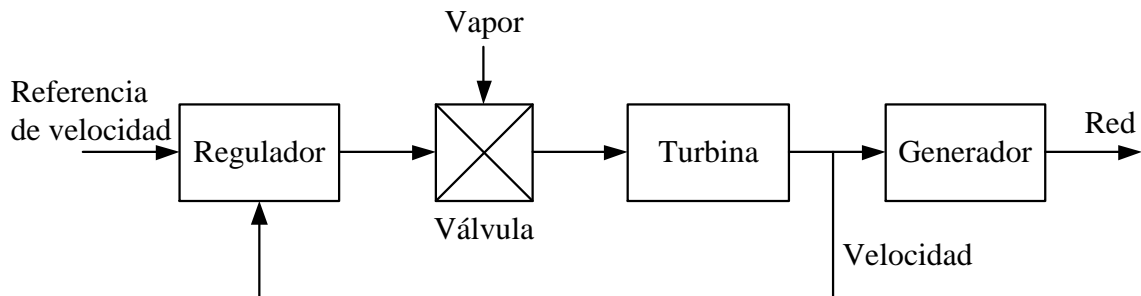


Figura 8: Esquema general de un gobernador de velocidad.

3.2.1.1 Modelo IEEEESGO

Este modelo corresponde al de un gobernador de velocidad estándar desarrollado por la IEEE. Ofrece una buena representación de una turbina de vapor. En este caso, no existen etapas de recalentamiento y hay una sola turbina de alta presión, por lo que los parámetros asociados valen cero [14].

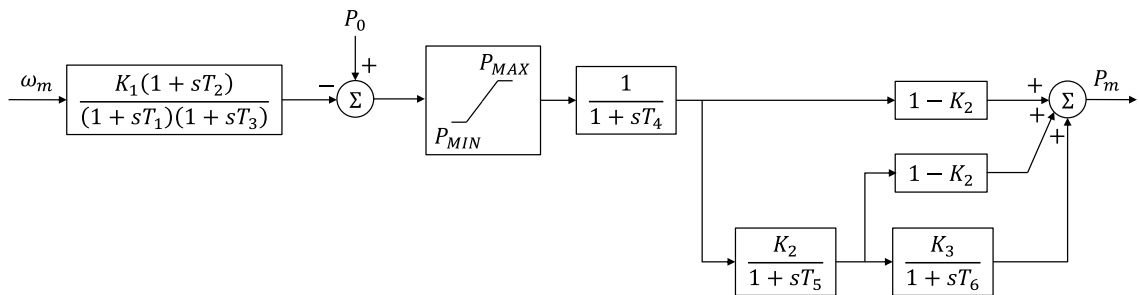


Figura 9: Diagrama de bloques del gobernador de velocidad IEEESGO.

La siguiente tabla sintetiza las descripciones de los parámetros de este modelo:

| Parámetro | Descripción |
|-----------|--|
| K_1 | Ganancia del gobernador. |
| T_1 | Constante de tiempo del gobernador. |
| T_2 | Constante de tiempo derivativa del gobernador. |
| T_3 | Constante de tiempo del servomotor. |
| T_4 | Constante de tiempo del domo de vapor y de tubería de entrada. |
| K_3 | Factor de la turbina de baja presión. |
| T_6 | Constante de tiempo de la turbina de baja presión. |
| K_2 | Factor de la turbina de alta presión. |
| T_5 | Constante de tiempo del recalentador. |
| P_N | Potencia nominal de la turbina. |
| P_{MIN} | Potencia generada mínima. |
| P_{MAX} | Potencia generada máxima. |

Tabla 5: Descripción de los parámetros del modelo IEEESGO.

3.2.2 Reguladores de tensión

Los reguladores de tensión se encargan de monitorear la señal de tensión de salida del generador y de mantenerlo dentro de rango aceptable de operación previamente definido. Se encarga de analizar cualquier desviación con respecto al valor

de referencia para restablecerla a dicho valor a través de la excitación, ayudando a corregir la tensión de excitación y así reducir las oscilaciones del rotor.

3.2.2.1 Modelo ESAC5A

Este modelo corresponde a un modelo simplificado de regulador de tensión diseñado para sistemas de excitación *brushless*. El regulador es alimentado por una fuente, como un generador de imanes permanentes, que no se ve afectada por perturbaciones en el sistema.

Debido a que este modelo es empleado ampliamente en la industria, hay veces en que es utilizado para representar otros sistemas de excitación de los que no se tiene información detallada o cuando se requieren modelos simplificados [15] - [16].

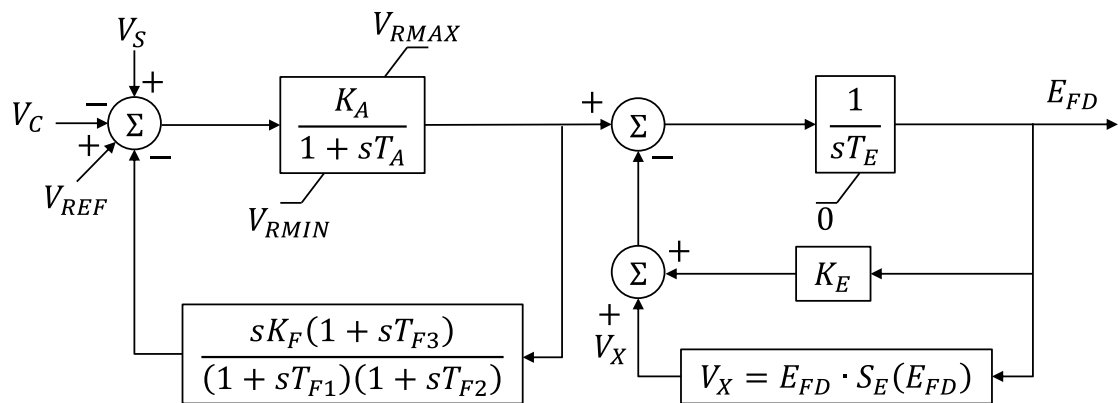


Figura 10: Diagrama de bloques del sistema de excitación ESAC5A.

La Tabla 6 recopila las descripciones de cada uno de los parámetros de este regulador de tensión:

| Parámetro | Descripción |
|------------------|--|
| K_A | Ganancia del controlador. |
| T_A | Contante de tiempo del controlador. |
| K_E | Constante proporcional del excitador. |
| T_E | Constante de tiempo del excitador. |
| K_F | Ganancia del lazo de retroalimentación. |
| T_{F1} | Primera constante de tiempo del lazo de retroalimentación. |
| T_{F2} | Segunda constante de tiempo del lazo de retroalimentación. |
| T_{F3} | Tercera constante de tiempo del lazo de retroalimentación. |
| E_{FD} | Tensión de salida del excitador. |
| $S_E(\cdot)$ | Función de saturación del excitador |
| V_{RMIN} | Tensión mínima de salida. |
| V_{RMAX} | Tensión máxima de salida. |

Tabla 6: Descripción de los parámetros del modelo ESAC5A.

3.3 Control Primario de Frecuencia en la Norma Técnica

Los Centros de Despacho Económico de Carga (CDEC) de cada sistema interconectado son los encargados de adoptar todas las medidas necesarias para mantener la frecuencia constante, con el fin de evitar la pérdida de sincronismo de las unidades generadoras conectadas al sistema.

La Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS) define los siguientes conceptos básicos relacionados con el tema a analizar:

- **Control de Frecuencia:** Conjunto de acciones destinadas a mantener la frecuencia de operación dentro de una banda predefinida en torno a la frecuencia de referencia, corrigiendo los desequilibrios instantáneos entre la potencia generada y la potencia demandada de un sistema interconectado.
- **Controlador de Velocidad:** Dispositivo que permite el control de la frecuencia de una unidad generadora detectando las desviaciones instantáneas de la velocidad con respecto a un valor de referencia, actuando directamente sobre el sistema de mando de la máquina motriz.
- **Control Primario de Frecuencia:** Acción de control ejercida rápidamente sobre la frecuencia de un sistema interconectado a través de equipos instalados en las unidades generadoras que permiten modificar en forma automática su producción.

- Control Secundario de Frecuencia: Acción manual o automática destinada a compensar el error final de frecuencia resultante de la acción del Control Primario de Frecuencia que ejercen los controladores de velocidad de las unidades generadoras dispuestas para tal fin.
- Reserva Primaria: Reserva destinada a corregir las desviaciones instantáneas de la generación respecto de la demanda real del sistema interconectado.
- Reserva Secundaria: Reserva destinada a compensar, durante períodos de actuación menores a 15 minutos, las desviaciones reales de la demanda y la generación respecto de los valores previstos en la programación de la operación del sistema interconectado.

En relación a las exigencias mínimas que debe cumplir el Controlador de Velocidad de cada unidad generadora que participe del CPF, éstas son especificadas en el artículo 3-18 de la NTSyCS y se mencionan a continuación:

- Para unidades térmicas, el estatismo debe estar entre 4% a 8% ajustable durante la operación de la unidad con carga. Se exceptúan las unidades impulsadas por turbina de vapor debido a que éstas pueden requerir una detención completa de la máquina primaria para modificar el valor del estatismo.
- Banda muerta inferior a 0,1% del valor nominal de la frecuencia (± 25 [mHz]).
- Tiempo máximo de establecimiento igual a 30 [s]. Para la operación en isla las unidades deberán contar con cambio automático de ajustes de parámetros

El artículo 5-44 puntualiza que la frecuencia mínima admitida en instalaciones del Sistema de Transmisión Troncal es de 48,3 [Hz], aceptándose en instalaciones de Sistemas de Subtransmisión o Sistemas de Transmisión Adicional, un descenso transitorio de la frecuencia por debajo de 48,3 [Hz] durante un tiempo inferior a los 200 [ms] [17].

Como criterio adicional de estabilidad, el artículo 5-53 de la NTSyCS impone un ángulo de rotor máximo de 120 [°] como margen de seguridad.

En el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), todas las unidades generadoras participan en el CPF, salvo las unidades tipo motor (diesel, *fuel oil*). En particular, las centrales de vapor y de gas son las encargadas de mantener la estabilidad de frecuencia en este sistema [18].

Para determinar el aporte de las centrales geotérmicas al CPF, se verificará que éstas sean capaces de restablecer la frecuencia por sobre los 48,3 [Hz] antes de los 30 [s] impuestos por la autoridad para restablecer el sistema cuando ocurre una contingencia. No se verificará el hecho de que la frecuencia recupere su valor original, debido a que esto es función del Control Secundario de Frecuencia.

Capítulo 4 Modelo dinámico de una central geotérmica

En el siguiente capítulo se describirá en detalle la modelación dinámica de las unidades geotérmicas a instalar en la central de estudio con el objeto de determinar su aporte al CPF.

4.1 Antecedentes existentes

En las bases de datos actuales de los CDEC de los sistemas interconectados de Chile, no existen todavía modelos válidos de centrales geotérmicas. Sin embargo, se encontró un modelo de generador geotérmico en el Estudio de Transmisión Troncal de 2010 empleado para representar centrales de este tipo en planes de obras futuras. Este modelo se usa como base para crear los generadores de las unidades geotérmicas, siendo mejorado con la adición de bloques de control.

El artículo 3-15 de la NTSyCS sólo obliga a implementar un Estabilizador de Potencia (PSS) en el caso de que ésta provoque oscilaciones indeseadas de potencia y, dado que la potencia instalada de la central geotérmica es menor a 50 [MW], no se considera necesario implementar un modelo de PSS. Además, cabe destacar que no se encontraron antecedentes en la literatura revisada de que las centrales geotérmicas causen oscilaciones de tales características [6].

En general, en lo que se refiere a los controladores a implementar en el modelo de la unidad generadora, es imperativo mencionar que existe un gran número de modelos predefinidos, incluyendo versiones estándar presentadas por el IEEE. El *software* DIGSILENT PowerFactory posee una extensa librería que contienen los modelos más utilizados en la industria. Con ellos es posible obtener resultados aceptables al ser provisto por parámetros acordes.

