



**Comisión de Regulación
de Energía y Gas**

**ENERGÍA FIRME PARA EL CARGO POR
CONFIABILIDAD DE PLANTAS
GEOTÉRMICAS**

DOCUMENTO CREG-024
24 de abril de 2014

**CIRCULACIÓN:
MIEMBROS DE LA COMISIÓN DE
REGULACIÓN DE ENERGÍA Y
GAS**

TABLA DE CONTENIDO

1. ANTECEDENTES.....	182
2. ALCANCE.....	182
3. ANÁLISIS.....	182
3.1 Características de la generación con plantas geotérmicas.....	183
3.2 Estado internacional de la generación geotérmica.....	183
3.3 Experiencias en el país sobre el desarrollo de generación geotérmica	185
3.4 Propuesta.....	186
3.4.1 Metodología cálculo de la ENFICC para plantas geotérmicas	187
4. RECOMENDACIONES.....	188
5. REFERENCIAS	188
6. Anexo	189

3.1 Características de la generación con plantas geotérmicas

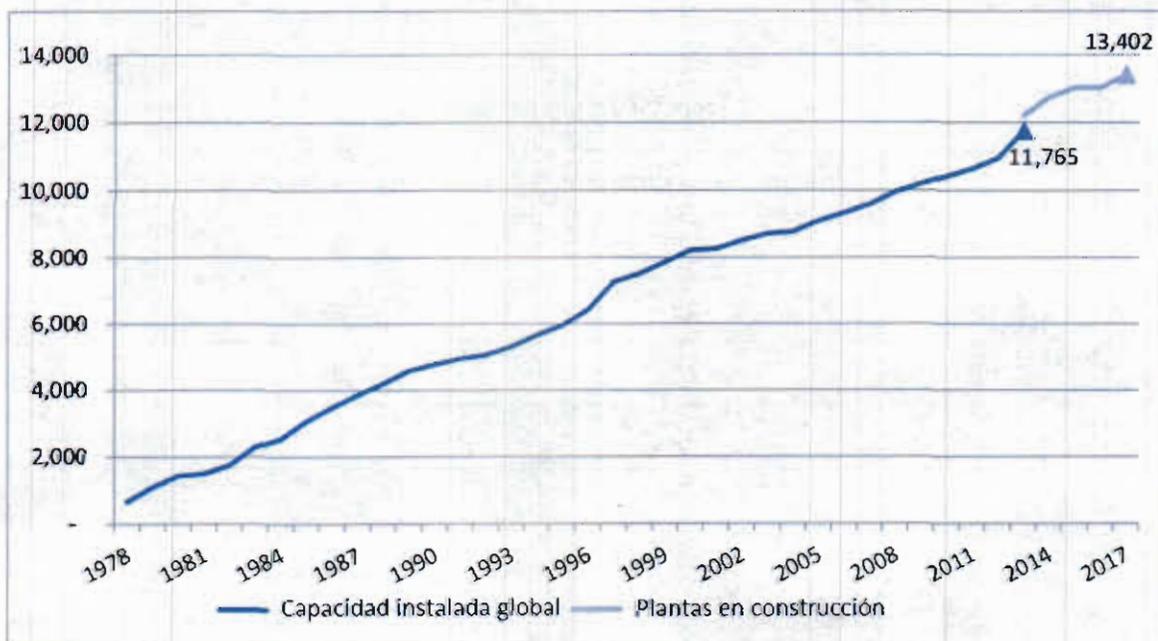
La energía geotérmica puede aprovecharse de yacimientos geotérmicos, los cuales pueden ser encontrados en sitios con características geográficas especiales a distintas profundidades.

