



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE
LA INSTALACIÓN DE BOMBAS
DE CALOR GEOTÉRMICAS EN
MÉXICO

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

EDWUIN ALFONSO GARCÍA ZAFRA



Ciudad Universitaria, CDMX, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: MARTIN RIVERA TOLEDO**
VOCAL: **Profesor: FEDERICO CARLOS HERNANDEZ CHAVARRIA**
SECRETARIO: **Profesor: HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ**
1er. SUPLENTE: **Profesor: ILEANA RODRIGUEZ CASTAÑEDA**
2° SUPLENTE: **Profesor: LUIS ANGEL MORENO AVENDAÑO**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM, CIUDAD UNIVERSITARIA

ASESOR DEL TEMA:

DR. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ

SUSTENTANTE:

EDWUIN ALFONSO GARCÍA ZAFRA

Agradecimientos

Se agradece al CeMIE-Geo proyecto 207032 Conacyt/Sener por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Resumen

La energía geotérmica se usa hoy en día para la generación de electricidad en más de 24 países y en una gran variedad de actividades para el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja y media entalpía, por ejemplo: bombas de calor geotérmicas (BCG), para acondicionamiento de espacios, acuicultura, agricultura, usos industriales, etc. agrupadas bajo el nombre genérico de usos directos, en alrededor de 82 países. México es líder internacional en generación de electricidad con geotermia, ocupa el sexto lugar en el mundo con 908 MWe instalados, sin embargo, el uso directo del calor geotérmico es marginal, ascendiendo a solo 156 MWt, lo que representa una fracción sumamente pequeña de su potencial nacional y su uso principal es en balneología y balnearios.

Las BCG representan la tecnología geotérmica de mayor crecimiento en el mundo, son competitivas, tienen bajos costos de operación, son durables y confortables, de bajo mantenimiento, amigables con el ambiente, requieren de poco espacio, y pueden ser instaladas en prácticamente cualquier parte. A nivel internacional, representan el 70.9% en capacidad instalada de todos los usos directos del calor geotérmico, a pesar de ello, en México, sólo se tienen unos cuantos proyectos que siguen aún en desarrollo.

En el presente estudio se expuso el estado actual de la geotermia a nivel mundial y nacional. Se describió el funcionamiento de una BCG, su diseño, diferentes configuraciones y demás características que deben considerarse para una adecuada instalación. También se analizaron las causas y motivos que llevaron a los países líderes en esta tecnología a la implementación de las BCG y se identificaron las diversas variables que han frenado el desarrollo de la misma, entre las cuales destacan: alto costo inicial asociado con la perforación del intercambiador de calor en el subsuelo, la limitada falta de conocimiento por parte de los usuarios, legisladores y reguladores, que trae como consecuencia un adecuado plan de negocio para su despliegue en el mercado.

Se detallaron las necesidades de confort térmico y los retos que esto representa para el Gobierno Federal en México, ya que se estima que el consumo de energía eléctrica aumenta hasta en un 50% en los meses más cálidos del año, como consecuencia del alto consumo de energía que los equipos de aire acondicionado requieren. Se analizó el escenario actual en nuestro país, tomando en cuenta factores legales, económicos y tecnológicos, principalmente, en donde se encontró que existen limitaciones en cuanto a la formulación de políticas públicas y regulación, así como en el campo de investigación y desarrollo.

Por último, se examinaron dos casos de estudio, que tomaron en cuenta diversos parámetros que influyen en la rentabilidad de una BCG en el país; para dicho tratamiento, se elaboró un análisis de sensibilidad con la finalidad de cuantificar las variables y sentar las bases que permitan conducir a México hacia la apertura de una tecnología bien conocida a nivel mundial. Para este apartado se encontró que, las variables que más influyen en la rentabilidad del proyecto, en orden decreciente de consideración, son: la inversión inicial, la eficiencia, el tiempo de operación y el precio de la energía eléctrica.

Objetivos generales y específicos

Objetivo general

- Realizar un estudio de factibilidad sobre la implementación de Bombas de Calor Geotérmicas en México.

Objetivos específicos

- Identificar y analizar las causas que han impedido el desarrollo de BCG en México.
- Proponer las medidas necesarias para la apertura del mercado de BCG en nuestro país.
- Elaborar el estudio del arte sobre los recursos geotérmicos de baja entalpia en México y en el mundo para identificar las áreas de oportunidad.
- Hacer una comparación de los países líderes en BCG, examinar su estado actual, y las medidas que implementaron para posicionarse entre los mejores en el aprovechamiento de esta tecnología.
- Identificar las necesidades y oportunidades que el acondicionamiento de espacios representa para México.
- Realizar un caso de estudio que ejemplifique la situación actual en el país.

Tabla de contenido

Agradecimientos	I
Resumen	II
Objetivos generales y específicos	IV
Tabla de contenido	V
Lista de Figuras	VIII
Lista de Tablas	X
Nomenclatura	XI
Capítulo 1. Antecedentes	13
1.1. Geotermia	13
1.1.1. Historia de la geotermia	13
1.1.2. La energía geotérmica a nivel mundial	16
1.1.3. Balance térmico o flujo de calor	16
1.1.4. Teoría de las placas tectónicas	18
1.1.5. Clasificación de Recursos Geotérmicos	19
1.1.6. Usos directos de la Geotermia	21
1.2. Bombas de Calor Geotérmicas	24
1.2.1. Generalidades	24
1.2.2. Principio de operación	25
1.2.3. Desempeño de una BCG	28
1.2.4. Componentes de una BCG	31
1.2.5. Clasificación de BCG	31
1.2.6. Sistemas de Circuito Cerrado	32
1.2.7. Sistemas de Circuito Abierto	35
1.2.8. Conexión con el subsuelo	36
1.2.9. Longitud del Intercambiador de Calor	37
1.2.10. Carga térmica	39
1.2.11. Sistemas de distribución de energía	40
1.2.12. Ventajas de las BCG	41
1.3. Conclusiones	43
Capítulo 2. Desarrollo y estado actual de Bombas de Calor Geotérmicas a nivel mundial	45
2.1. Introducción	45
2.2. Estado actual de las BCG a nivel mundial	45

2.3	Desarrollo tecnológico e industrial a nivel mundial	47
2.4	Factores en el desarrollo del mercado.....	48
2.5	Casos de Estudio.....	49
2.5.1	Aplicación en China.....	49
2.5.2	Introducción	49
2.5.3	Desarrollo de mercado y estado actual de aplicación de BCG.....	51
2.5.4	Políticas para desarrollo de BCG en China.....	53
2.5.5	Aplicación en EUA.....	55
2.5.6	Introducción	55
2.5.7	Estado actual de aplicación de BCG y desarrollo del mercado	55
2.5.8	Políticas para desarrollo de BCG en EUA.....	57
2.6	Análisis comparativo	60
2.7	Conclusiones.....	62
Capítulo 3. Bombas de Calor Geotérmicas en México, retos y oportunidades.		63
3.1	Introducción	63
3.2	Usos directos de la geotermia en México.....	63
3.3	Confort térmico.....	64
3.4	Necesidades de confort térmico en México	65
3.5	Tarifas de Energía Eléctrica en México	67
3.6	Consumo de energía eléctrica para acondicionamiento de espacios.....	72
3.7	Mercado de aire acondicionado	76
3.8	Marco legal	77
3.9	Recursos económicos y humanos.....	79
3.10	Conclusiones.....	81
Capítulo 4. Estudio de Factibilidad		82
4.1	Introducción.....	82
4.2	Definición de parámetros técnicos y económicos	82
4.3	Conceptos económicos	82
4.4	Método del Valor Presente Neto (VPN)	83
4.5	Tasa interna de Rendimiento (TIR)	83
4.6	Costo de instalación.....	84
4.7	Costo del intercambiador de calor en el subsuelo	84
4.8	Costo de configuración vertical en México	87

4.9	Capacidad de enfriamiento	88
4.10	Caso de Estudio Cancún.....	88
4.10.1	Consumo de energía eléctrica.....	90
4.10.2	Inversión inicial.....	92
4.10.3	Evaluación del proyecto	93
4.11	Caso de Estudio Mexicali	94
4.11.1	Consumo de energía eléctrica.....	95
4.11.2	Cálculo de carga térmica.....	96
4.11.3	Inversión inicial.....	96
4.11.4	Evaluación del proyecto	97
4.12	Análisis de sensibilidad.....	98
4.12.1	Metodología del tipo de variables a evaluar	98
4.13	Conclusiones.....	105
Capítulo 5.	Conclusiones generales	106
Referencias y Bibliografía	108