4.2 Elección de la tecnología geotérmica de generación eléctrica

Uno de los requisitos fundamentales que debe cumplir un central generadora para participar en el Control de Frecuencia es el de tener la capacidad de variar la potencia generada por la o las turbinas con el fin de mitigar las variaciones en la frecuencia dentro del tiempo exigido por la NT. Para ello se requiere tener una reserva del recurso energético utilizado en la generación, el cual corresponde al vapor en el domo para las centrales térmicas. En relación a esto, se debe enfatizar que la disponibilidad del recurso geotérmico es inmediata, por ello, las tecnologías actuales de generación no implementan dispositivos de almacenamiento de vapor ya que lo óptimo es utilizar el geofluido apenas es extraído del reservorio.

Cada tecnología aborda de formas distintas este problema. Las centrales *dry steam* explotan el fluido geotérmico apenas es extraído del reservorio. No existen

dispositivos de almacenamiento de vapor en este tipo de centrales, por lo que esta tecnología queda descartada para controlar frecuencia.

Similarmente, se llega a la misma conclusión con las centrales binarias, ya que tampoco cuentan con una reserva de vapor. Además, las potencias instaladas de las unidades generadoras en cada pozo de producción son relativamente bajas.

Sólo las centrales *single flash* y *double flash* son capaces de variar el flujo de vapor de entrada a la turbina por medio del separador ciclónico. Cabe destacar que ésta no es la función principal del separador, por lo que un uso desmedido fuera de sus capacidades podría afectar su funcionalidad. En sentido estricto, es necesario plantear un nuevo diseño de separador ciclónico que sea capaz de almacenar vapor y responder ante los requerimientos de variaciones de potencia.

La siguiente figura muestra un sistema de control sobre el flujo de vapor por parte del separador ciclónico:

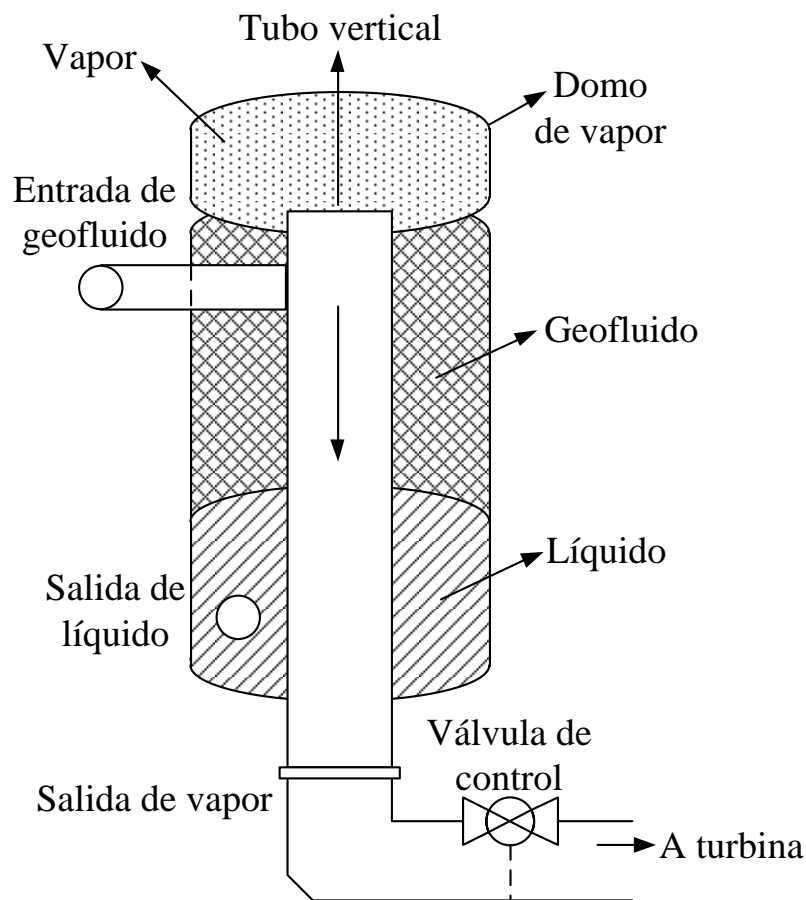


Figura 11: Separador ciclónico adaptado.

El vapor es recolectado desde el centro del separador a través de un tubo vertical, el cual emerge desde el fondo de él. El flujo de vapor es regulado por medio de la válvula de control ubicada en la tubería que conecta la salida del separador con la turbina, mientras que la posición de dicha válvula es controlada con el controlador de velocidad de la unidad geotérmica.

Es necesario crear una sección especial en el separador ciclónico que cumpla con la función de un domo de vapor de una central térmica convencional, es decir, que

guarde una reserva de vapor con el objeto de ser utilizada para ajustar la potencia entregada por la turbina ante variaciones de la carga del sistema. Este “domo” debe ser construido con materiales resistentes a la corrosión provocada por el vapor geotermal almacenado y contar con revisiones y mantenciones periódicas para asegurar un continuo funcionamiento.

Para el alcance de esta memoria, el modelo del separador ciclónico será simplificado. Sólo se considerará el retardo temporal de la válvula de control ubicada en la salida del separador para ser incluido como uno de los parámetros del gobernador de velocidad.

4.3 Modelo adaptado a Control de Frecuencia

Para definir por completo el modelo dinámico de las unidades generadoras se utilizará la metodología de diseño implementada por el Instituto Costarricense de Electricidad, uno de los referentes en tecnologías de geotermia de la región. Dicha metodología consiste en el uso de modelos típicos especificados por el IEEE¹ en los controladores de tensión y velocidad de la unidad geotérmica. Esto se aplica, en particular, en las unidades 1, 2 y 3 de la central Miravalles de Costa Rica, central usada como referencia para la creación del modelo utilizado en este estudio. En consecuencia,

¹ *Institute of Electrical and Electronics Engineers* o Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos en español.

se usarán modelos típicos empleados en centrales térmicas para modelar una central geotérmica *single flash*.

De acuerdo a la información obtenida sobre especificaciones de equipos disponible, se simplificará el ciclo de trabajo de la central *single flash* para sólo tomar en cuenta los equipos que participan de forma directa en el control de frecuencia:

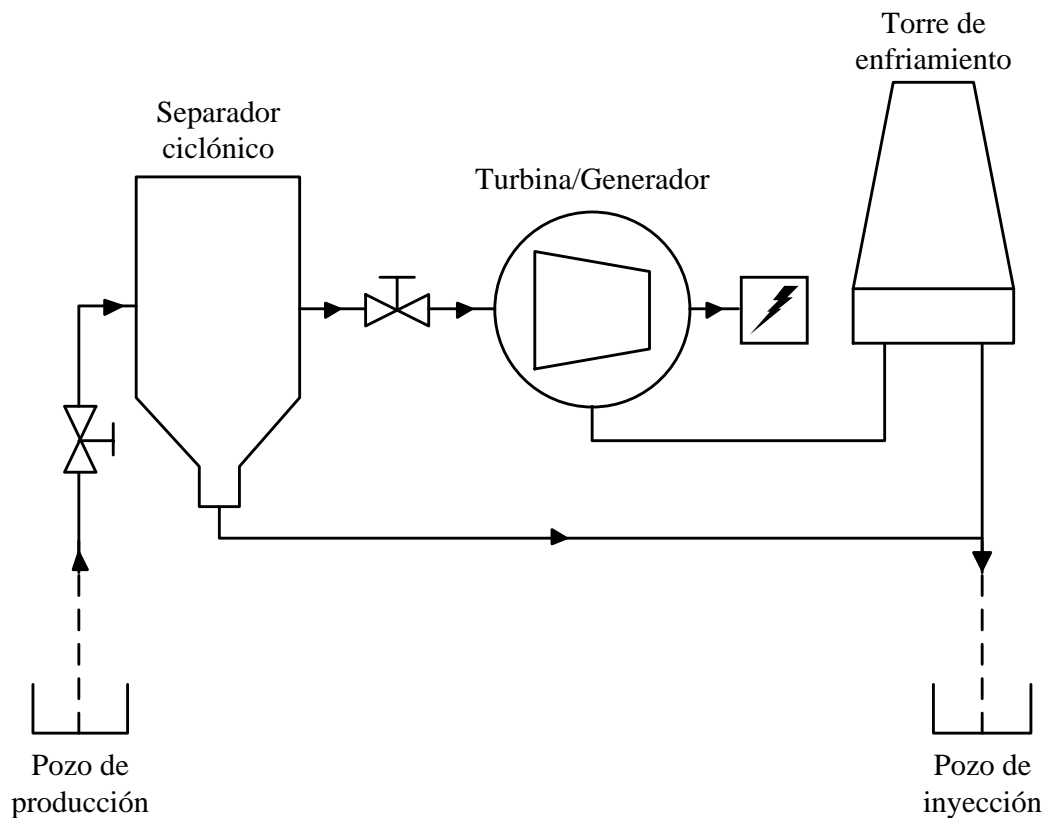


Figura 12: Central *single flash* simplificada.

Debido a la poca información presente en la literatura no se tomaron en consideración los equipos asociados al tratamiento del vapor geotermal, tales como los removedores de humedad, silenciadores, válvulas de control. También se debe

mencionar que no se encontraron modelos específicos para centrales geotérmicas en la revisión bibliográfica.

4.3.1 Gobernador de velocidad IEEESGO

La constante de tiempo T_4 corresponde a la del separador ciclónico, la cual fue estimada con el método de recipiente de vapor propuesto por Kundur (ver Anexo B).

Para un reservorio líquido-dominante de 240 [°C], las condiciones óptimas de trabajo del separador ciclónico de una central *single flash* son las siguientes [6]:

| Parámetro | Valor |
|--------------------------------|-------|
| Temperatura [°C] | 140 |
| Presión [bar] | 3,613 |
| Flujo másico de entrada [kg/s] | 95,75 |

Tabla 7: Condiciones óptimas de operación del separador ciclónico.

Las propiedades termodinámicas tanto del líquido como del vapor que conforman el fluido que sale de la boca del pozo y entra directamente al separador ciclónico pueden ser extraídas de Tablas de Vapor saturado para las condiciones previamente mencionadas [19].

| Parámetro | Líquido <i>l</i> | Vapor <i>g</i> |
|---|------------------|----------------|
| Volumen específico [m ³ /kg] | 589,16 | 0,50845 |
| Densidad [kg/m ³] | 926,13 | 1,9668 |
| Entalpía específica [kJ/kg] | 589,16 | 2733,4 |

Tabla 8: Propiedades termodinámicas del geofluido.

Para estimar el volumen, se emplearán las dimensiones generalizadas de un separador ciclónico presentadas por DiPippo [6] (Figura 13), aproximando su geometría a la de un cilindro.

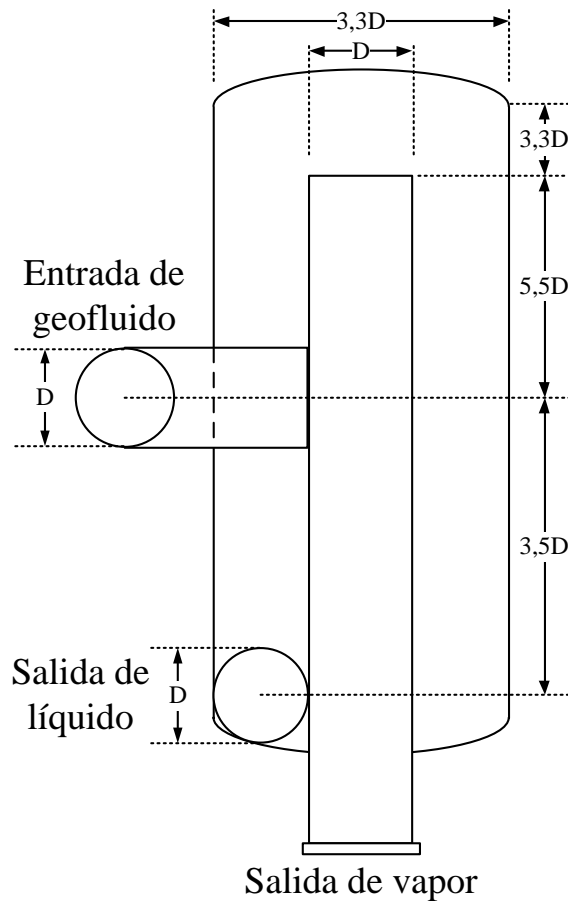


Figura 13: Especificaciones generales de diseño de un separador ciclónico

Utilizando como antecedente la unidad 1 de la central Miravalles, se supondrá un diámetro de tubería igual a 24 [in] (60,96 [cm]). Con este valor se obtiene un volumen de 18,7 [m³].