La generación de energía geotérmica tiene las siguientes características:

1. Requiere una inversión importante en fase de exploración. Sin embargo, una vez en operación la planta tiene costos variables bajos que la hacen competitiva en el mercado de corto plazo.
2. El comportamiento de la temperatura ambiente en la ubicación de la planta es un factor importante en la generación de energía eléctrica geotérmica.
3. Factores de planta altos (mayor que 90%) en comparación con otras plantas de generación de energías alternativas no convencionales.
4. Se basa en un recurso energético cuyo período de aprovechamiento puede ser de decenas de años.
5. Es una generación amigable con el medio ambiente.

3.2 Estado internacional de la generación geotérmica

En la figura 1 se presenta el comportamiento de la capacidad instalada de plantas geotérmicas a nivel mundial en MW.

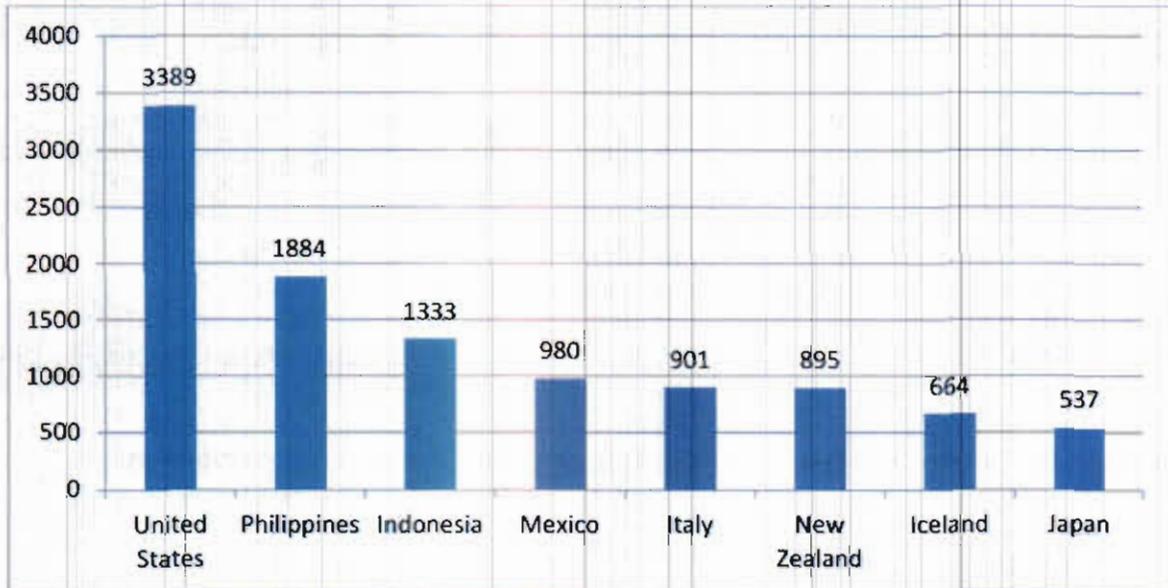


Fuente: Geothermal energy association, 2013.

Figura 1. Capacidad instalada de plantas de generación geotérmicas

df

En la figura 2 se encuentra una distribución de los países que tienen instalada la mayoría de plantas geotérmicas.



Fuente: Geothermal energy association, 2013.

Figura 2. Distribución por país de la capacidad instalada (MW) de plantas de generación geotérmicas

A continuación se presenta una tabla con los factores de planta de centrales geotérmicas en distintos países.

Tabla 1. Factores de planta

País	Número de unidades	Factores de disponibilidad [%]
Estados Unidos	209	94
Indonesia	22	92
Islandia	25	91
Kenia	10	98

Fuente: Grupo Dewhurst

25

3.3 Experiencias en el país sobre el desarrollo de generación geotérmica

En la figura 3 se presenta la ubicación de algunos proyectos reportados en etapa de pre-factibilidad y proyectos en estudio [3].