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1-1.-Industria química del ácido bórico, Larderello, primera mitad del siglo XIX.	14
Figura 1-2.-Piero Ginori Conti, 1904. Primer generador de energía eléctrica a partir de geotermia.	15
Figura 1-3.-Adaptación, Capacidad instalada a nivel mundial. (Council World Energy, 2016)	16
Figura 1-4.-Estructura interna de la Tierra (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).	18
Figura 1-5.-Placas tectónicas en la corteza terrestre. (ORT, 2015)	19
Figura 1-6.-Representación de un sistema hidrotermal. (Dickson & Fanelli, 2006)	20
Figura 1-7.-Aplicaciones de recursos geotérmicos en función de su temperatura.	22
Figura 1-8.-Adaptación, Capacidad instalada y consumo de energía para usos directos. (Lund & Boyd, 2016)	23
Figura 1-9.-Adaptación, Comparación de las diferentes aplicaciones de usos directos para diferentes periodos. (Lund & Boyd, 2016)	24
Figura 1-10.-Adaptación, Ciclo termodinámico de compresión mecánica de vapor; Diagrama presión-entalpía del refrigerante en el ciclo. (Naicker, 2015)	26
Figura 1-11.-Operación de una BCG en modo calefacción y modo enfriamiento. (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, 2010)	27
Figura 1-12.-Bomba de Calor en modo calefacción (Luna & García, 2016)	28
Figura 1-13.-Bomba de Calor en modo enfriamiento (Luna & García, 2016).	28
Figura 1-14.-Coeficiente de desempeño (COP).	29
Figura 1-15.-Adaptación, Desempeño del COP_H en función de la T_f (T. L. Boyd & Lienau, 1995).	30
Figura 1-16.-Adaptación, Desempeño de la EER en función de la T_f (T. L. Boyd & Lienau, 1995).	30
Figura 1-17.- Adaptación, Elementos que componen una BCG. (Green Building Advisor, 2016)	31
Figura 1-18.-Sistema de circuito cerrado con arreglo vertical	33
Figura 1-19.- Sistema horizontal de circuito cerrado (CANMET Energy Technology Centre, 2005)	33
Figura 1-20- Sistema de circuito cerrado tipo "trinchera"	34
Figura 1-21-Sistema de circuito cerrado en un cuerpo de agua.	35
Figura 1-22-Sistema de circuito abierto.	35
Figura 1-23.-Adaptación, Variación de la temperatura del subsuelo en función de la profundidad. (Self, Reddy, & Rosen, 2013)	36
<i>Figura 1-24.-Adaptación, Comparación del incremento de temperatura entre una bomba de calor tipo aire y una BCG. (Canadian GeoExchange Coalition, 2010)</i>	<i>37</i>
Figura 1-25- Sistema de distribución de energía. Aire forzado (lado izquierdo) y piso radiante (lado derecho).	40
Figura 1-26-Distribución de temperatura de un sistema de aire forzado contra un piso radiante (MAR Construcciones, 2016).	41

Capítulo 2

Figura 2-1.-Adaptación, Capacidad instalada a nivel mundial para usos directos de geotermia. (Lund & Boyd, 2016).....	46
Figura 2-2.-Adaptación, Número de BCG instaladas a nivel mundial (Simon J. Rees, 2016).	46
Figura 2-3.-Adaptación, Número de BCG instaladas por millón de personas (Simon J. Rees, 2016).	47
Figura 2-4.-Países con más emisiones de CO ₂ en el 2016. (Elaboración propia con datos del Global Carbon Atlas).....	50
Figura 2-5.-Adaptación, Crecimiento de las BCG en comparación de sistemas convencionales de calefacción. (Zhu et al., 2015)	52
Figura 2-6.-Adaptación, Distribución de BCG en China (Liu, Lu, Hughes, & Cai, 2015).....	53
Figura 2-7.-Adaptación, Incremento en la aplicación de BCG en China (Yang et al., 2010).	54
Figura 2-8-Distribución de BCG en EUA. (Lu, Cai, & Chen, 2015).....	56
Figura 2-9.- Adaptación, Clasificación del tipo de instalación para el sector comercial y residencial. (T. Boyd, Sifford, & Lund, 2015)	57

Capítulo 3

Figura 3-1.- Adaptación, Visualización de la zona de confort térmico en una carta psicométrica (Morales-Valdés et al., 2014).	65
Figura 3-2-Temperatura máxima promedio mensual (°C), junio de 2017. (Sistema Meteorológico Nacional)	66
Figura 3-3-Temperatura mínima promedio mensual (°C), enero 2017. (Sistema Meteorológico Nacional)	67
Figura 3-4.- Tarifas de electricidad en función de la temperatura media mínima. (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2016).....	68
Figura 3-5.- Precios promedio de energía eléctrica por sector tarifario. (Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética)	71
Figura 3-6.- Consumo anual de electricidad en México. (Lawrence Berkeley National Laboratory / U.C. Berkeley / UNAM-IER, 2018)	72
Figura 3-7.-Carga de enfriamiento dividido en los diferentes sectores.....	73
Figura 3-8.- Distribución de los consumos de energía en un hotel. (Rowe et al., 2009)	75
Figura 3-9.- Tendencia histórica de consumo por tipo de unidad. (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2011).....	77

Capítulo 4

Figura 4-1.-Adaptación, Costo de instalación del intercambiador de calor en el subsuelo (Rafferty, 2008).	85
Figura 4-2.-Índice de Precios Productor para “Plomería, contratistas de calefacción y aire acondicionado, trabajos en construcciones no residenciales”. (Elaboración propia con datos del Departamento del Trabajo de los EUA)	86

Figura 4-3.- Costo de instalación actualizado del intercambiador de calor en el subsuelo (Elaboración propia con datos de Kevin Rafferty).	87
Figura 4-4.- Grados día de enfriamiento para Cancún.	89
Figura 4-5.- Sistema de aire acondicionado tipo condensadora.	90
Figura 4-6.- Consumo mensual de energía eléctrica en oficinas comerciales de Cancún para el año 2017.....	91
Figura 4-7.- Flujos de caja de la instalación de una BCG en Cancún.	94
Figura 4-8.-Grados-día de enfriamiento para Mexicali.	95
Figura 4-9.- Grados-día de calefacción para Mexicali.	95
Figura 4-10.- Consumo de energía eléctrica para una institución bancaria en Mexicali.	96
Figura 4-11.- Flujos de caja de la instalación de una BCG en Mexicali.....	98
Figura 4-12.- Gráfico de araña del VPN para la instalación en Cancún.	99
Figura 4-13.- Gráfico de araña del VPN para la instalación en Mexicali.	99
Figura 4-14.- Gráfico tipo tornado del VPN para la instalación en Cancún.....	100
Figura 4-15.-Gráfico tipo tornado del VPN para la instalación en Mexicali.	101
Figura 4-16.- Flujos de caja para caso hipotético en Cancún.	104
Figura 4-17.- Flujos de caja para caso hipotético en Mexicali.	104

Lista de Tablas

Tabla 1-1.-Lineamientos de longitud mínima del intercambiador de calor en el subsuelo.....	39
Tabla 2-1.-Beneficios de los créditos otorgados por el Gobierno Federal de los EUA.....	59
Tabla 2-2.-Comparación del estado actual de BCG en China y Estados Unidos. (Liu et al., 2015)....	60
Tabla 2-3.- Principales barreras que han frenado el desarrollo de BCG en China y EUA.....	61
Tabla 3-1-Resumen de Usos Directos de Geotermia en México. (Gutiérrez-Negrín et al., 2015)	64
Tabla 3-2.-Cuotas aplicables para temporada fuera de verano. (Elaboración propia con datos de CFE).....	69
Tabla 3-3.- Cuotas aplicables para temporada de verano. (Elaboración propia con datos de CFE) .	70
Tabla 3-4.-Personal laborando en Geotermia. (Gutiérrez-Negrín et al., 2015)	79
Tabla 3-5.-Inversión total en Geotermia. (Gutiérrez-Negrín et al., 2015)	81
Tabla 4-1.-Distribución del consumo de energía eléctrica para el mes de enero de 2017.....	91
Tabla 4-2.- Consumo mensual de aire acondicionado y porcentaje máximo de operación de los equipos de aire acondicionado para el año 2017.	92
Tabla 4-3.-Resumen de parámetros económicos para casos hipotéticos.....	103