Suponiendo un valor típico para la entalpía específica del geofluido h_f de 1500 [kJ/kg], la calidad del vapor es igual a:

$$x = \frac{h_f - h_l}{h_g - h_l} = \frac{1500 - 589,16}{2733,4 - 589,16} = 0,4248$$

Lo que significa que el vapor corresponde a un 42,48% de la masa total del geofluido extraído del reservorio. Ahora, ya es posible estimar el flujo másico del vapor de salida:

$$Q_0 = x\dot{m}_t = 0,4248 \cdot 95,75 = 40,67 \text{ [kg/s]}$$

Para estimar la variación de la densidad del recíproco del volumen específico a presión constante $\partial(1/v)/\partial P$ se emplearán los siguientes valores en torno a la presión P_0 a ± 2 bar:

| Variable | Valor |
|----------------------------|--------|
| P_1 [bar] | 1,613 |
| P_2 [bar] | 5,613 |
| v_1 [m ³ /kg] | 0,9231 |
| v_2 [m ³ /kg] | 0,3361 |

Tabla 9: Propiedades termodinámicas de vapor saturado en torno a P_0 .

Entonces:

$$\frac{\partial(1/v)}{\partial P} = \frac{1}{5,613 - 1,613} \left(\frac{1}{0,3361} - \frac{1}{0,9231} \right) = 0,473 \text{ [kg/bar m}^3 \text{]}$$

Con este valor, la constante de tiempo asociada a la respuesta del separador ciclónico queda totalmente determinada:

$$T_4 = \frac{P_0}{Q_0} V \frac{\partial(1/v)}{\partial P} = \frac{3,613}{40,67} \cdot 18,7 \cdot 0,473 = 0,79 \text{ [s]}$$

La ganancia del gobernador de velocidad K_1 corresponde al inverso del estatismo declarado de cada unidad geotérmica. De acuerdo a lo que dicta la NTSyCS, se impondrá un estatismo del 4% con el fin de asegurar la participación de las unidades en el CPF:

$$K_1 = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,04} = 25$$

Para definir T_1 , T_2 y T_3 se emplearon valores típicos para turbinas de vapor sin recalentamiento. Dado que estas turbinas de estas unidades no cuentan con recámaras de media y baja presión, los parámetros K_3 , T_4 , T_5 y T_6 son iguales a cero.

En la siguiente tabla se resumen los valores que toman los parámetros de los gobernadores de velocidad implementados en las unidades geotérmicas:

| Parámetro | Valor |
|------------------|--------------|
| K_1 [p.u.] | 20 |
| K_2 [p.u.] | 1 |
| K_3 [p.u.] | 0 |
| T_1 [s] | 0,3 |

| | |
|------------------|------|
| T_2 [s] | 1 |
| T_3 [s] | 1 |
| T_4 [s] | 0,79 |
| T_5 [s] | 0 |
| T_6 [s] | 0 |
| P_N [MW] | 0 |
| P_{MIN} [p.u.] | 0 |
| P_{MAX} [p.u.] | 1 |

Tabla 10: Valores de los parámetros del controlador IEESGO.

4.3.2 Regulador de tensión ESAC5A

Para definir los valores de los parámetros del regulador de tensión se emplearán valores típicos empleados en modelos IEEE, tal como se hace en la central Miravalles. El controlador proporcionado por DIgSILENT PowerFactory ya viene implementado con dichos valores, los cuales se muestran a continuación:

| Parámetro | Valor |
|-------------------|--------------|
| K_A [p.u.] | 200 |
| T_R [s] | 0,02 |
| T_A [s] | 0,03 |
| K_E [p.u.] | 0,5 |
| T_E [s] | 1 |
| K_F [p.u.] | 0,2 |
| T_{F1} [s] | 3 |
| T_{F2} [s] | 1 |
| T_{F3} [s] | 0 |
| E_1 [p.u.] | 3,13 |
| S_{E1} [p.u.] | 0,1 |
| E_2 [p.u.] | 4,18 |
| S_{E2} [p.u.] | 0,5 |
| V_{RMIN} [p.u.] | -20 |
| V_{RMAX} [p.u.] | 20 |

Tabla 11: Valores de los parámetros del controlador ESAC5A.

4.3.3 Modelo integrado

Al conectar ambos controladores con el modelo dinámico de un generador sincrónico [11], se obtiene el modelo de una unidad geotérmica con la capacidad de mitigar las variaciones de frecuencia del sistema eléctrico al cual se encuentre conectada.

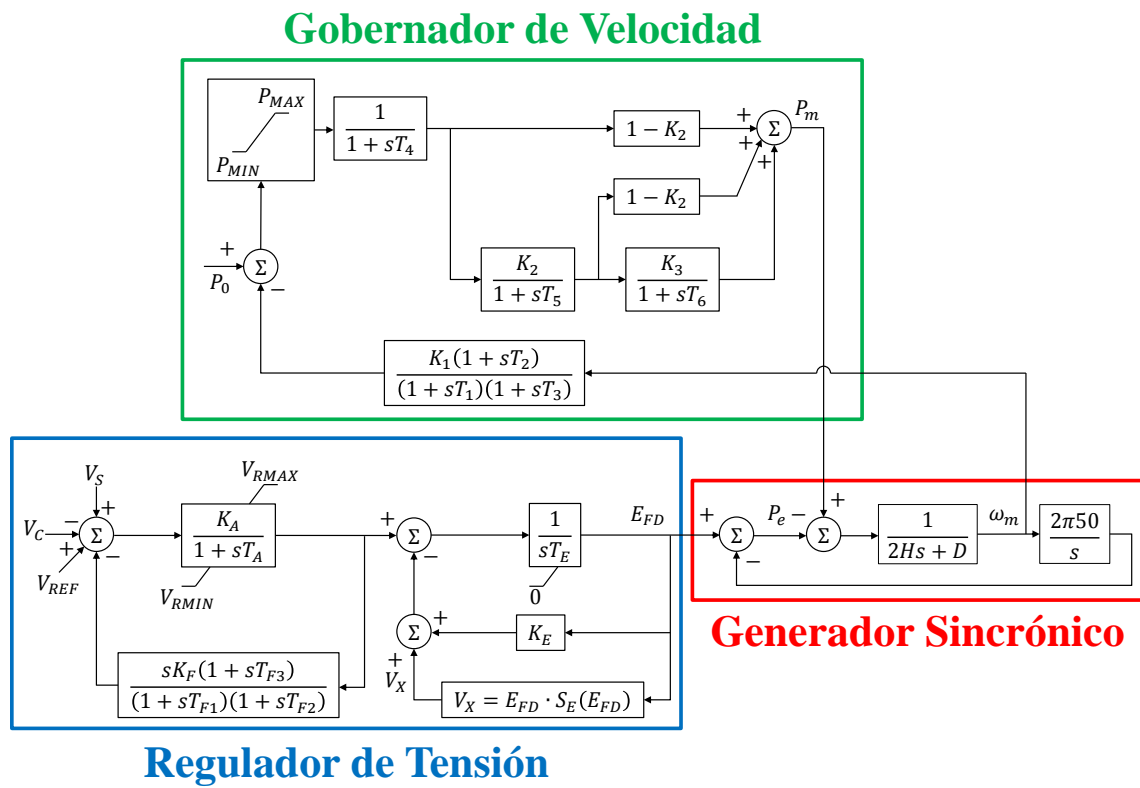


Figura 14: Diagrama de bloques del modelo de unidad geotérmica.

Los valores de los parámetros de modelación del generador sincrónico se exponen en la siguiente tabla:

| Parámetro | Valor |
|--|--------|
| Potencia nominal [MW] | 40 |
| Conexión | YN |
| Reactancia directa x_d [p.u.] | 1,899 |
| Reactancia en cuadratura x_q [p.u.] | 1,899 |
| Reactancia transiente x'_d | 0,255 |
| Reactancia transiente x'_q | 0,3 |
| Reactancia subtransiente x''_d | 0,23 |
| Reactancia subtransiente x''_q | 0,23 |
| Resistencia de secuencia cero r_0 [p.u.] | 0 |
| Reactancia de secuencia cero x_0 [p.u.] | 0,1 |
| Resistencia de secuencia negativa r_2 [p.u.] | 0 |
| Reactancia de secuencia negativa x_2 [p.u.] | 0,2 |
| Potencia reactiva mínima [p.u.] | -0,316 |
| Potencia reactiva máxima [p.u.] | 0,448 |
| Constante de inercia H [s] | 8,173 |
| Corriente de cortocircuito I_{kd} [p.u.] | 1,2 |
| Constante transiente de tiempo de circuito abierto (eje directo) T'_{d0} | 5,302 |
| Constante transiente de tiempo de circuito abierto (eje de cuadratura) T'_{q0} | 0 |
| Constante transiente de tiempo de cortocircuito (eje directo) T'_d | 0,712 |
| Constante transiente de tiempo de cortocircuito (eje de cuadratura) T'_q | 0,712 |
| Constante subtransiente de tiempo de circuito abierto (eje directo) T''_{d0} | 0,05 |
| Constante subtransiente de tiempo de circuito abierto (eje de cuadratura) T''_{q0} | 0,06 |
| Constante subtransiente de tiempo de cortocircuito (eje directo) T''_d | 0,045 |
| Constante subtransiente de tiempo de cortocircuito (eje de cuadratura) T''_q | 0,007 |

Tabla 12: Parámetros de modelación de una unidad generadora geotérmica.

Capítulo 5 Análisis dinámico

5.1 Alcance y condiciones de las pruebas

Con el modelo de unidad generadora presentado en el capítulo anterior, se creó una central geotérmica con cuatro unidades idénticas. Cada unidad *single flash* cuenta con una potencia instalada de 40 [MW], haciendo en conjunto un total de 160 [MW].

Primero que todo, es necesario determinar el punto de conexión de la central geotérmica al SING. Para esto se considerará el programa de obras que la Comisión Nacional de Energía propone en su Informe Técnico Definitivo de Fijación de Precios de Nudo Abril 2012 [20], en el cual se recomiendan los siguientes proyectos geotérmicos:

| Central recomendada | Barra de conexión |
|---------------------|--------------------|
| Apacheta 01 | Calama 110 |
| Pampa Lirima 01 | Cerro Colorado 110 |
| Puchuldiza 01 | Cerro Colorado 110 |
| Polloquere 01 | Chapiquiña 66 |
| Irruputunco | Collahuasi 220 |

Tabla 13: Programa de obras de generación geotérmica.

Se estudiarán los efectos que produce la central geotérmica sobre la frecuencia del sistema al ser conectada en las barras Cerro Colorado 110, Calama 110, Collahuasi 220 y Chapiquiña 66. En el Anexo D se presenta un unilineal simplicado en donde se destaca la ubicación de estas barras dentro del SING.

Las contingencias simuladas para crear variaciones de frecuencia relevantes fueron establecidas con ayuda del Esquema de Desconexión de Generación (EDAG) y del Esquemas de Desconexión de Carga (EDAC) implementados actualmente en el SING [18], con los que se pudieron establecer contingencias que generaran escenarios de sub y sobrefrecuencia respectivamente.

La contingencia considerada para el escenario de subfrecuencia consiste en la caída intempestiva del generador CTM2 de la central termoeléctrica Mejillones, lo que genera una pérdida de potencia activa igual a 154 [MW]. Por otra parte, para crear la contingencia del escenario de sobrefrecuencia, se tomó la decisión de desconectar determinados niveles de potencia demandada en las subestaciones especificadas en la siguiente tabla:

| Subestación | Potencia activa desconectada [MW] |
|--------------------|--|
| Chuquicamata | 81,55 |
| Calama | 10,59 |
| Radomiro Tomic | 66,50 |
| Total | 158,64 |

Tabla 14: Cargas desconectadas para la contingencia de sobrefrecuencia.

Se impuso que el estatismo de cada central de gas y de vapor en el modelo del SING fuese igual al máximo aceptable por el modelo de simulación. Con esto, se asegura que la corrección del valor de la frecuencia después de ocurrida la contingencia se debe únicamente a la acción de las unidades geotérmicas.