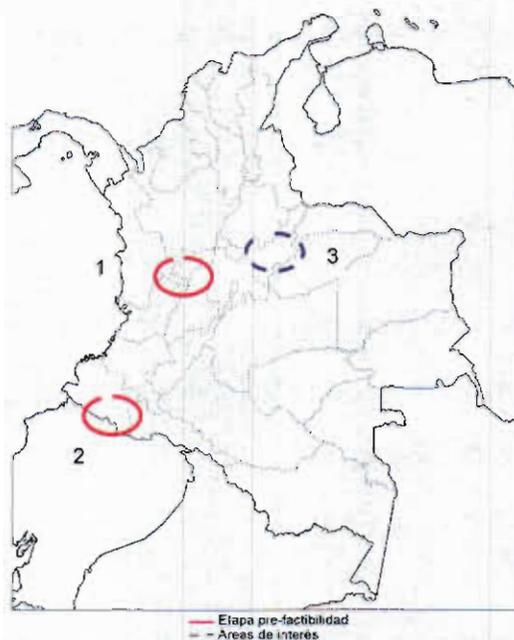


Figura 3. Ubicación de proyectos geotérmicos en etapa de pre-factibilidad y otras áreas de interés

Algunos datos sobre los proyectos señalados en la figura 3:

Tabla 2. Resumen proyectos geotérmicos en Colombia

Número en mapa	Nombre del proyecto	Ubicación
1	Macizo volcánico nevado del Ruiz	Nevado del Ruiz
2	Tufiño – Chiles – Cerro negro	Departamento de Nariño frontera con Ecuador
3	Paipa	Paipa, Boyacá

CS

3.4 Propuesta

De acuerdo a lo mencionado en las secciones anteriores y al análisis en el documento entregado a la Comisión por parte del Grupo Dewhurst (ver Circular CREG 100 de 2013), a continuación se presenta una propuesta para determinar la Energía Firme de una planta geotérmica para el Cargo por Confiabilidad.

En (1) se presenta la ecuación para el cálculo de energía de cualquier tipo de planta geotérmica:

$$EN [kWh] = PONED \times FREC \times (1 - IHF) \quad (1)$$

Donde,

EN: Energía generada por hora [kWh]

PONED: Potencia neta específica de diseño [kWh/kg/s]

FREC: Flujo del recurso térmico [kg/s]

IHF: Disponibilidad Histórica Forzada.

La componente *PONED* tiene un modelo diferente para cada tipo de planta geotérmica. Tal como se encuentra en el documento presentado por el grupo Dewhurst, se analizaron dos tipos de plantas geotérmicas, las binarias y *flash*. Para este último grupo existen tres modelos diferentes, según la temperatura del recurso geotérmico.

La componente *PONED* para plantas binarias, las cuales son usadas típicamente para temperaturas de recurso geotérmico entre 90 °C y 170 °C, está dada por la siguiente ecuación:

$$PONED = (3.4 \times 10^{-3}) \cdot TR^2 - (2.5 \times 10^{-3}) \cdot ITA^2 - (9.35 \times 10^{-3}) \cdot TR \cdot ITA - 0.2 \cdot TR + 0.8 \cdot ITA - 2.2 \quad (2)$$

Donde,

TR: Temperatura del recurso geotérmico [°C].

ITA: Temperatura ambiente [°C].

La componente *PONED* para plantas tipo *flash*, las cuales son usadas típicamente para temperaturas de recurso geotérmico entre 140 °C y 300 °C, están dadas por la siguientes ecuaciones.

- Para plantas tipo *flash* con temperatura de recurso geotérmico entre 140 °C y 180 °C, la componente *PONED* es como sigue:

$$PONED = (-2.8 \times 10^{-3}) \cdot TR^2 - (8.5 \times 10^{-4}) \cdot ITA^2 - (4.1 \times 10^{-3}) \cdot TR \cdot ITA + 1.7 \cdot TR + 0.13 \cdot ITA - 174.4 \quad (3)$$