Nomenclatura

°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
A	Área
AA	Aire acondicionado
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ANFAD	Asociación Nacional de Fabricantes de Aparatos Domésticos
BC	Bomba de Calor
BCG	Bomba de Calor Geotérmica
Btu	British Thermal Unit
CeMIEGeo	Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica
CENACE	Centro Nacional de Control de Energía
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CICESE	Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
COP	Coefficient of performance
COP _c	Coefficient of performance, enfriamiento
COP _H	Coefficient of performance, calentamiento
CRE	Comisión Reguladora de Energía
DAC	Domestica de Alto Consumo
D _e	Diámetro exterior
D _i	Diámetro interior
DOE	Department of Energy
EER	Energy Efficiency Ratio
EUA	Estados Unidos de América
FIDE	Fideicomiso Para el Ahorro de la Energía Eléctrica
ft	Pie
GDMTO	Gran Demanda en Media Tensión Ordinaria
GW	Gigawatt
h	Hora
HDPE	High Density Polyethylene
HM	Tarifa horaria, media tensión
IGSHPA	International Geothermal Source Heat Pump Association
in	Pulgada
INEEL	Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
kcal	Kilocaloría
kJ	Kilojoule
km	Kilometro
m	Metro
MWe	Megawatt eléctrico
MWt	Megawatt térmico
OM	Tarifa ordinaria, media tensión
PIB	Producto interno bruto
PMV	Predicted Mean Vote

PR	Periodo de Recuperación
PVC	Policloruro de vinilo
Q	Calor
SDR	Standard Dimension Ratio
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
Sener	Secretaría de Energía
T	Temperatura
T _e	Temperatura sumidero
T _f	Temperatura fuente
TIR	Tasa Interna de Retorno
TJ	Terajoule
U	Coficiente total de transferencia de calor
USD	Dólar de Estados Unidos
VPN	Valor Presente Neto
W	Trabajo
ΔT	Diferencia de temperaturas

Capítulo 1. Antecedentes

1.1. Geotermia

En general, la palabra geotermia se refiere al calor natural existente en el interior de la Tierra. Este calor tiene dos fuentes: el colapso gravitatorio que formó la Tierra y el decaimiento radioactivo de varios isótopos en la corteza terrestre. La baja conductividad térmica de la corteza rocosa determina un tiempo de enfriamiento de miles de millones de años. En la práctica, se denomina geotermia al estudio y utilización de la energía térmica que, transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos. (Arellano V., Iglesias E., 2008)

Toda la corteza terrestre contiene energía geotérmica pero esta sólo puede ser recuperada o aprovechada por un medio portador de energía adecuado; este medio debe ser lo suficientemente caliente, abundante, fácil de recuperar, económicamente viable, manejable y seguro. El agua cumple perfectamente con estos requerimientos debido a que el agua caliente y el vapor pueden ser recuperados a través de profundos pozos perforados. Además, a través del uso adecuado de intercambiadores de calor, esta energía puede ser transferida eficientemente en fase líquida o vapor hasta la superficie. (Toth & Bobok, 2017)

1.1.1. Historia de la geotermia

El hombre ha conocido y utilizado desde tiempos muy antiguos la energía térmica de la Tierra que se manifestaba en forma de manantiales, fumarolas, volcanes, entre otros; sin embargo, no fue hasta un período entre el siglo XVI y XVII, cuando las primeras minas fueron excavadas a unos pocos cientos de metros bajo nivel del suelo que, la humanidad dedujo, a partir de simples sensaciones físicas, que la temperatura de la Tierra aumentaba con la profundidad. La primera medición del perfil de temperatura se realizó probablemente en 1740, en una mina cerca de Belfort, en Francia. Un siglo después, en 1870 Sir William Thomson, mejor conocido como Lord Kelvin, utilizó métodos más sofisticados resolviendo la primera ecuación

diferencial de conducción de calor en coordenadas esféricas, que, debido a la forma esférica del planeta, suponía un modelo adecuado para calcular el flujo de calor, sin embargo, no fue hasta el siglo XX y el descubrimiento del papel desempeñado por el calor radiogénico, que pudimos comprender plenamente fenómenos como el equilibrio térmico y la historia térmica de la Tierra, los cuales serán descritos más adelante. (Dickson & Fanelli, 2006, p. 2) De hecho, todos los modelos térmicos modernos de la Tierra deben tener en cuenta el calor continuamente generado por la desintegración de los isótopos radioactivos de larga vida del uranio (U238, U235), el torio (Th232) y el potasio (K40), que están presentes en la Tierra.

La explotación de la energía geotérmica, comenzó en Larderello, Italia, donde se aprovechó el contenido energético del agua para evaporar ácido bórico de los manantiales, sustituyendo a la leña que era el combustible para llevar a cabo dicho proceso. Fue en el año de 1827 que Francisco Larderel, fundador de la industria geotérmica, desarrolló el proceso para aprovechar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación. También transformó la energía del vapor en energía mecánica para bombear líquidos mediante un sistema rudimentario de inyección de vapor, más tarde, se utilizó dicha energía en bombas centrífugas y reciprocantes además de poleas para poder ser utilizados en perforaciones o en la producción de ácido bórico. (Figura 1-1)

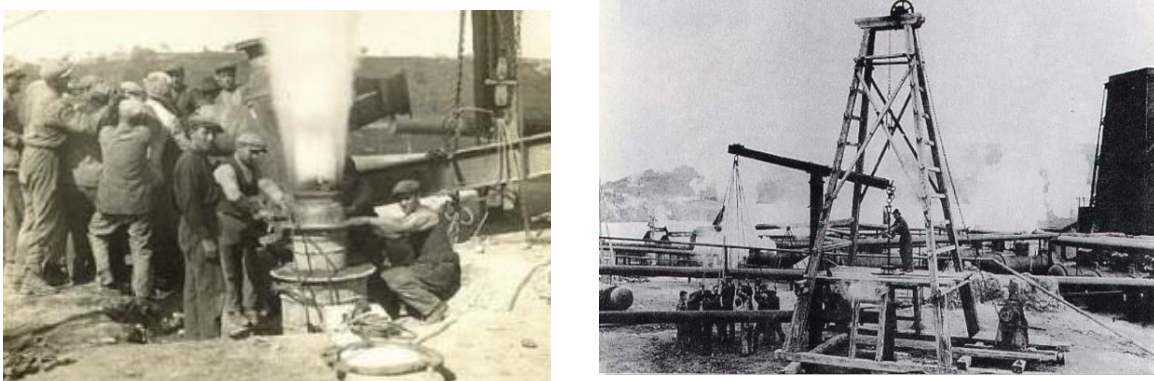


Figura 1-1.-Industria química del ácido bórico, Larderello, primera mitad del siglo XIX.

Entre 1850 y 1875 la planta de Larderello mantuvo en Europa el monopolio de producción de ácido bórico. Otros países también comenzaron a desarrollar sus

recursos geotérmicos a escala industrial, en Hungría, el ingeniero de perforación V. Zsigmondy en 1877 se convirtió en una leyenda en la historia geotérmica húngara, al perforar el pozo más profundo de Europa (971m), en Budapest, en 1877. (Bobok & Tóth, 2003)

Pocos años después, en 1892, entró en operación el primer sistema de calefacción distrital, en la ciudad de Boise, Idaho, EUA. Para el año de 1928, otro país pionero en la utilización de energía geotérmica, Islandia, comenzó a explotar sus fluidos geotérmicos, utilizó principalmente el agua caliente para calefacción doméstica. Para el año de 1904, un suceso de significativa relevancia para la geotermia ocurrió nuevamente en Larderello, con la generación de energía eléctrica a partir de vapor geotérmico. Piero Ginori Conti, fue el encargado de construir el primer generador eléctrico accionado con vapor geotérmico.



Figura 1-2.-Piero Ginori Conti, 1904. Primer generador de energía eléctrica a partir de geotermia.

El éxito del aprovechamiento de este recurso fue inminente, demostrando el valor industrial de la energía geotérmica que fue reflejado en el importante desarrollo de esta tecnología en varias regiones del mundo. Para 1942 la capacidad instalada en este lugar ya era de 128 MW. Por otra parte, se empezaron a perforar pozos geotérmicos en diversos países; en Japón, el primero tuvo lugar en Beppu, en 1919, dos años más tarde, más pozos geotérmicos fueron perforados en los Geysers, California, EUA. En 1958 entró en operación una planta geotermoeléctrica en Waieakei, Nueva Zelanda; otra más en 1959 Pathé, México; y en 1960 otra planta

en Los Geysers, EUA, seguido de más países los años siguientes.