Se asumirá que esta central cuenta con un separador ciclónico de características constructivas como las mencionadas en 4.2.

5.2 Variables a estudiar

Las variables de relevancia para este estudio de estabilidad son la frecuencia del sistema medida en la barra Crucero 220, uno de los nodos importantes del SING y el tiempo máximo de establecimiento del sistema.

5.3 Casos de estudio

El caso base del estudio consiste en revisar el comportamiento dinámico del sistema simulado con el software DIgSILENT PowerFactory bajo las contingencias descritas en la sección 5.1 por 60 [s]. Luego, se fueron conectando una a una las unidades geotérmicas en una barra determinada para revisar nuevamente el comportamiento dinámico del sistema bajo la acción de estas unidades. En consecuencia, se cuentan con 5 casos de estudio por punto de conexión:

- Ninguna unidad conectada (Caso Base).
- Una unidad conectada (1×40 [MW]).
- Dos unidades conectadas (2×40 [MW]).
- Tres unidades conectadas (3×40 [MW]).
- Cuatro unidades conectadas (4×40 [MW]).

5.4 Resultados

5.4.1 Subfrecuencia

La evolución de la frecuencia del sistema bajo la contingencia de subfrecuencia es presentada en el siguiente gráfico:

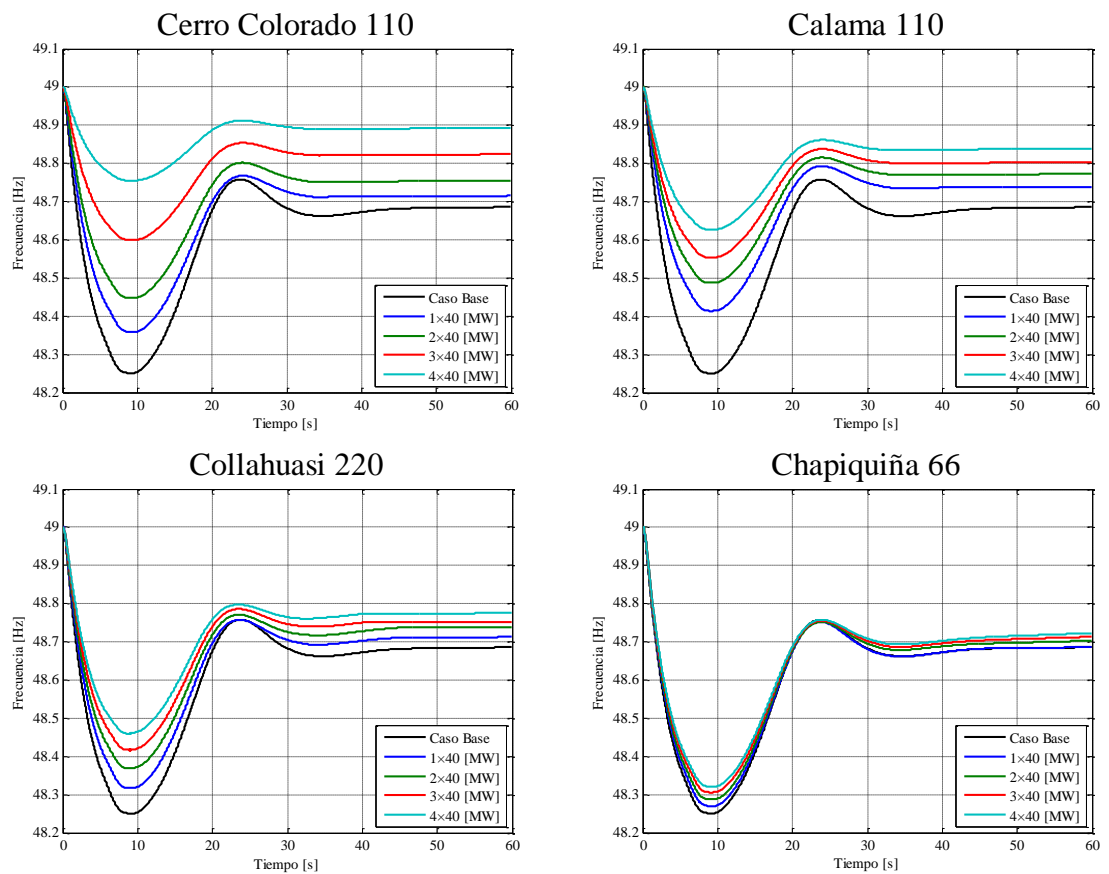


Figura 15: Frecuencia del sistema bajo contingencia de subfrecuencia.

La siguiente tabla resume datos relevantes sobre la frecuencia para cada caso de estudio:

| Punto de conexión | Escenario | Frecuencia mínima [Hz] | Tiempo máximo de establecimiento [s] | Frecuencia en régimen permanente [Hz] |
|--------------------------|------------------|-------------------------------|---|--|
| | Caso Base | 48,25 | 47,39 | 48,69 |
| Cerro Colorado 110 | 1×40 [MW] | 48,36 | 34,84 | 48,66 |
| | 2×40 [MW] | 48,45 | 32,47 | 48,75 |
| | 3×40 [MW] | 48,60 | 29,12 | 48,83 |
| | 4×40 [MW] | 48,75 | 27,49 | 48,89 |
| Calama 110 | 1×40 [MW] | 48,41 | 37,95 | 48,76 |
| | 2×40 [MW] | 48,49 | 35,46 | 48,80 |
| | 3×40 [MW] | 48,55 | 33,94 | 48,83 |
| | 4×40 [MW] | 48,63 | 31,45 | 48,87 |
| Collahuasi 220 | 1×40 [MW] | 48,32 | 45,91 | 48,72 |
| | 2×40 [MW] | 48,37 | 44,21 | 48,75 |
| | 3×40 [MW] | 48,42 | 41,31 | 48,78 |
| | 4×40 [MW] | 48,46 | 39,27 | 48,81 |
| Chapiquiña 66 | 1×40 [MW] | 48,27 | 47,15 | 48,69 |
| | 2×40 [MW] | 48,29 | 45,86 | 48,70 |
| | 3×40 [MW] | 48,31 | 44,27 | 48,71 |
| | 4×40 [MW] | 48,32 | 42,19 | 48,72 |

Tabla 15: Datos relevantes de frecuencia bajo contingencia de subfrecuencia.

Se puede ver que en el caso base, la frecuencia se encuentra bajo los 48,3 [Hz] por más de 200 [ms], lo que transgrede lo impuesto por la NTSyCS. Luego de conectar la primera unidad geotérmica, la frecuencia mínima supera este límite en Cerro Colorado 110, Calama 110 y Chapiquiña 66, mientras que en Collahuasi 220 esto sucede al conectar la segunda unidad. Este fenómeno se debe a gran cantidad de potencia consumida por las cargas conectadas a esta barra, lo que se muestra en la siguiente tabla:

| Punto de conexión | Potencia consumida [MW] |
|--------------------------|--------------------------------|
| Cerro Colorado 110 | 28,59 |
| Calama 110 | 39,27 |
| Collahuasi 220 | 209,07 |
| Chapiquiña 066 | 1,46 |

Tabla 16: Potencia consumida por punto de conexión.

Se observa que para todos los puntos de conexión estudiados, a medida que aumenta el número de unidades conectadas, la frecuencia mínima también lo hace, así como también la nueva frecuencia de régimen permanente. La razón principal por la cual ocurre esto se debe a la rapidez con la que se dispone del vapor geotérmico para ser utilizado en la turbina. En promedio, la frecuencia aumenta en 0,07 [Hz] por unidad conectada.

En relación los tiempos máximos de restablecimiento, sólo en Cerro Colorado 110 se llega a valores bajos los 30 [s] (al conectar la tercera unidad). A medida que se van conectando las unidades geotérmicas, los tiempos disminuyen de forma no lineal. En promedio, se observa que los tiempos disminuyen aproximadamente en 2 [s] por unidad conectada.

| Punto de conexión | Diferencias entre casos de estudio [s] | | | |
|--------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 0 a 1 unidad | 1 a 2 unidades | 2 a 3 unidades | 3 a 4 unidades |
| Cerro Colorado 110 | 12,55 | 2,37 | 3,35 | 1,63 |
| Calama 110 | 9,44 | 2,49 | 1,52 | 2,49 |
| Collahuasi 220 | 1,48 | 1,70 | 2,90 | 2,04 |
| Chapiquiña 66 | 0,24 | 1,29 | 1,59 | 2,08 |
| Promedio | 5,93 | 1,96 | 2,34 | 2,06 |

Tabla 17: Variación del tiempo máximo de establecimiento bajo contingencia de subfrecuencia.

Después de la falla, la frecuencia en régimen no vuelve a alcanzar los 50 [Hz] previos a ella para ningún caso de estudio. Sin embargo, con la conexión de las unidades geotérmicas al sistema se consigue el propósito de disminuir la oscilación de frecuencia provocada por la falla. La acción de anular el error de frecuencia en régimen permanente es tarea del lazo secundario de control de frecuencia.

Para el caso estudiado conviene tener como mínimo 3 unidades geotérmicas en un punto de conexión con pocas cargas instaladas para controlar de forma las variaciones de frecuencia de manera que se cumplan con los requisitos normativos. Mientras más unidades se incluyan en la participación del CPF, los tiempos de establecimiento del sistema disminuyen considerablemente.

5.4.2 Sobrefrecuencia

La evolución de la frecuencia del sistema bajo la contingencia de sobrefrecuencia es presentada en el siguiente gráfico:

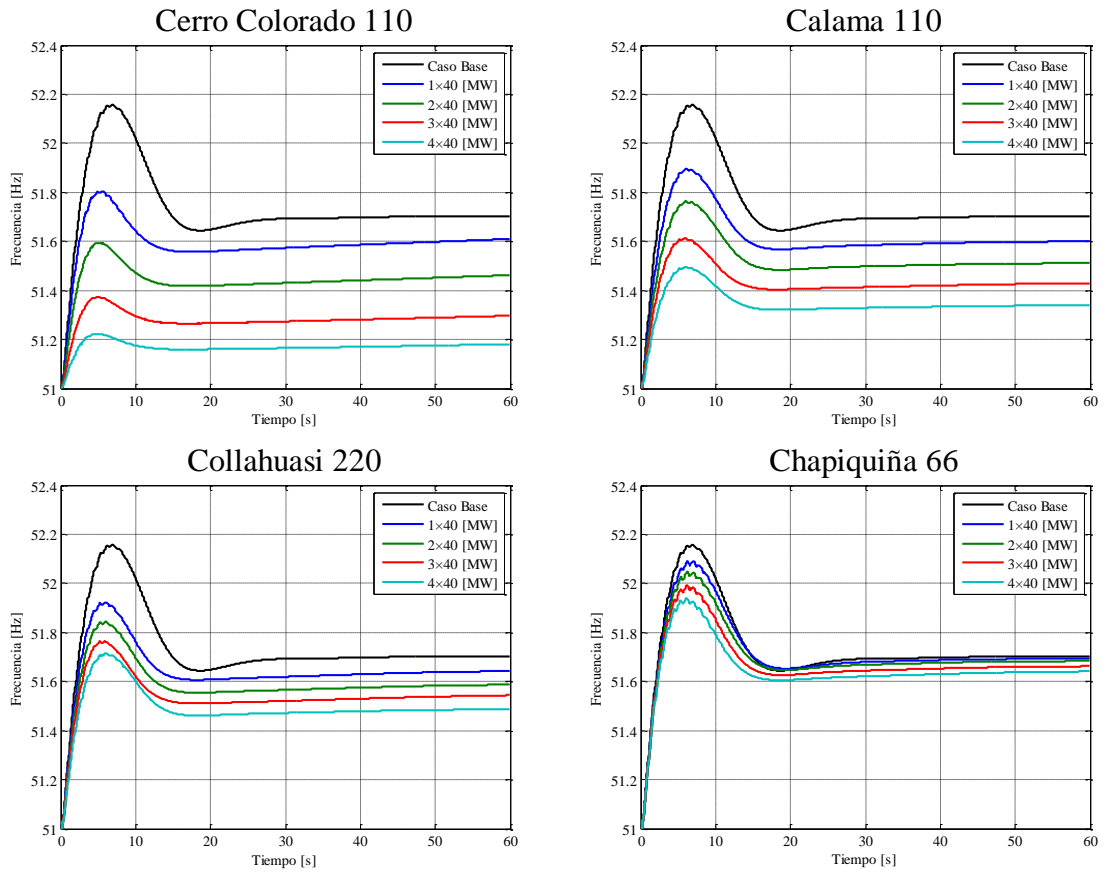


Figura 16: Frecuencia del sistema bajo contingencia de sobrefrecuencia.