- Para plantas tipo *flash* con temperatura de recurso geotérmico entre 180 °C y 240 °C, la componente *PONED* es como sigue:

$$PONED = (2.1 \times 10^{-3}) \cdot TR^2 - (2.15 \times 10^{-4}) \cdot ITA^2 - (5.1 \times 10^{-3}) \cdot TR \cdot ITA + (1.1 \times 10^{-2}) \cdot TR + 0.3 \cdot ITA - 27.8 \quad (4)$$

- Para plantas tipo *flash* con temperatura de recurso geotérmico entre 240 °C y 300 °C, la componente *PONED* es como sigue:

$$PONED = (2.5 \times 10^{-3}) \cdot TR^2 + (3.3 \times 10^{-3}) \cdot ITA^2 - (6.5 \times 10^{-3}) \cdot TR \cdot ITA - (8.4 \times 10^{-2}) \cdot TR + 0.5 \cdot ITA - 27.8 \quad (5)$$

En el Anexo de este documento se encuentra algunas simulaciones al modelo.

3.4.1 Metodología cálculo de la ENFICC para plantas geotérmicas

En la ecuación 1, la componente *PONED* tiene como variable aleatoria la Temperatura Ambiente, *ITA*. Para el cálculo de la *ENFICC* se debe contar con una serie histórica horaria de temperatura ambiente igual o mayor a diez (10) años, medida en el sitio de la planta con validación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

Se deben declarar como parámetros de diseño las componentes *TR* y *FREC* de la ecuación 1. El C.N.O. establecerá protocolos para verificar estos parámetros y las series de Temperatura Ambiente, *TA*.

Para el caso de *IHF* de la ecuación 1 se aplicará el procedimiento vigente de *IHF* para plantas térmicas.

Con los parámetros de diseño y la serie histórica horaria de temperatura ambiente se calcula la energía horaria según la ecuación 1. Para el cálculo de energía diaria se acumula el resultado de la energía horaria para cada día de toda la serie.

La Energía Firme para el Cargo por Confiabilidad, ENFICC, será el mínimo valor de la serie histórica calculada en términos de kWh/día.

4. RECOMENDACIONES

De acuerdo con los análisis presentados en este documento, se recomienda poner en consulta una resolución que presente la metodología para determinar la Energía Firme de plantas geotérmicas para el Cargo por Confiabilidad.

5. REFERENCIAS

1. Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG. Resolución CREG 071 de 2006.
2. Grupo Dewhurst. "Developing the methodology for calculation of the firm energy of a geothermal power plant". Documento presentado a la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG. Diciembre 19 de 2013.
3. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). International Renewable Energy Agency (IRENA). "Reporte del estado de la geotermia en Colombia". Febrero de 2013.
4. Geothermal Energy Association, GEA. "2013 Geothermal power: international market overview". Septiembre de 2013.
5. Electric Power Research Institute, EPRI. "Geothermal power: Issues, technologies, and opportunities for research, development, demonstration, and deployment". Febrero de 2010.
6. Isagen S.A. E.S.P. "Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia". Año 2012.
7. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.
8. Carlos Julio Zapata. "Análisis probabilístico y simulación". Universidad Tecnológica de Pereira, Julio de 2010.

CS

6. ANEXO

Simulaciones del modelo

Se realizaron simulaciones al modelo teniendo en cuenta distintos escenarios de operación de una planta geotérmica. Dado el comportamiento estocástico del problema, se implementó un modelo de Monte Carlo para determinar el comportamiento de la energía de plantas geotérmicas.

Los pasos para la simulación de un modelo de Monte Carlo es como sigue:

1. Definir el número de casos de la simulación. Para este modelo y para cada escenario se realizaron 10,000 simulaciones.
2. Ingresar los parámetros de las variables aleatorias. Para este modelo se ingresan los datos de temperatura ambiente y se definen los escenarios de operación (diseño) de la temperatura y el flujo del recurso geotérmico.
3. Generar números aleatorios para las variables correspondientes.
4. Calcular la energía según se definió en la ecuación número 1.
5. Guardar los datos para cada una de las simulaciones.
6. Cuando se cumpla el número de iteraciones se finaliza el proceso, sino se continua desde el paso número 3.
7. Finalmente, se obtienen los resultados de todas las simulaciones.