1.1.2. La energía geotérmica a nivel mundial

La energía geotérmica contribuye con una pequeña porción del consumo de energía primaria a nivel mundial, incluso en generación de energía eléctrica, en la cual genera menos del 1% de todo el mundo. Sin embargo, en países como Filipinas donde los combustibles fósiles son muy escasos, la geotermia contribuye de manera fundamental con la demanda de energía y bienestar del país, por ejemplo: la energía producida mediante recursos geotérmicos representó el 17% del total de la energía generada en dicho país.

En el 2015, 315 MW de potencia fueron agregados a la capacidad instalada mundial, teniendo un total de 13.2 GW.(Council World Energy, 2016). Los países que mayor capacidad de generación de energía eléctrica a partir de geotermia, para finales del 2015, se muestran en la Figura 1-3.

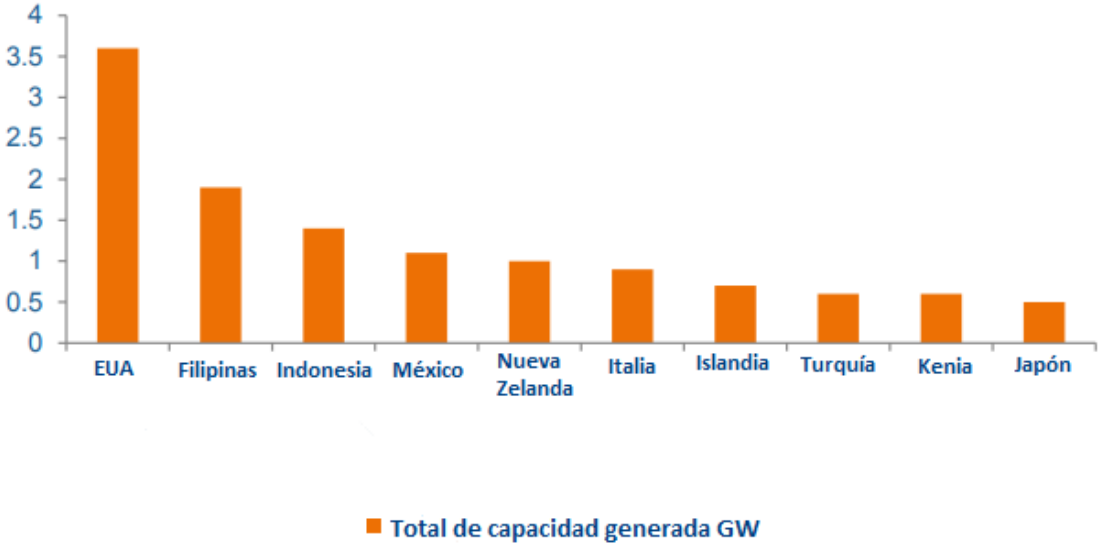


Figura 1-3.-Adaptación, Capacidad instalada a nivel mundial. (Council World Energy, 2016)

1.1.3. Balance térmico o flujo de calor

Para entender las manifestaciones geotérmicas que el hombre ha experimentado, tenemos que entender la estructura de la Tierra, ya que como se ha mencionado anteriormente, el interior de la Tierra está mucho más caliente que la superficie y por ello se produce un flujo de calor desde el interior de la misma hasta la superficie; este fenómeno es bien conocido como el “*gradiente geotérmico*” y se refiere al aumento de la temperatura con la profundidad en la corteza terrestre. A profundidades accesibles mediante perforaciones con tecnología moderna, de aproximadamente 10 km, el gradiente geotérmico promedio es de 2.5 a 3.0°C/ 100 m. Sin embargo, hay regiones en la Tierra donde el gradiente geotérmico es muy diferente al valor promedio. En áreas donde las rocas del basamento han sufrido un rápido hundimiento y la cuenca resultante es rellena con sedimentos geológicamente “muy jóvenes”, el gradiente geotérmico puede ser menor que 1°C/ 100 m. Por otra parte, en algunas “áreas geotermales” el gradiente es más de diez veces el valor promedio. (Dickson & Fanelli, 2006)

El modelo de la estructura de la Tierra describe cuatro esferas concéntricas las cuales incrementan considerablemente su densidad y temperatura con la profundidad. De adentro hacia afuera estas son: núcleo interno, núcleo externo, manto y corteza terrestre. En su parte más interna se encuentra el núcleo que a su vez se divide en interior y exterior. El primero tiene un radio de 1200 km, es sólido y extremadamente denso y está compuesta exclusivamente de hierro. El núcleo externo tiene un espesor de 2236 km, está constituida por hierro fundido con mezcla de elementos como oxígeno y azufre. Enseguida se localiza el manto, con un espesor de 2900 km; está compuesto de rocas ricas en olivinos, piroxenos y ciertos silicatos. Para llegar a la capa más externa, conocida como corteza terrestre, existe una frontera entre el manto y la corteza, llamada discontinuidad de Mohorovicic o Moho. En dicha frontera se presenta un cambio súbito de la velocidad de las ondas sísmicas, que indica un cambio de composición de material y de estado físico; se cree que la temperatura del Moho es de aproximadamente 600 °C, y que en el centro de la Tierra la temperatura es aproximadamente 5000 °C. (Arellano V., Iglesias E., 2008). En continentes, la corteza terrestre tiene un espesor de 20 a 65 km y cuya densidad es de 2670 kg/m³; se compone básicamente de rocas graníticas. La

corteza oceánica es más delgada, del orden de 5 a 6 km de espesor, densidad de 2950 kg/m^3 y se compone de basaltos y gabros. (Toth & Bobok, 2017)

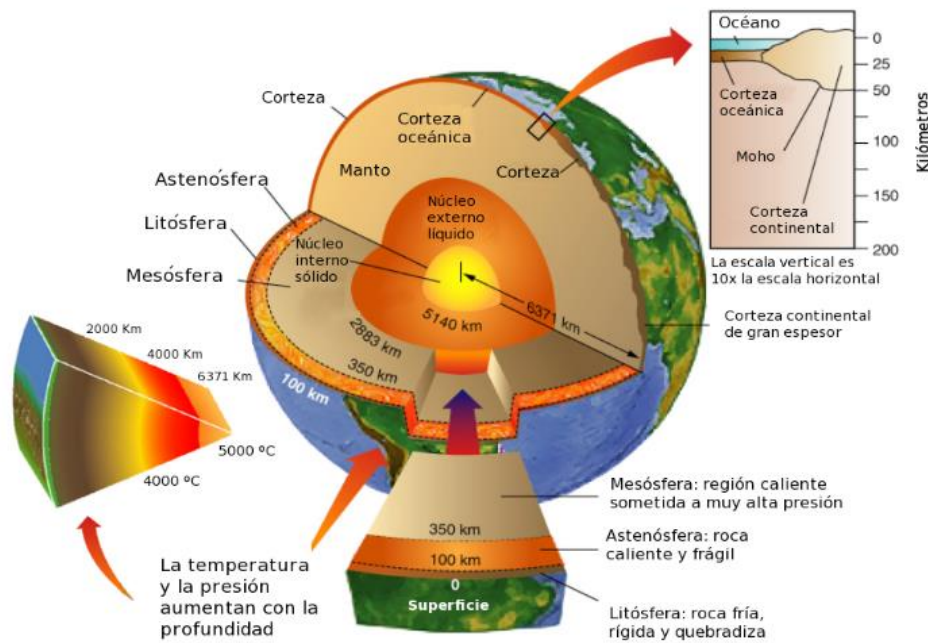


Figura 1-4.-Estructura interna de la Tierra (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).