La siguiente tabla resume datos relevantes sobre la frecuencia para cada caso de estudio:

| Punto de conexión | Escenario | Frecuencia máxima [Hz] | Tiempo máximo de establecimiento [s] | Frecuencia en régimen permanente [Hz] |
|--------------------|-----------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | Caso Base | 52,16 | 37,51 | 51,70 |
| Cerro Colorado 110 | 1×40 [MW] | 51,80 | 28,01 | 51,61 |
| | 2×40 [MW] | 51,59 | 26,08 | 51,46 |
| | 3×40 [MW] | 51,37 | 23,52 | 51,30 |
| | 4×40 [MW] | 51,22 | 19,11 | 51,18 |
| Calama 110 | 1×40 [MW] | 51,90 | 26,83 | 51,60 |
| | 2×40 [MW] | 51,76 | 25,24 | 51,51 |
| | 3×40 [MW] | 51,61 | 22,36 | 51,43 |
| | 4×40 [MW] | 51,50 | 20,77 | 51,34 |
| Collahuasi 220 | 1×40 [MW] | 51,92 | 29,50 | 51,64 |
| | 2×40 [MW] | 51,84 | 28,25 | 51,59 |
| | 3×40 [MW] | 51,77 | 27,23 | 51,54 |
| | 4×40 [MW] | 51,72 | 25,81 | 51,49 |
| Chapiquiña 66 | 1×40 [MW] | 52,09 | 31,89 | 51,69 |
| | 2×40 [MW] | 52,05 | 30,19 | 51,68 |
| | 3×40 [MW] | 51,99 | 29,67 | 51,66 |
| | 4×40 [MW] | 51,94 | 28,65 | 51,64 |

Tabla 18: Datos relevantes de frecuencia bajo contingencia de sobrefrecuencia.

La norma no especifica una frecuencia límite sobre los 50 [Hz] para estudiar los casos de sobrefrecuencia. Sin embargo, se observa una clara tendencia a disminuir la amplitud de la oscilación de frecuencia provocada por la contingencia a medida que se van conectando las unidades geotérmicas. En el régimen permanente, se observa que la frecuencia alcanzada al conectar la cuarta unidad en Cerro Colorado 110 es la más cercana a la frecuencia original Tanto la distancia entre el punto de conexión y el punto de falla como las cargas conectadas al punto de conexión influyen en la capacidad de las unidades geotérmicas para restablecer la frecuencia del sistema a un valor constante. En promedio, la frecuencia disminuye en 0,14 [Hz] por unidad conectada.

En lo que respecta a los tiempos máximos de establecimiento del sistema, se observan bajas diferencias en la variación de éste al ir conectando las unidades geotérmicas. En la siguiente tabla se muestran las diferencias entre estos tiempos entre cada caso para cada punto de conexión:

| Punto de conexión | Diferencias entre casos de estudio [s] | | | |
|--------------------|--|----------------|----------------|----------------|
| | 0 a 1 unidad | 1 a 2 unidades | 2 a 3 unidades | 3 a 4 unidades |
| Cerro Colorado 110 | 9,50 | 1,93 | 2,56 | 4,41 |
| Calama 110 | 10,68 | 1,59 | 2,88 | 1,59 |
| Collahuasi 220 | 8,01 | 1,25 | 1,02 | 1,42 |
| Chapiquiña 66 | 5,62 | 1,70 | 0,52 | 1,02 |
| Promedio | 8,45 | 1,62 | 1,75 | 2,11 |

Tabla 19: Variación del tiempo máximo de establecimiento bajo contingencia de sobrefrecuencia.

La mayor diferencia entre los tiempos máximos de establecimiento se encuentra entre los casos de 0 a 1 unidad, mientras que para los siguientes casos, dicha diferencia en promedio va entre 1,5 y 2 [s] por unidad conectada. Sin embargo, se observa que a medida que aumenta en número de unidades conectadas en barras donde se consume menos potencia (Cerro Colorado 110 y Chapiquiña 66), las diferencias entre los tiempos máximos de establecimiento va aumentando.

Esto quiere decir que el ingreso de las unidades geotérmicas aporta de forma efectiva a controlar la frecuencia, pero para los casos de sobrefrecuencia dicho aporte es directamente proporcional al número de unidades conectadas y es afectado por la potencia consumida en el punto de conexión.

Capítulo 6 Conclusiones

El presente trabajo de título ha tenido como principal intención estudiar la factibilidad de las centrales de generación geotérmica para aportar al CPF de un sistema interconectado. En particular, debido a la limitada información sobre modelos dinámicos específicos para este tipo de centrales y a la naturaleza de los recursos geotérmicos en el país, el trabajo quedó acotado a estudiar el aporte que puede entregar una central geotérmica de tipo *single flash* al ser conectada en el SING.

En lo que se refiere a la investigación sobre la capacidad de cada tecnología de generación geotérmica para aportar al CPF, se deduce que sólo centrales que implementen tecnologías de vaporización súbita (*single flash, double flash*) pueden tener un grado de control sobre las variaciones de frecuencia, principalmente debido a que cuentan con equipos capaces de mantener una reserva de vapor, tales como los separadores ciclónicos. De acuerdo a los resultados obtenidos, es necesario destacar que se debe especificar un modelo dinámico distintivo para el separador ciclónico, ya que éste es el equipo clave para el control de frecuencia de una central geotérmica, ya que es el encargado de regular el flujo másico de vapor que entra a la turbina y subsiguientemente en controlar potencia generada. Sin embargo, se debe enfatizar que las centrales geotérmicas se emplean mayoritariamente como generación base, debido a sus altos factores de planta (del orden del 90%).

El estudio realizado permite concluir que, en efecto, este tipo de centrales permite una acción del CPF más efectiva ante las variaciones de frecuencia que puede surgir durante la operación un sistema. Con los resultados de las simulaciones dinámicas realizadas con el *software* DIgSILENT PowerFactory se comprobó que las unidades generadoras de una central geotérmica disminuyen las oscilaciones de frecuencia y los tiempos de establecimiento del sistema ante contingencias que provocan desbalances entre la generación y la demanda. Mientras más unidades sean utilizadas para participar en el CPF, tanto para los casos de sub y sobrefrecuencia, el sistema se estabiliza más rápido. La razón principal para explicar el comportamiento de las unidades bajo estas condiciones, se debe principalmente a la disponibilidad prácticamente inmediata del vapor geotérmico (para variar la potencia eléctrica entregada por las turbinas en conjunto con la acción de sus gobernadores de velocidad, a diferencia de las centrales térmicas convencionales).

En promedio, se observó que bajo contingencias de subfrecuencia, la frecuencia aumenta en 0,07 [Hz] por unidad conectada y el tiempo máximo de establecimiento disminuye en 2 [s] por unidad conectada, mientras que bajo contingencias de sobrefrecuencia, la frecuencia disminuye en 0,14 [Hz] por unidad conectada y el tiempo máximo de establecimiento disminuye entre 1,5 y 2 [s] por unidad conectada.

Además, es necesario enfatizar que el aporte de las centrales geotérmicas al CPF depende también de otros factores relacionados con el punto de conexión considerado,

tales como la potencia consumida en torno a la central y de la distancia existente entre el punto de conexión y el punto de falla.

El uso de aquellos modelos predefinidos ayuda a obtener una primera aproximación de la respuesta en el tiempo ante variaciones de frecuencia, pero se debe destacar que la validez de dicha respuesta queda limitada por la exactitud de la información empleada en ellos. Factores como un valor correcto del estatismo, retardos, controladores de carga, tipos de combustible, comportamiento dinámico de calderas, intervenciones del operador y de la respuesta general deben ser tomados en consideración si se desea obtener una respuesta fidedigna del modelo. No obstante, debido a que estos parámetros no son simples de obtener, se escogen valores típicos empleados en centrales térmicas a vapor. Para lograr esto, es necesario contar con información exclusiva que puedan proporcionar los fabricantes de los equipos que conforman el ciclo de conversión energética.

Para trabajos futuros que sigan esta línea de investigación, se recomienda agregar al estudio una línea de transmisión que conecte la central al sistema, debido a que la gran mayoría de los reservorios geotérmicos en Chile se encuentran en la precordillera, lejos de la red. En la práctica puede resultar infactible conectar la central geotérmica directamente a una barra del sistema. También se considera necesario realizar un estudio de la factibilidad económica de los bloques de energía geotérmica necesarios para la reserva primaria del sistema. Con respecto a la modelación dinámica de unidades

generadoras, se recomienda crear un modelo específico para centrales geotérmicas para así evitar el uso de modelos predefinidos usados en centrales de vapor y obtener un modelo que las represente más adecuadamente. A pesar de que claramente ambos tipos de centrales comparten ciertas características operacionales (en particular, a la forma en que se usa el vapor), no necesariamente tienen que compartir los mismos modelos.

Anexo A Estabilidad en sistemas eléctricos de potencia

La estabilidad de sistemas de potencia corresponde a la habilidad de un sistema eléctrico de potencia de recobrar un estado de equilibrio después de haber sido sujeto a una perturbación física para una condición inicial de operación dada. Todas las variables del sistema se encuentran delimitadas, por lo que prácticamente todo el sistema permanece intacto [11].

La máquina sincrónica es particularmente importante en estudios de estabilidad, ya que la gran mayoría de las inestabilidades están directamente relacionadas con máquinas rotatorias.

El siguiente diagrama resume los tipos de estabilidad generalmente estudiados en sistemas de potencia:

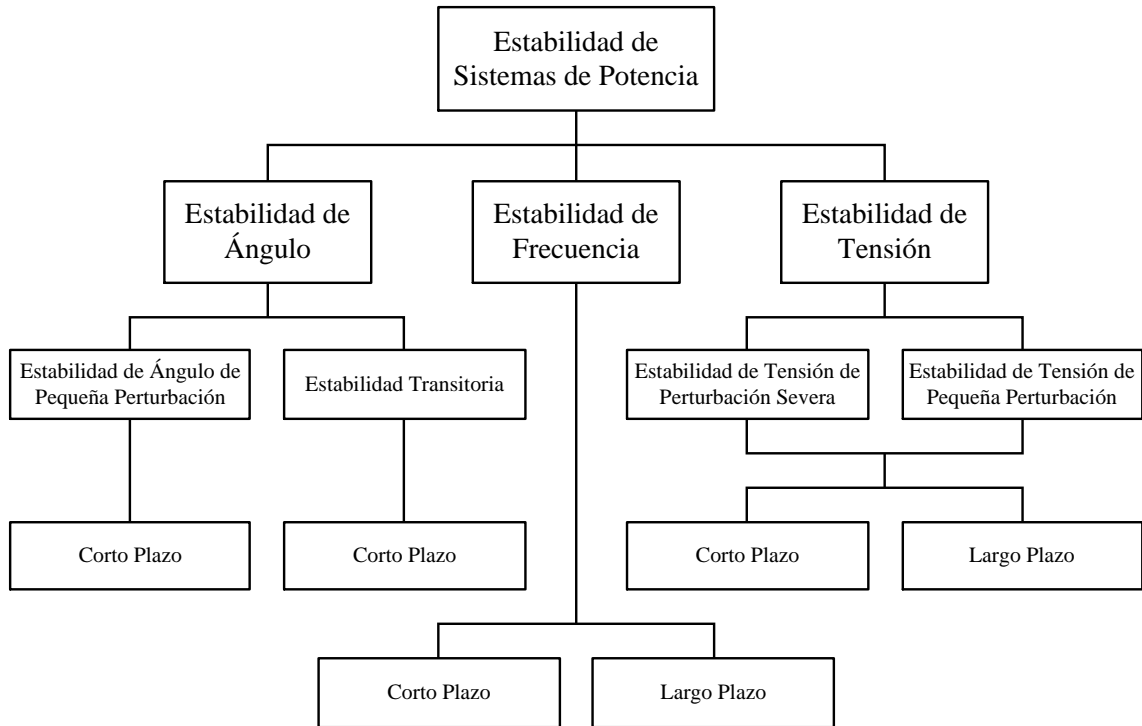


Figura 17: Clasificación de los tipos de estabilidad en sistemas de potencia.