Los datos para las simulaciones fueron obtenidos de [1], [2], [3] y [7].

En la figura 4 se muestran los resultados para una planta de generación geotérmica con características similares al proyecto en el nevado del Ruíz. Cabe destacar que en [3] se menciona que las temperaturas del recurso podrían estar alrededor de 200 °C, por esto se realizan las simulaciones con esta temperatura.

Se puede observar que: (1) La temperatura ambiente influye de manera significativa en la energía de salida de una planta geotérmica y (2) a medida que la temperatura ambiente aumenta, la generación de energía disminuye. Ambos aspectos corresponden a lo analizado por los consultores contratados por la Comisión.

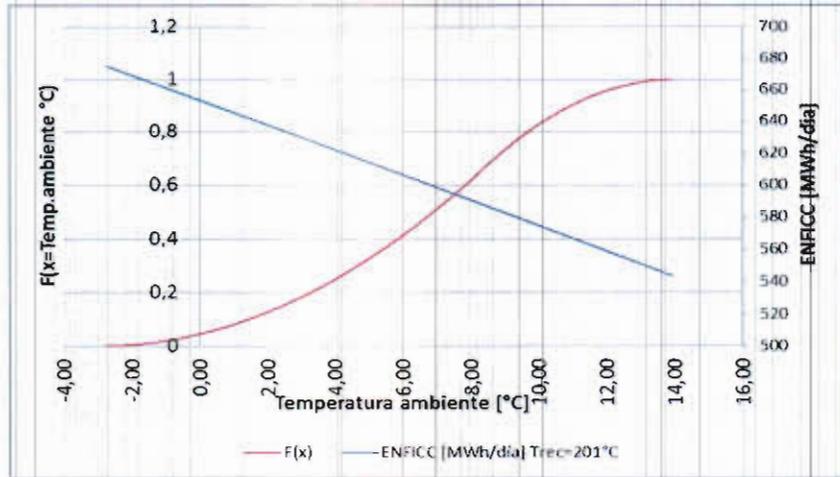


Figura 4. Función de distribución de probabilidad y energía (T.Rec = 200°C) para proyecto geotérmico nevado del Ruíz

En la figura 5 se muestran los resultados para diferentes temperaturas de recurso (Trec) en el campo.

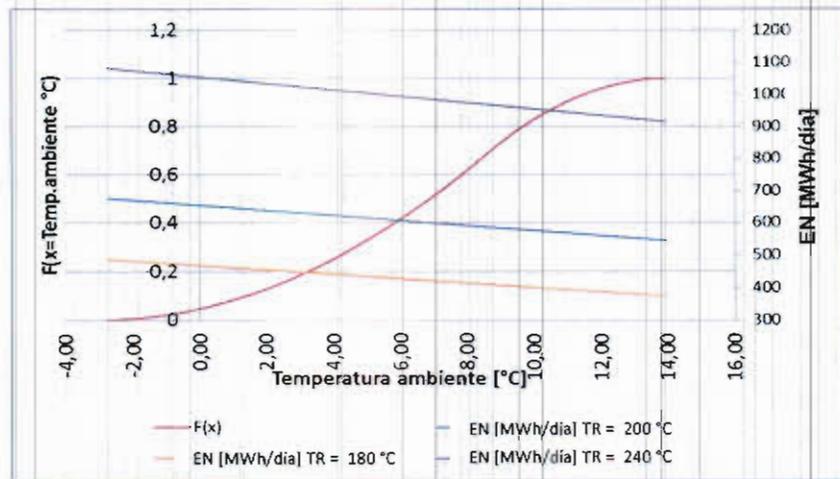


Figura 5. Función de distribución de probabilidad y energía (diferentes T.Rec) para proyecto geotérmico nevado del Ruíz

Se puede observar, en línea con lo analizado en el documento del grupo Dewhurst que la energía eléctrica de una planta geotérmica es directamente proporcional a la temperatura del recurso geotérmico.