1.1.4. Teoría de las placas tectónicas

Gracias a esta teoría, formulada en los años sesenta del siglo pasado, tenemos un mejor conocimiento del planeta y de sus procesos. La teoría trata acerca de la dinámica de la capa más externa de la Tierra, conocida como la litosfera y que incluye a la corteza y la parte superior del manto. Según la teoría, la litosfera está conformada por una docena de grandes placas y otras más pequeñas (Figura 1-5). Estas placas se mueven unas con respecto a otras y, en sus bordes, interactúan entre sí, ya sea convergiendo, divergiendo o simplemente deslizándose entre ellas. Estos movimientos dan lugar a fenómenos que modifican la morfología de la corteza, que influyen en los ciclos de elementos como el carbono y el azufre. Los bordes de las placas son zonas de intensa actividad sísmica y volcánica y, por consecuencia, de anomalías geotérmicas que pueden ser aprovechadas

industrialmente. Como consecuencia de todo esto, la corteza terrestre se renueva periódicamente, en escalas de tiempo de millones de años. (Quijano León, 2007)

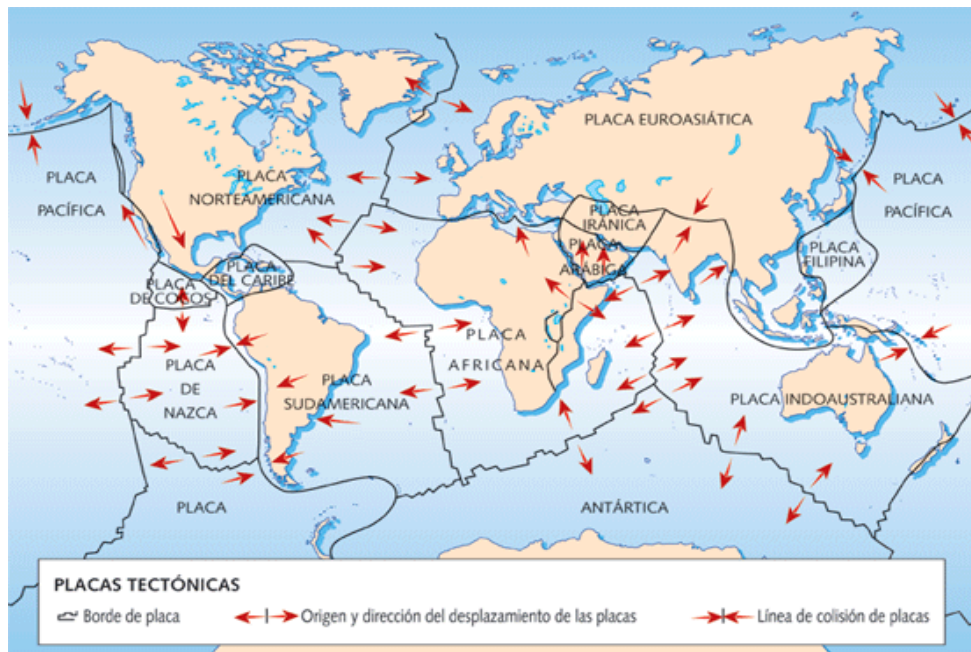


Figura 1-5.-Placas tectónicas en la corteza terrestre. (ORT, 2015)

1.1.5. Clasificación de Recursos Geotérmicos

Los sistemas geotérmicos existentes en la Tierra, se clasifican de manera general, con base a la temperatura del fluido que se extrae; cuando la temperatura del fluido es mayor a 200 °C se le considera un recurso de alta entalpía, ideal para la producción de electricidad con sistemas convencionales de generación. Si la temperatura del fluido está en un intervalo de 100 a 200 °C, o bien son menores de 100 °C, se les denomina sistema de mediana o baja entalpía, respectivamente. (Santoyo & Barragán-Reyes, 2010)

A la fecha se han identificado cinco tipos de sistemas geotérmicos:

- a) Sistemas hidrotermales.

Están constituidos por una fuente de calor, agua en fase líquida o vapor y la roca donde se almacena el fluido (Figura 1-6). El agua proveniente de lluvia, hielo o nieve se infiltra en la corteza terrestre a través de poros y fracturas, penetrando varios

kilómetros de profundidad, donde es calentada por la roca y alcanzando temperaturas, en algunos casos de hasta 400 °C. La existencia de estos yacimientos se manifiesta en la superficie por la existencia de manantiales calientes, fumarolas, geiseros, lagunas de lodo hirviente o suelos calientes. Estos sistemas pueden clasificarse en tres tipos principales: vapor dominante, líquido dominante (alta entalpía) y líquido dominante (baja entalpía). En la actualidad, estos sistemas son los únicos que se explotan para la generación comercial de energía eléctrica. (Arellano V., Iglesias E., 2008)

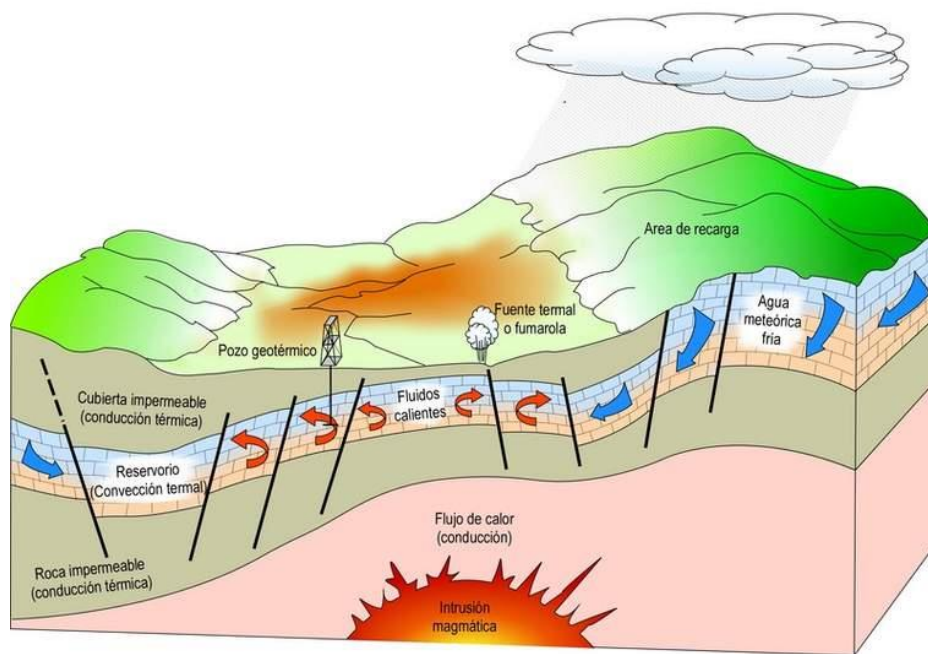


Figura 1-6.-Representación de un sistema hidrotermal. (Dickson & Fanelli, 2006)

b) Sistemas geotérmicos de roca seca caliente o sistemas geotérmicos mejorados.

Son sistemas rocosos que se encuentran en el subsuelo a profundidades entre 2 y 4 km con alto contenido energético, pero no contienen agua o esta es muy escasa. Estos tipos de recursos aún no se explotan comercialmente para generar electricidad, sólo existen unos cuantos proyectos en etapa de investigación y desarrollo y otros más en fase de demostración tecnológica. Se considera que la energía existente es inmensa, aunque su explotación requiere la creación de una

red de fracturas en la roca y la inyección de agua para que la roca transfiera calor al fluido y se aproveche la temperatura.

c) Sistemas Geopresurizados.

Contienen agua y metano disuelto a alta presión (~700 bar) y mediana temperatura (entre 90 y 200°C) y están generalmente confinados en yacimientos de roca sedimentaria. Este tipo de recursos de alta presión pueden ofrecer diferentes tipos de energía: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (energía cinética debido a que los fluidos con alta presión). Actualmente no se explotan comercialmente, aunque existen detectados algunos sistemas en Texas y Luisiana. Se ha estimado el potencial energético solamente en las costas de Texas en unos 40,000 MWt. Se desconoce el potencial de este recurso en México. (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010)

d) Sistemas Marinos.

Son recursos geotérmicos de alta entalpía existentes en el fondo del mar, que se han manifestado en forma de descargas hidrotermales, fumarolas o chimeneas. Estos sistemas han sido poco estudiados y a la fecha no se explotan comercialmente. En México, se realizaron estudios preliminares en el Golfo de California que revelaron manifestaciones térmicas de hasta 350 °C a unos 2600 m de profundidad.

e) Sistemas Magmáticos.

Son sistemas de roca fundida asociados con volcanes activos y pretenden ser un recurso explotable muy atractivo, ya que las temperaturas son superiores a los 800°C, desafortunadamente, la tecnología actual no permite su explotación debido a que no se cuentan con los materiales necesarios para soportar las altas temperaturas y la gran corrosión existente en las cámaras magmáticas.