A.1 Estabilidad de ángulo del rotor

El estudio de la estabilidad de ángulo del rotor compromete el estudio de las oscilaciones electromecánicas que ocurren en el sistema y sus efectos se ven reflejados sobre variables eléctricas como la potencia y ángulos eléctricos y variables mecánicas como velocidades y torques. Hace referencia a la capacidad de las máquinas síncronas que forman parte de un sistema eléctrico de mantener el sincronismo cuando se ven afectadas a perturbaciones. Mantener dicho sincronismo involucra mantener el equilibrio entre el torque eléctrico y el torque mecánico. Es analizada generalmente por medio de simulaciones en el dominio del tiempo.

A.2 Estabilidad de tensión

Corresponde a la capacidad que posee un sistema de mantener niveles de tensión aceptables de acuerdo a la normativa pertinente al operar en condiciones normales y bajo perturbaciones. La estabilidad de tensión está directamente relacionada con la potencia reactiva suministrada, por lo que se considera que un sistema es inestable desde el punto de vista de la tensión cuando al inyectar potencia reactiva en una barra, su nivel de tensión no aumenta.

Una consecuencia probable de la inestabilidad de tensión es la desconexión de carga en algunas zonas del sistema o de otros elementos por acción de sus protecciones.

A.3 Estabilidad de frecuencia

Un sistema se considera estable desde el punto de vista de la frecuencia cuando la generación total es igual a la demanda del sistema más las pérdidas. La inestabilidad de frecuencia surge cuando el sistema no es capaz de alcanzar un nuevo equilibrio después de un desbalance significativo en la generación o en la carga. La principal causa de este tipo de inestabilidad se debe a caídas de generadores y de líneas de gran capacidad.

Gran parte de la literatura asociada con estabilidad de sistemas de potencia está enfocada en estabilidad de ángulo de rotor y de estabilidad de tensión. Una razón de esto

es debido a que la mayoría de los sistemas eléctricos en el mundo corresponden a grandes redes interconectadas, en las cuales hay un alto grado de compensaciones de potencia y, en consecuencia, intercambio de reservas en giro y de respuesta inercial de unidades. Esto tiende a crear sistemas rígidos en donde un desbalance de generación o carga ocurre antes de que la frecuencia se desvíe de forma significativa [21].

Anexo B Modelo simplificado de un recipiente de vapor

Este modelo ayuda a obtener la constante de tiempo de un recipiente de vapor (*steam vessel*) con el fin de modelar su retardo temporal en un bloque de control [11].

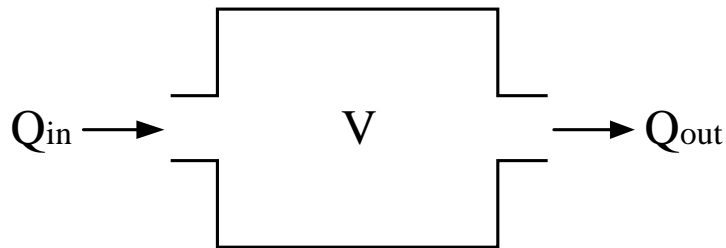


Figura 18: Esquema de un recipiente de vapor.

De acuerdo a la Figura 18, se desprende que:

$$\frac{dW}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

Donde W corresponde a la masa de vapor en el volumen V , t es el tiempo en segundos y Q_{in} y Q_{out} a los flujos másicos de entrada y salida respectivamente. Si se supone que el flujo másico de salida es proporcional a la presión en el recipiente, entonces:

$$Q_{out} = \frac{P}{P_0} Q_0$$

$$\frac{dQ_{out}}{dt} = \frac{Q_0}{P_0} \frac{dP}{dt}$$

En donde P es la presión variable en el recipiente, P_0 es la presión del recipiente en estado estacionario y Q_0 es el flujo másico de salida a presión P_0 . Asumiendo que el recipiente se mantiene a temperatura constante:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\partial W}{\partial P} \frac{dP}{dt} = V \frac{\partial(1/v)}{\partial P} \frac{dP}{dt}$$

Donde v es el volumen específico en el recipiente. Al reemplazar la expresión de dW/dt en la ecuación anterior se obtiene:

$$Q_{in} - Q_{out} = \frac{P_0}{Q_0} V \frac{\partial(1/v)}{\partial P} \frac{dQ_{out}}{dt}$$

Se define la constante de tiempo del recipiente de vapor T_{SV} como:

$$T_{SV} = \frac{P_0}{Q_0} V \frac{\partial(1/v)}{\partial P}$$

De esta forma, la variación de masa de vapor dentro del recipiente es igual a:

$$Q_{in} - Q_{out} = T_{SV} \frac{dQ_{out}}{dt}$$

O, como función de transferencia:

$$\frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{1}{1 + sT_{SV}}$$

Una forma para estimar el valor de la derivada parcial del recíproco del volumen específico es la siguiente:

$$\frac{\partial(1/v)}{\partial P} = \frac{1}{p_1 - p_2} \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right)$$

Donde P_1 y P_2 corresponden a presiones en torno a la presión P_0 , mientras que v_1 y v_2 a los volúmenes específicos a dichas presiones respectivamente, de acuerdo a lo establecido en Tablas de Vapor [14].

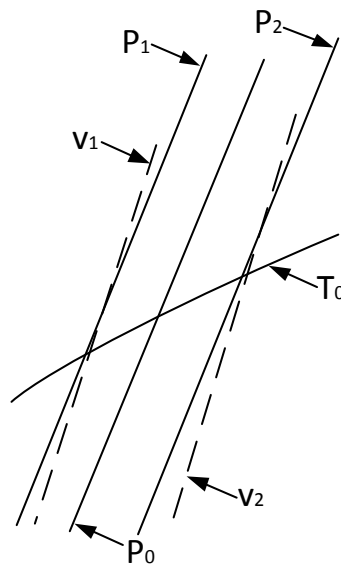


Figura 19: Estimación de $\partial\rho\partial P$.

Anexo C Modelo de unidad generadora en DIgSILENT PowerFactory

Los Modelos Compuestos (*Compound Models*) de DIgSILENT PowerFactory permiten simular las señales generadas por los componentes de las unidades generadoras presentes en un sistema eléctrico de potencia con el fin de someterlos a sistemas de control u observar el comportamiento de dichos elementos en el tiempo.

DIgSILENT PowerFactory tiene a disposición del usuario una serie de estructuras de conexión de los equipos de control denominadas armazones (*frames*). Para el caso de la central geotérmica, se empleó la armazón IEEE Frame No Droop (Figura 20). Dicha armazón está compuesta por un regulador de tensión (VCO), un estabilizador de potencia (PSS) y un gobernador de velocidad (PCU), cumpliendo con los dispositivos de control esenciales para una central térmica [22].

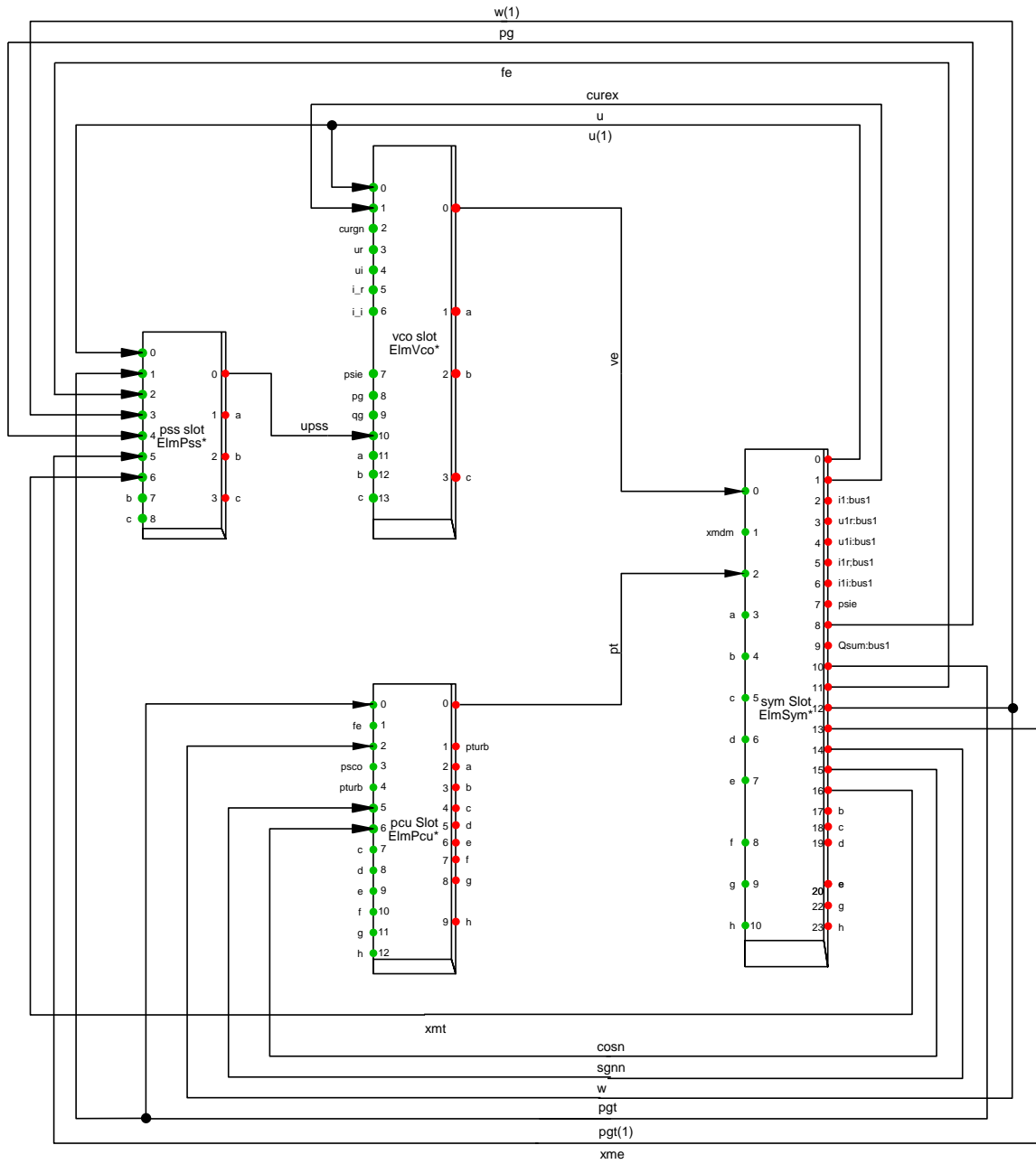


Figura 20: Armazón IEEE Frame No Droop.

C.1 Descripción de los bloques de control

A continuación se describen las funciones de cada uno de los bloques de control que conforman el modelo dinámico de una unidad generadora [12]

C.1.1 Máquina sincrónica (SYM)

Este bloque es el encargado de representar las variables a medir y controlar del generador sincrónico:

| Entradas | Descripción |
|-----------------|-------------------------|
| ve | Tensión de excitación. |
| pt | Potencia de la turbina. |

| Salidas | Descripción |
|----------------|-------------------------------------|
| u | Tensión en los bornes de generador. |
| curex | Corriente de excitación. |
| pg | Potencia activa. |
| pgt | Potencia eléctrica. |
| fe | Frecuencia. |
| speed | Velocidad del rotor. |
| sgnn | Potencia nominal. |
| cosn | Factor de potencia. |
| xmt | Torque mecánico. |

Tabla 20: Entradas y salidas del generador sincrónico.