Se realizaron simulaciones para analizar el impacto en épocas secas. Se observó, según los datos con los que se cuentan, que en periodos secos puede variar la temperatura en alrededor 5 °C respecto al escenario utilizado en las figuras 4 y 5 y en la misma zona. A

5

continuación una tabla donde se presentan las diferencias porcentajes respecto al escenario de la figura 4.

Tabla 3. Comparación de resultados respecto a escenario seco

F(x) [%]	Energía [MWh/día] sin F. El Niño	Energía [MWh/día] en F. El Niño	Dif. Porcentual [%]
100	543,6	504,5	7,2
95	560,3	528,5	5,7
90	567,4	538,8	5,0
80	577,4	553,4	4,2
70	585,1	564,6	3,5

Las figuras del escenario en periodo seco se muestran a continuación:

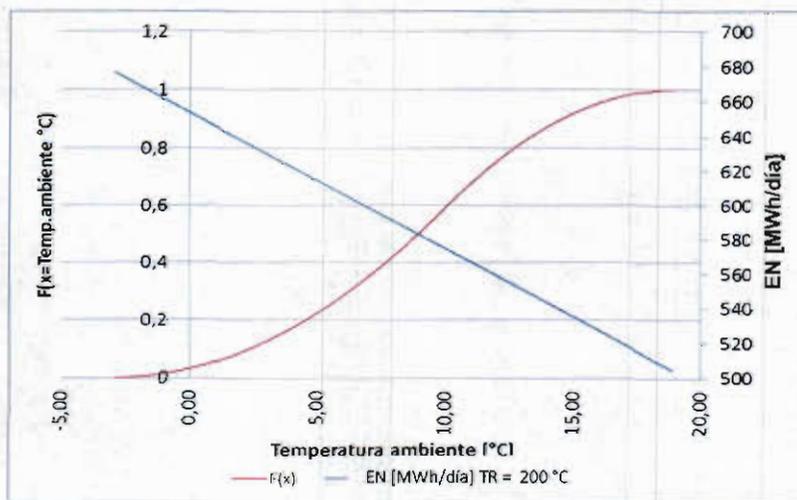


Figura 6. Función de distribución de probabilidad y Energía (T.Rec = 200°C) para proyecto geotérmico nevado del Ruiz en periodo seco

CS

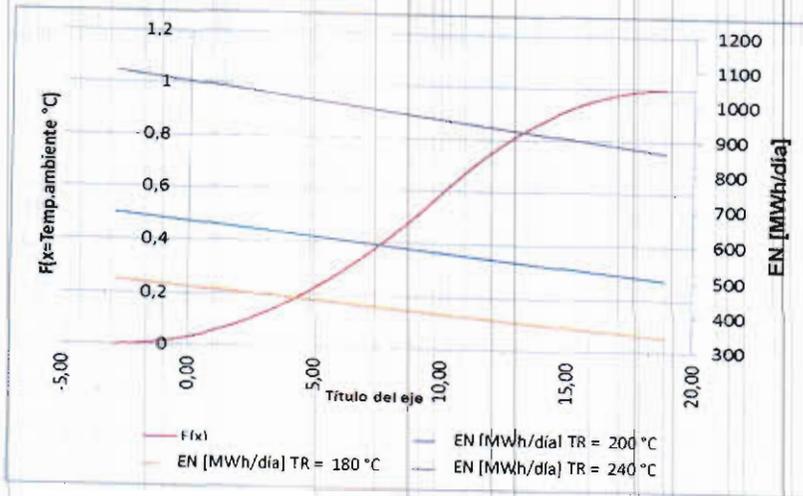


Figura 7. Función de distribución de probabilidad y energía (diferentes T.Rec) para proyecto geotérmico nevado del Ruíz en periodo seco

CS