1.1.6. Usos directos de la Geotermia

La utilización de la energía geotérmica para usos directos es la forma más antigua y versátil de aprovechar la energía geotérmica de media y baja entalpía. Las

tendencias actuales de los usos directos son principalmente para sistemas de calefacción que trabajan directamente o a través de bombas de calor, acuicultura, secado de cultivos, cultivo de plantas y hortalizas en invernaderos, procesos del papel y la industria cementera, procesamiento de alimentos, elaboración de cerveza, teñido de tejidos, derretimiento de nieve, enfriamiento de espacios, balneología, entre otros. Es importante mencionar que en algunos casos el potencial de los recursos de entalpía media y baja no se ha utilizado para la generación de energía debida al alto costo inicial y la limitada disponibilidad tecnológica, como en el caso de China, donde a pesar del alto potencial de los recursos geotérmicos, la energía geotérmica se ha empleado principalmente para aplicaciones de uso directo. (Rubio-Maya, Ambríz Díaz, Pastor Martínez, & Belman-Flores, 2015)

En la figura 1-7, se muestran las posibles aplicaciones de los recursos geotérmicos con base en la temperatura del fluido, en el cual, la gran mayoría pertenecen a usos directos y donde destacan las bombas de calor, cuya temperatura de aplicación es la más pequeña.

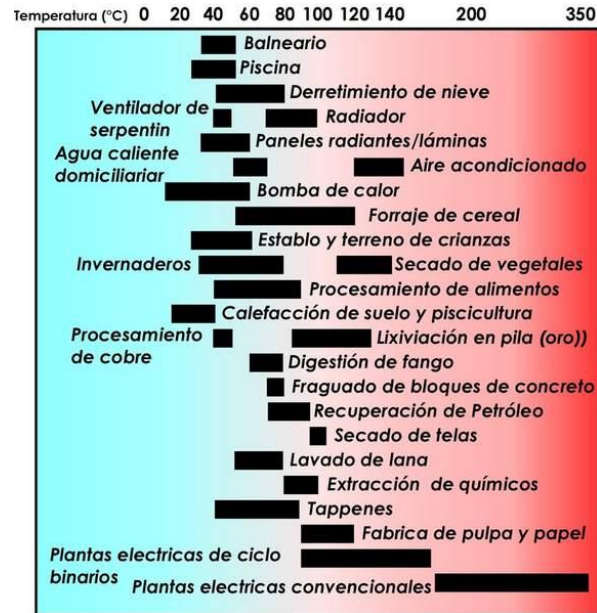


Figura 1-7.-Aplicaciones de recursos geotérmicos en función de su temperatura.

El aprovechamiento de energía geotérmica para usos directos ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años. El total de capacidad instalada reportada

a finales del 2014 para usos directos es de 70,885 MWt, lo que representa un incremento del 46.2 % respecto al 2010. El total de energía térmica consumida es 592,638 TJ (164,635 GWh), que significa un 39.8% más respecto al 2010. La distribución de energía térmica usada por categoría es aproximadamente 55.2 % para bombas de calor geotérmicas, 20.2 % para balneología, 15.0 % para calentamiento de espacios, 4.9% para cultivo de plantas y hortalizas en invernaderos, 2.0 % para acuicultura, 1.8 % para calentamiento de procesos industriales, 0.4 % para derretimiento de nieve y enfriamiento de espacios, 0.3 % para secado de cultivos y 0.2 % para otros usos. Las tasas de crecimiento de capacidad instalada y el consumo de usos directos desde 1995 a 2015, se encuentran en la figura 1-8. (Lund & Boyd, 2016)

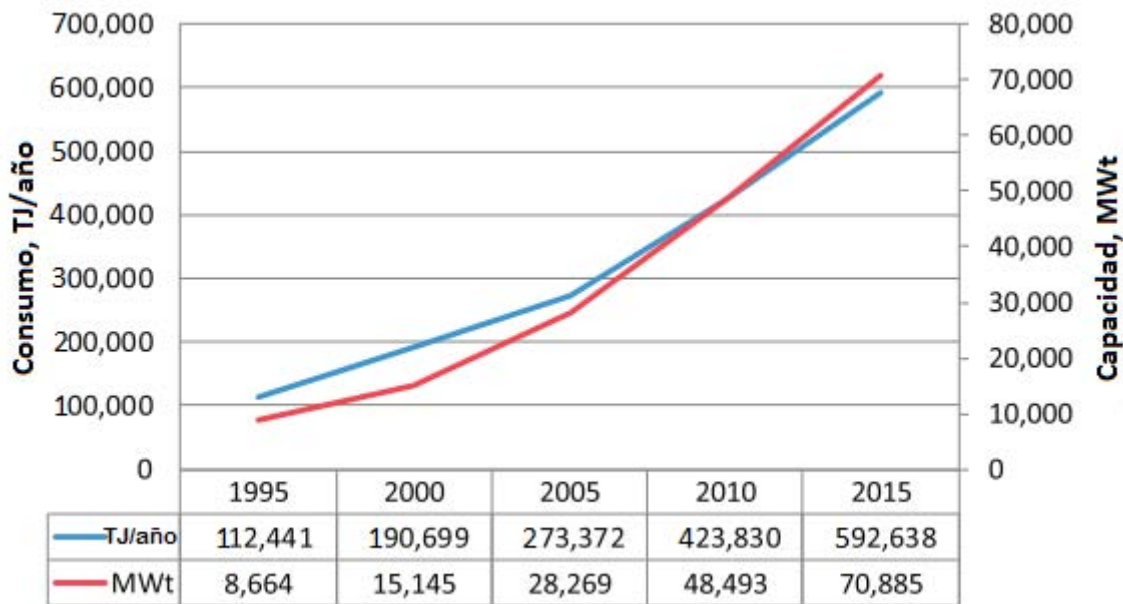


Figura 1-8.-Adaptación, Capacidad instalada y consumo de energía para usos directos. (Lund & Boyd, 2016)

El crecimiento concientizado y la popularidad de las BCG han tenido el más significativo impacto en los usos directos de la energía geotérmica. El consumo anual de energía de estas unidades creció 1.63 veces a una tasa compuesta del 10.3 % comparado con el 2010. La capacidad instalada creció 1.52 veces a una relación anual compuesta de 8.69 % para el mismo periodo. Esto se debe, en parte, a la mejora en los datos reportados y a la capacidad de las BCG para utilizar

temperatura debajo de la tierra o debajo del agua en cualquier parte del mundo. (Lund & Boyd, 2016)

El gráfico 1-9 muestra el consumo de energía por tecnología para diferentes periodos, donde es evidente el enorme crecimiento de las BCG en los últimos años y, además, siendo esta, la aplicación más predominante para usos directos.

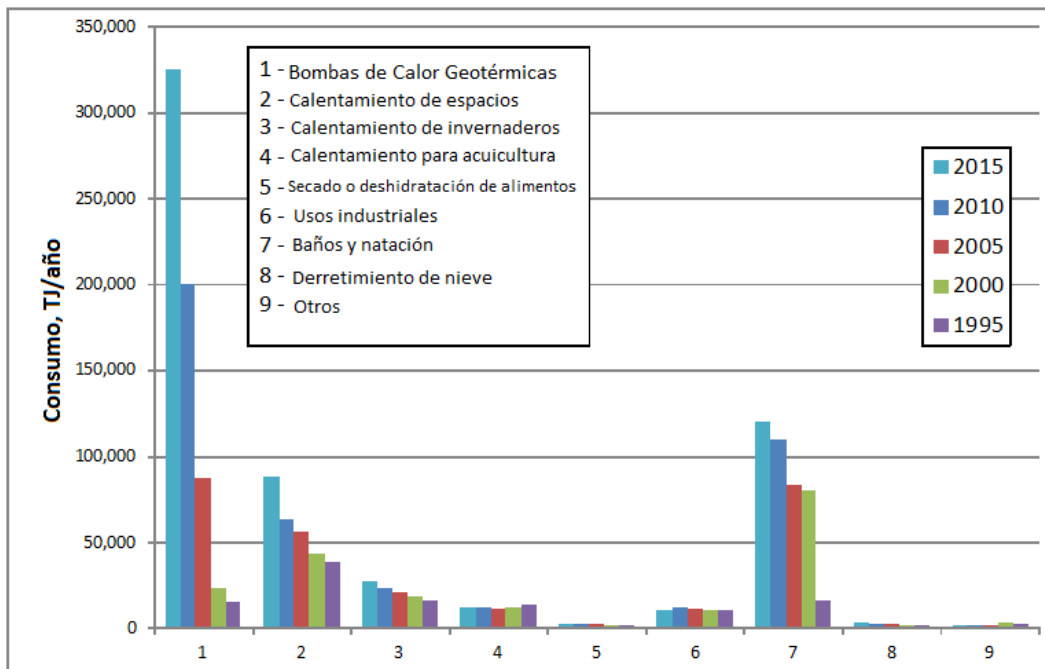


Figura 1-9.-Adaptación, Comparación de las diferentes aplicaciones de usos directos para diferentes periodos. (Lund & Boyd, 2016)