C.1.2 Estabilizador de potencia (PSS)

El PSS se encarga de monitorear las señales que informan del estado dinámico del sistema (velocidad del rotor, frecuencia y potencia eléctrica) e informa al regulador de tensión con el fin de generar un torque de excitación en fase con la velocidad del

generador por medio de la tensión de excitación. De esta forma, el PSS añade amortiguamiento a las oscilaciones del rotor.

| Entradas | Descripción |
|-----------------|-------------------------------------|
| u | Tensión en los bornes de generador. |
| p _{gt} | Potencia eléctrica. |
| f _e | Frecuencia. |
| speed | Velocidad del rotor. |
| p _g | Potencia activa. |
| x _{me} | Torque eléctrico. |
| x _{mt} | Torque mecánico. |

| Salida | Descripción |
|---------------|---------------------|
| upss | Consigna de tensión |

Tabla 21: Entradas y salida del PSS.

C.1.3 Regulador de tensión (VCO)

Monitorea la señal de tensión de salida del generador. Se encarga de analizar cualquier desviación con respecto al valor de referencia para restablecerla a dicho valor a través de la excitación. Dado que el generador posee una curva de capacidad, el comportamiento solo podrá excitar a la máquina hasta un valor máximo. El VCO también registra señales provenientes del PSS, ayudando a corregir la tensión de excitación y así reducir las oscilaciones del rotor.

| Entradas | Descripción |
|-----------------|-------------------------------------|
| u | Tensión en los bornes de generador. |
| curex | Corriente de excitación. |
| upss | Consigna de tensión del PSS. |

| Salida | Descripción |
|---------------|------------------------|
| ve | Tensión de excitación. |

Tabla 22: Entradas y salida del VCO.

C.1.4 Unidad de Control Primario (PCU)

El PCU incorpora un sistema que cumple con la función de llevar a cabo regulación primaria de frecuencia, analizando señales como la velocidad y la potencia eléctrica para evitar aceleraciones y desaceleraciones en los generadores del sistema.

| Entradas | Descripción |
|-----------------|----------------------|
| pgt | Potencia eléctrica. |
| speed | Velocidad del rotor. |
| sgnn | Potencia nominal. |
| cosn | Factor de potencia. |

| Salida | Descripción |
|---------------|-----------------------------------|
| pt | Potencia generada por la turbina. |

Tabla 23: Entradas y salida del PCU.

Anexo D Unilineal del Sistema Interconectado del Norte Grande



Figura 21: Unilineal simplificado del SING. Fuente: [18].

Anexo E Potencia generada por la central geotérmica bajo contingencia

Los siguientes gráficos muestran la evolución temporal de las potencias eléctrica y mecánica de las unidades generadoras de la central geotérmica diseñada bajo las contingencias implementadas en el Capítulo 5.

E.1 Subfrecuencia

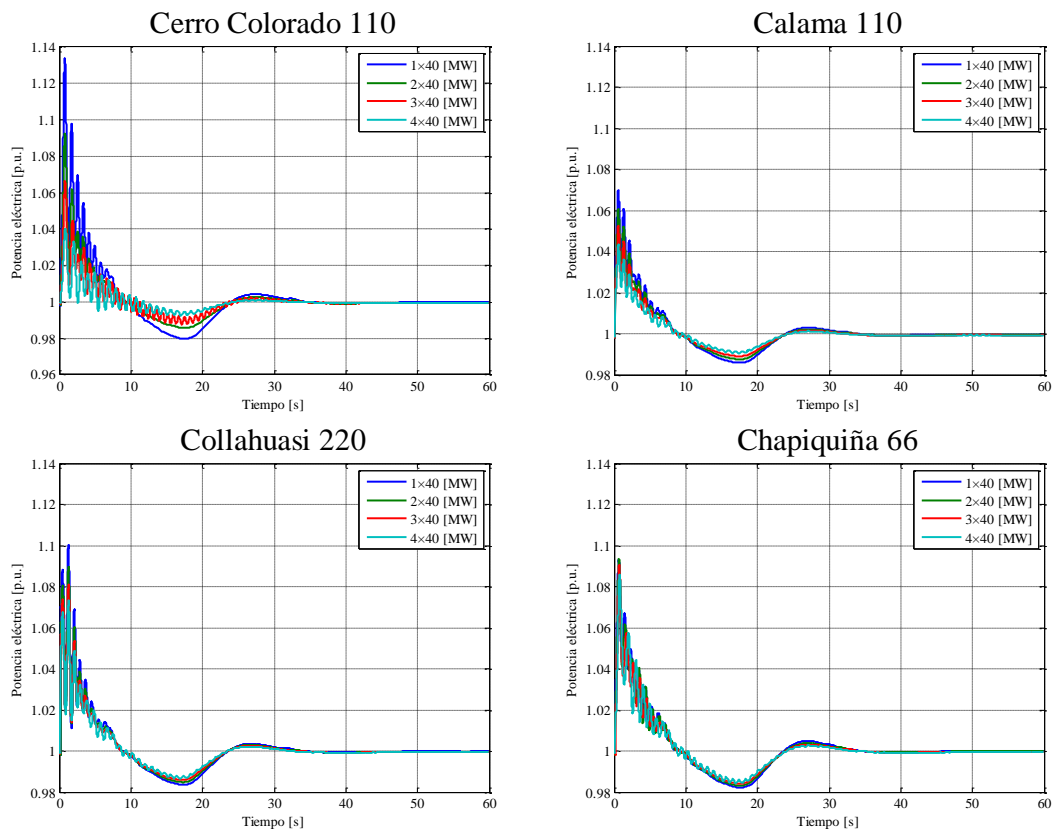


Figura 22: Potencia eléctrica de las unidades bajo contingencia de subfrecuencia.

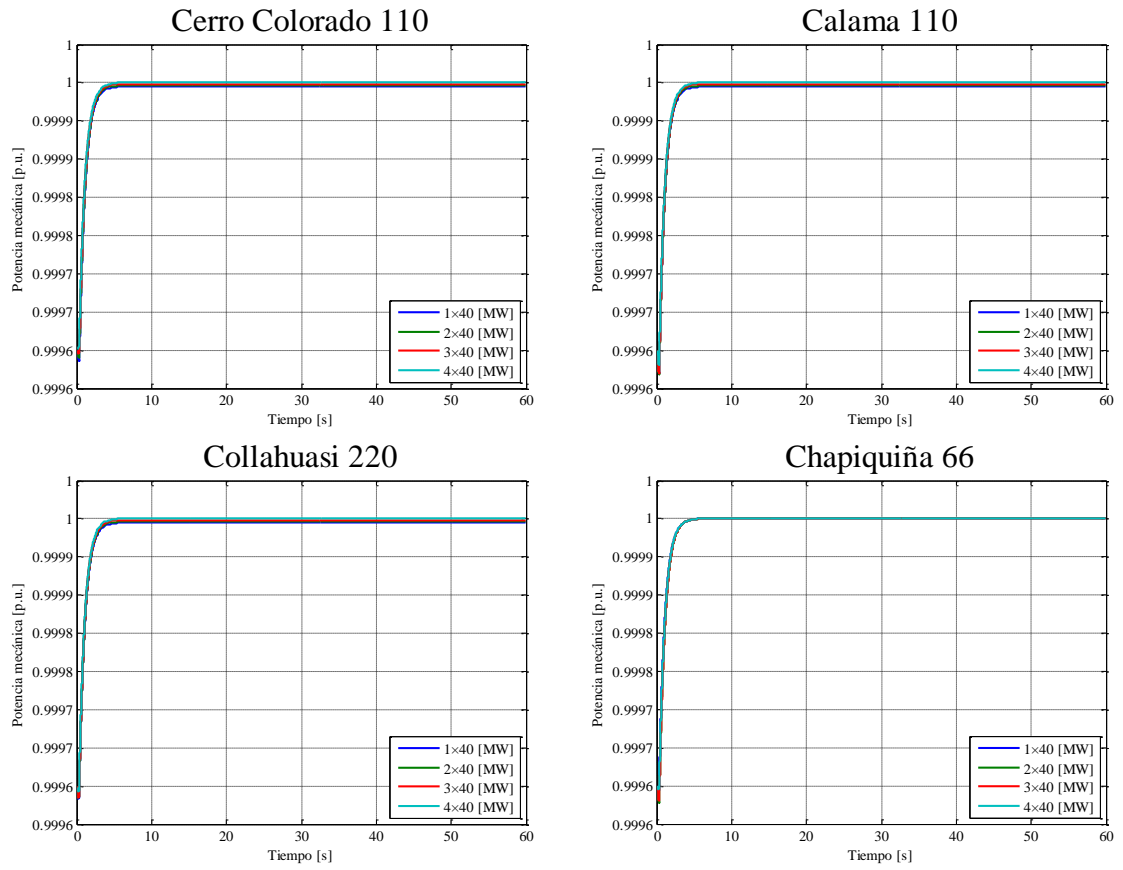


Figura 23: Potencia mecánica de las unidades bajo contingencia de subfrecuencia.

E.2 Sobrefrecuencia

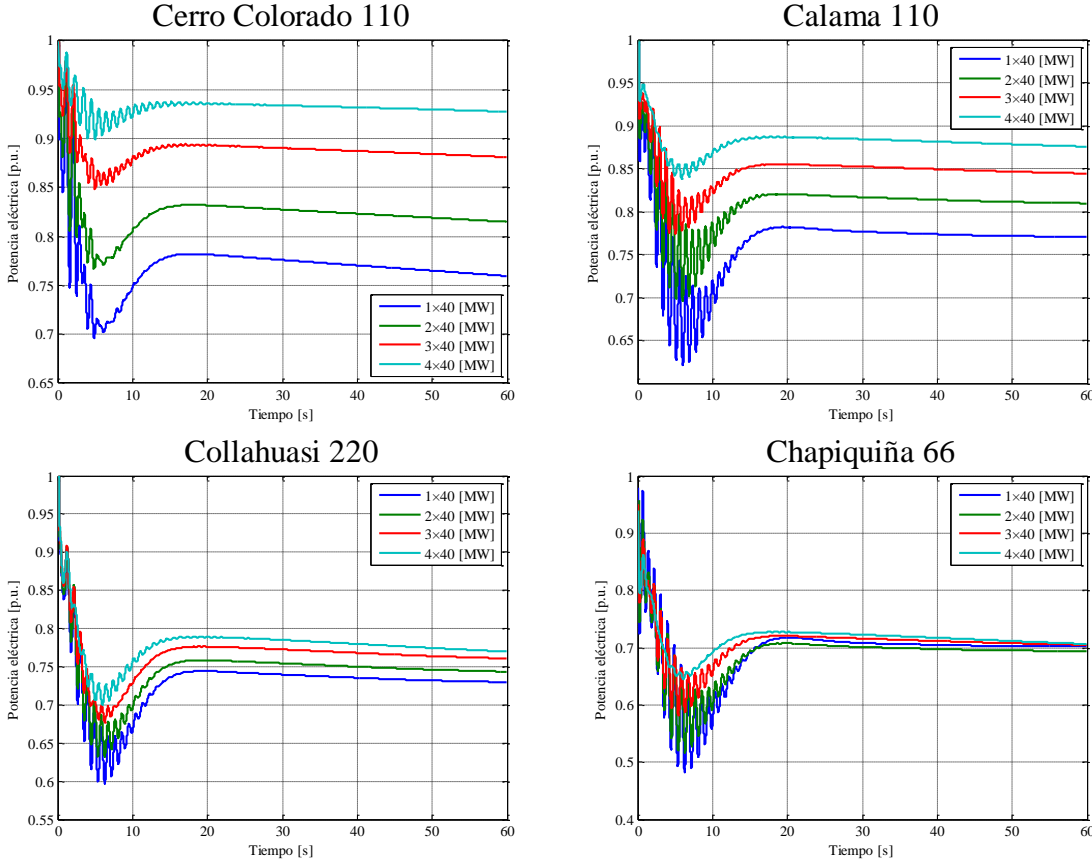


Figura 24: Potencia eléctrica de las unidades bajo contingencia de sobrefrecuencia.

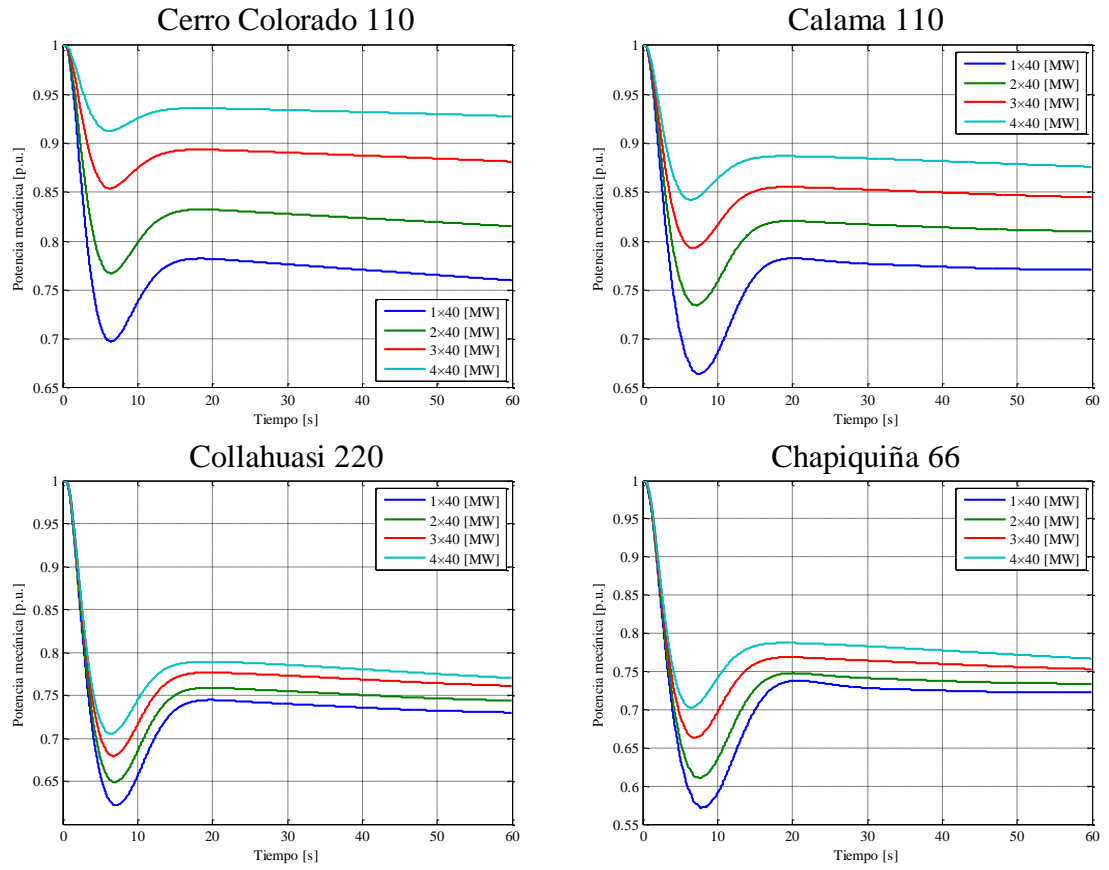


Figura 25: Potencia mecánica de las unidades bajo contingencia de sobrefrecuencia.

Anexo F Producción de energía geotérmica a nivel mundial

Actualmente en el mundo hay 24 países con centrales geotérmicas en operación, las cuales en conjunto suman una capacidad instalada que excede los 10 [GW] y producen casi 70.000 [GWh] de energía eléctrica por año.

La siguiente tabla muestra la capacidad instalada y producción eléctrica por país en el año 2010:

| País | Unidades | Capacidad instalada [MW] | Energía producida [GWh/año] |
|--------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Australia | 2 | 1 | 1 |
| Etiopía | 2 | 7 | 10 |
| Filipinas | 56 | 1.904 | 10.311 |
| Costa Rica | 6 | 166 | 1.131 |
| El Salvador | 7 | 204 | 1.422 |
| Kenya | 14 | 202 | 1.430 |
| China | 8 | 24 | 150 |
| Estados Unidos | 210 | 3.097 | 16.603 |
| Portugal | 5 | 29 | 175 |
| Tailandia | 1 | 0 | 2 |
| Guatemala | 8 | 52 | 289 |
| Austria | 3 | 1 | 4 |
| Japón | 20 | 535 | 3.064 |
| Nicaragua | 5 | 88 | 310 |
| Nueva Zelanda | 43 | 762 | 4.055 |
| Rusia | 11 | 82 | 441 |
| Papúa Nueva Guinea | 6 | 56 | 450 |
| Islandia | 25 | 575 | 4.597 |
| Turquía | 5 | 91 | 490 |
| Alemania | 4 | 7 | 50 |

| | | | |
|-----------|-----|--------|--------|
| Italia | 33 | 843 | 5.520 |
| México | 37 | 958 | 7.047 |
| Francia | 3 | 16 | 95 |
| Indonesia | 22 | 1.197 | 9.600 |
| Total | 536 | 10.897 | 67.246 |

Tabla 24: Generación geotérmica por país.

La evolución de la generación geotérmica en el mundo se expone en la Figura 26. Se observa un incremento constante de 1000 [MW] por cada 5 años entre 1980 y 2005, a excepción de los períodos 1975-1980 y 2005-2010, en los cuales hay un incremento de 2000 [MW] en promedio. Estas variaciones en particular se deben a los efectos de la crisis del petróleo de 1973 sobre los mercados energéticos y al creciente interés en el uso de energías renovables respectivamente.

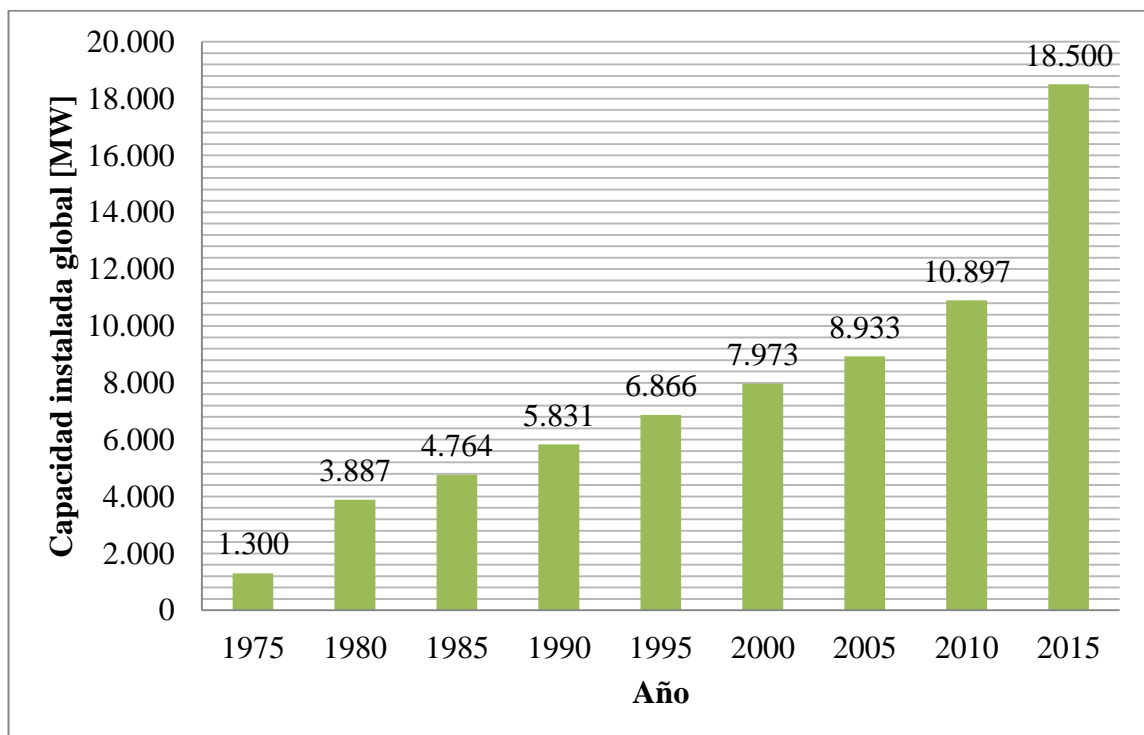


Figura 26: Evolución de la generación geotérmica en el mundo.

| Período | Incremento de capacidad instalada global | |
|-----------|--|--------|
| | [MW] | [%] |
| 1975-1980 | 2.587 | 199,0% |
| 1980-1985 | 877 | 22,6% |
| 1985-1990 | 1.067 | 22,4% |
| 1990-1995 | 1.035 | 17,7% |
| 1995-2000 | 1.107 | 16,1% |
| 2000-2005 | 960 | 12,0% |
| 2005-2010 | 1.964 | 22,0% |
| 2010-2015 | 7.603 | 69,8% |

Tabla 25: Incremento de la capacidad geotérmica instalada en el mundo.

Para el año 2015 se estima un aumento en la capacidad instalada de 7.603 [MW] con respecto al año 2010 por parte de la Asociación Geotermal Internacional (IGA) debido al gran número de centrales geotérmicas en estudio o en construcción en 46 países del mundo.

A largo plazo, la tecnología EGS permitirá la explotación de sistemas de Roca Seca Caliente. Esto en teoría convertiría a la energía geotérmica en una fuente de energía prácticamente ilimitada, dado que casi cualquier zona geológica a una profundidad conveniente podrá ser considerada como un reservorio [23].

Bibliografía

- [1] M. Dickson and M. Fanelli, *What is Geothermal Energy?:* Istituto di Geoscienze e Georisorse, 2004.
- [2] V. Pierce, *Introduction to Geothermal Power*, Primera ed.: The English Press, 2011.
- [3] A. Lahsen, *La Energía Geotérmica: Posibilidades de desarrollo en Chile.:* Departamento de Geología Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [4] A. Lahsen, F. Sepúlveda, J. Rojas, and C. Palacios, *Present Status of Geothermal Exploration in Chile.:* Proceedings World Geothermal Congress 2005.
- [5] Ministerio de Minería, *Ley N°19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmica.:* 2000.
- [6] R. DiPippo, *Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and enviromental impact*, Segunda ed.: Elsevier, 2008.
- [7] P. Bombarda and E. Macchi, *Optimum cycles for geothermal power plants.:* Proceedings World Geothermal Congress 2000, 2000.
- [8] Energy Efficiency and Renewable Energy, *An Evaluation of Enhanced Geothermal Systems Techonology: Geothermal Technologies Program*, U.S. Department of Energy, Ed., 2008.
- [9] Massachusetts Institute of Technology, *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century.:* 2006.

- [10] R. Ferreira, J. Leal, and R. Olvera, *Control Primario de Carga-Frecuencia de Sistemas Eléctricos de Potencia Aislados.*: Tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista, Instituto Politécnico Nacional, 2010.
- [11] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, N. J. Balu and M. G. Lauby, Eds.: McGraw-Hill Inc., 1994.
- [12] C. Aguirre, *Estudios Eléctricos de Sistemas de Potencia para la carrera de Ingeniería Eléctrica utilizando el software PowerFactory 13.1 de DIGSILENT.*: Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, 2008.
- [13] R. Arunachalam, *Time-domain Models for Power System Stability and Unbalance.*: Thesis for the degree of Master of Science in Electrical Engineering, Michigan Technological University, 2006.
- [14] IEEE Committee Report, *Dynamic models for Steam and Hydro turbines in Power System studies.*: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972.
- [15] IEEE Committee Report, *Excitation system models for Power System Stability studies.*: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981.
- [16] IEEE Power Engineering Society, *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.*, 2005.
- [17] Comisión Nacional de Energía, *Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.*: Gobierno de Chile, 2009.
- [18] Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado del Norte Grande. Sitio web del CDEC-SING. [Online]. <http://cdec2.cdec-sing.cl>.
- [19] R. McKibbin, *Fluid flow in a flashing cyclone separator.*: Proceedings 20th NZ Geothermal Workshop, 1998.

- [20] Comisión Nacional de Energía, *Informe Técnico Definitivo de Fijación de Precios de Nudo Abril 2012 Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)*.: Gobierno de Chile, 2012.
- [21] J. Horne, D. Flynn, and T Littler, *Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems*.: IEEE Transactions on Power Systems, 2004.
- [22] K. Watt, *Simulación dinámica para distintos escenarios de alta penetración eólica en el SIC*.: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, 2008.
- [23] C. R. Chamorro et al., *World geothermal power production status: Energy, environmental and economic study of high enthalpy technologies*.: Elsevier, 2011.