1.2. Bombas de Calor Geotérmicas

1.2.1. Generalidades

Una bomba de calor es una máquina térmica que opera como un refrigerador, la diferencia básica radica en el uso deseado. El refrigerador se usa esencialmente para enfriar un espacio o fluido, mientras que la bomba de calor puede usarse para proporcionar enfriamiento y calefacción. Una BCG, tiene como fuente de calor el subsuelo, ya sea por acoplamiento en el suelo o en agua subterránea, transfiriendo el calor entre el subsuelo y el sistema de distribución de calefacción y enfriamiento. Su comportamiento está dado por el coeficiente de comportamiento o de

rendimiento (Coefficient of Performance, COP, por sus siglas en inglés) y tiene valores típicos de 3 a 4, aunque se han reportado valores de hasta 10. Esto quiere decir que por cada kW de energía eléctrica usada se ceden 3-4 o más kW de energía térmica. De allí que las BCG tengan ahorros típicos del 50-75% ya que sólo se paga por la energía utilizada en el compresor y la energía del subsuelo es esencialmente gratis. (García & Martínez, 2012)

1.2.2 Principio de operación

Se sabe por experiencia propia que el calor fluye de las regiones de alta temperatura a las de baja temperatura. Dicho proceso de transferencia de calor ocurre en la naturaleza sin que se requiera la participación de algún dispositivo, el proceso inverso, sin embargo, no ocurre por sí solo. La transferencia de calor de una región de temperatura baja a otra de alta temperatura requiere dispositivos especiales llamados refrigeradores. Como ya se mencionó en el párrafo anterior, los refrigeradores y las bombas de calor son esencialmente lo mismo, la diferencia radica en sus objetivos. De esta manera, una bomba de calor es un dispositivo que transfiere calor de un medio de baja temperatura a uno de alta temperatura, dicho en otras palabras, extrae calor de una fuente a baja temperatura T_{fuente} y lo entrega a una temperatura más alta T_{entrega} .

La capacidad de refrigeración de un sistema de refrigeración, es decir, la tasa de calor extraído del espacio refrigerado, a menudo se expresa en términos de toneladas de refrigeración. La capacidad de un sistema de refrigeración que puede congelar una tonelada de agua líquida a 0°C en hielo a 0°C en 24 horas será una tonelada. Una tonelada de refrigeración es equivalente a 211 kJ/min o 200 Btu/min. La carga de refrigeración de una residencia de 200m^2 , está en el intervalo de tres toneladas (10.5kW). (Cengel & Boles, 2011)

A pesar de haber varias formas para transferir calor entre la fuente y el sumidero, el ciclo termodinámico que predomina en las bombas de calor, es el de compresión mecánica de vapor, el cual se compone de cuatro etapas, ilustrados en la figura 1-

10 donde también describe el estado del refrigerante a través del ciclo en el diagrama presión-entalpía.

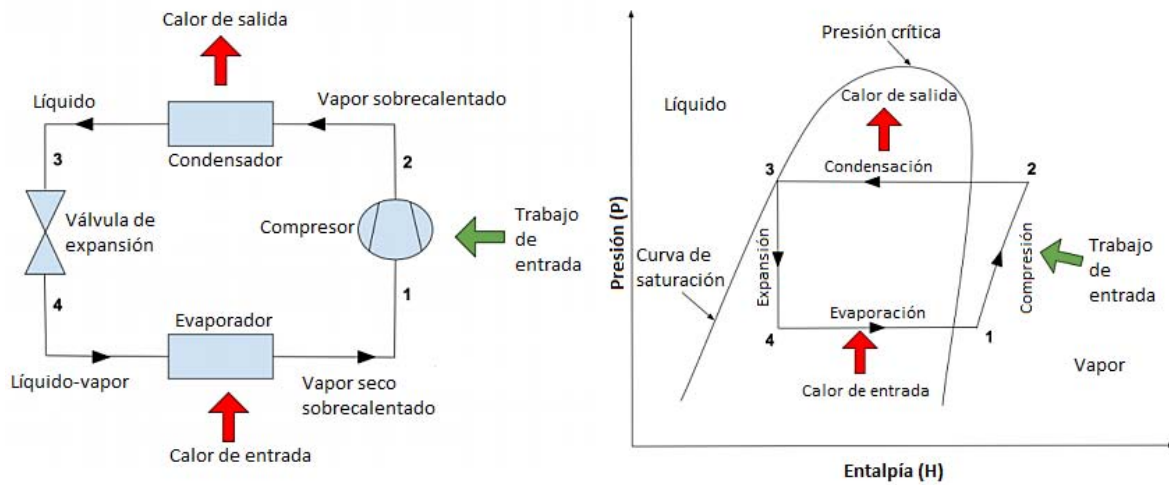


Figura 1-10.-Adaptación, Ciclo termodinámico de compresión mecánica de vapor; Diagrama presión-entalpía del refrigerante en el ciclo. (Naicker, 2015)

El proceso que sigue el refrigerante a través del ciclo, es el siguiente:

- 1-2 Compresión isentrópica en un compresor
- 2-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- 3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
- 4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador

Un mismo sistema puede proporcionar refrigeración en verano y calefacción en invierno. Durante el invierno (en modo calefacción), el refrigerante extrae el calor de la tierra y lo lleva a través del sistema y en el edificio para calentarlo. Durante el verano, el sistema se invierte para enfriar el edificio “expulsando” el calor del edificio, llevándolo a través del sistema e introducirlo en la tierra. (Figura 1-11)

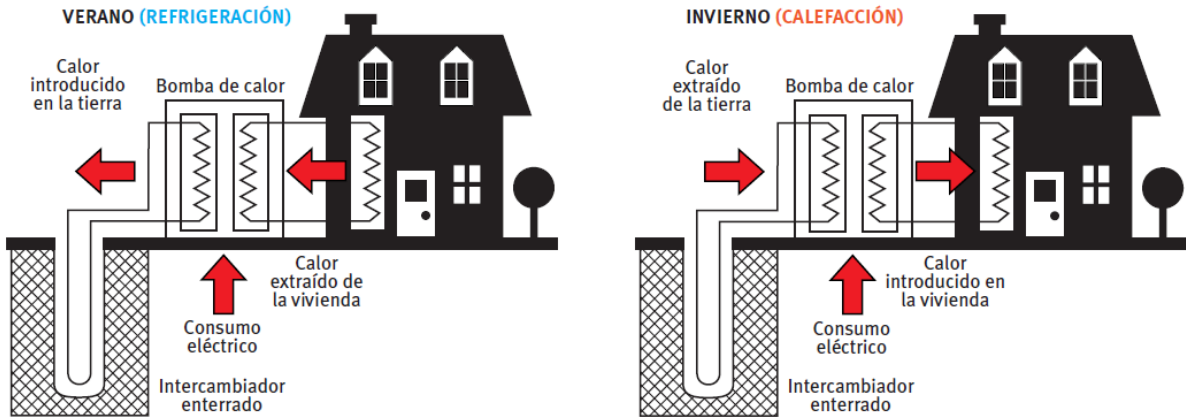


Figura 1-11.-Operación de una BCG en modo calefacción y modo enfriamiento. (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, 2010)

Lo anterior se consigue al agregar una válvula reversible en el ciclo, como se muestra en la Figura 1-12. Como resultado de esta modificación, el condensador funciona como evaporador en verano y lo hace de manera contraria en invierno o en modo calefacción. Esta característica incrementa la competitividad de las bombas de calor, que además se vuelven más atractivas al ofrecer agua caliente agregando un desobrecalentador. El funcionamiento es sencillo: el vapor sobrecalentado generado en el compresor, contiene una cantidad de energía que puede ser removida sin que este se condense, esa es la función del intercambiador de calor llamado desobrecalentador, extraer ese calor del refrigerante para que posteriormente continúe por el ciclo hacía el principal intercambiador de calor y entregue su calor latente de vaporización.

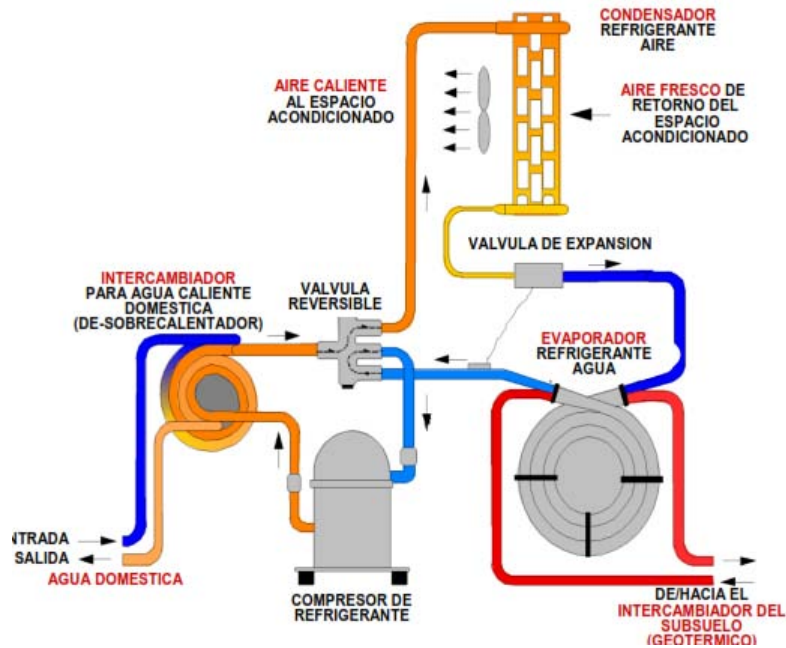


Figura 1-12.-Bomba de Calor en modo calefacción (Luna & García, 2016)

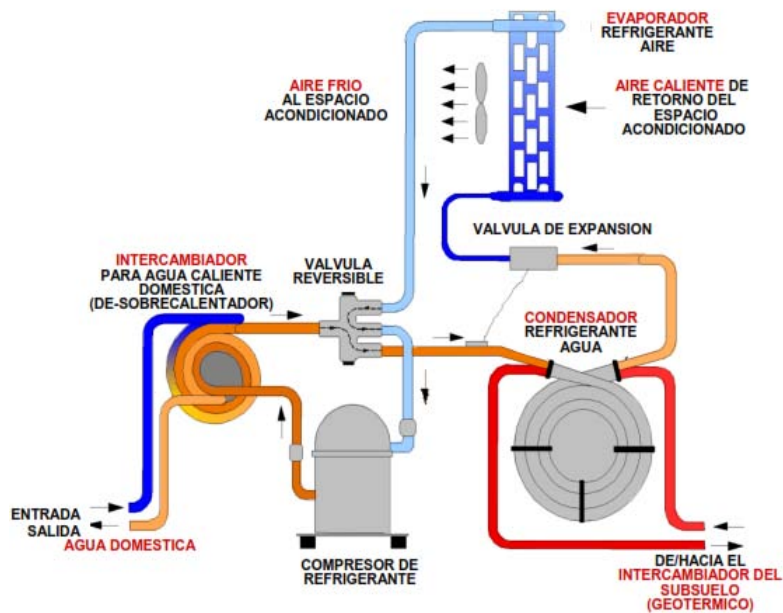


Figura 1-13.-Bomba de Calor en modo enfriamiento (Luna & García, 2016).

1.2.3 Desempeño de una BCG

La relación entre el calor entregado y trabajo hecho, es una medida de la eficiencia del sistema. En los ciclos de refrigeración, la eficiencia es expresada como un

coeficiente de desempeño (COP), definida como la relación entre el calor y trabajo, es decir, si Q es la cantidad de calor entregado y W es el trabajo requerido por el compresor, entonces el $COP = Q/W$ tal y como se muestra en la Figura 1-14.

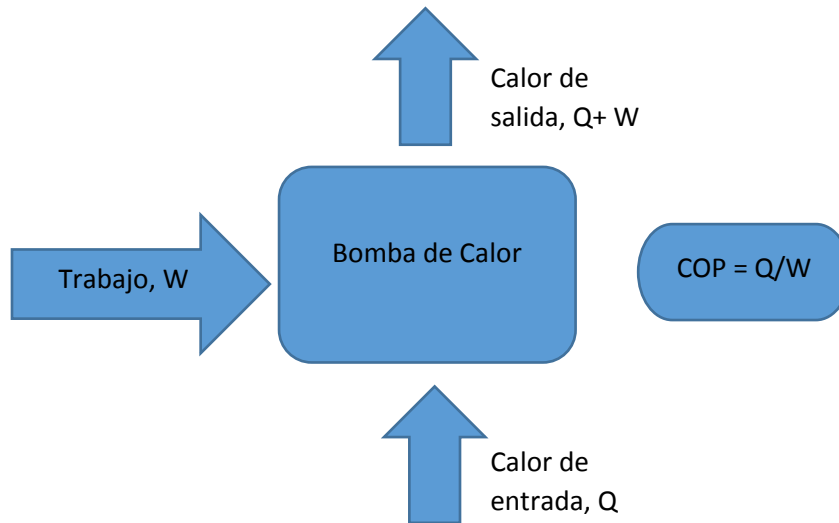


Figura 1-14.-Coeficiente de desempeño (COP).

Debido a que las BCG operan en dos direcciones, esto es, en modo calentamiento y enfriamiento, es necesario definir un COP para ambos modos (COP_H para calentamiento y COP_C para enfriamiento). El COP_C es comúnmente expresado como una eficiencia EER (Energy Efficiency Ratio) y se define como la capacidad de enfriamiento de una bomba de calor en Btu/h entre el consumo de energía eléctrica en Watts; mientras más grande sea el valor de EER, más eficiente será el sistema.

Debido a las unidades involucradas, la relación entre EER y el COP_C es:

$$EER = COP_C \times 3.412$$

La principal razón para el interés en usar BCG para ofrecer calefacción y enfriamiento es que toma menos trabajo para mover el calor de la fuente al sumidero que convertir calor en energía primaria. En otras palabras, la potencia requerida es considerablemente menor que el calor o frío entregado. Se observa que el COP está limitado por las temperaturas absolutas de la fuente (T_f) y el sumidero (T_e), entonces el COP_H máximo = $T_f / T_f - T_e$ y es por ello que el COP_H aumenta cuando la diferencia entre ambas temperaturas decrece, es decir, cuando la temperatura de evaporación

aumenta o la temperatura de condensación disminuya. Lo mismo sucede con la EER, se pueden obtener valores más altos cuando T_f y T_e estén más cercanas entre sí. Este comportamiento, en función de la temperatura del agua o mezcla anticongelante de entrada, se puede observar en los gráficos 1-15 y 1-16. Es por ello que se debe prestar especial atención en identificar el principal propósito de la bomba de calor (calefacción o enfriamiento) y así tener un sistema más eficiente que se reflejará en ahorros substanciales de energía. Además, cabe resaltar que las bombas de calor han tenido mejoras considerables de eficiencia a través del tiempo.

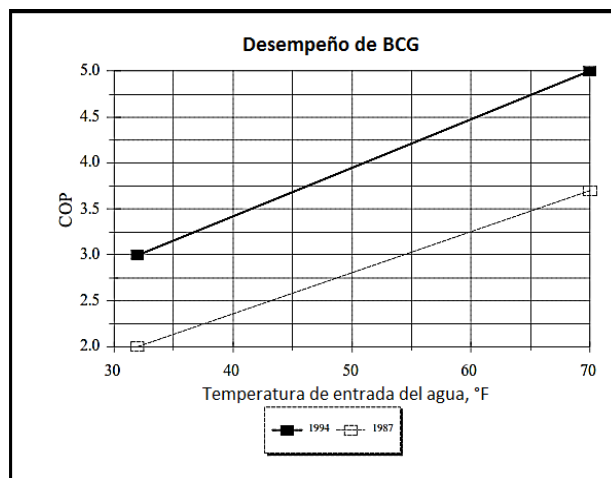


Figura 1-15.-Adaptación, Desempeño del COP_H en función de la T_f (T. L. Boyd & Lienau, 1995).

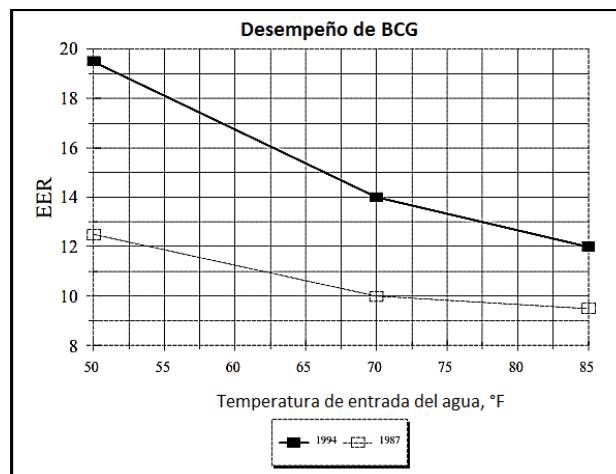


Figura 1-16.-Adaptación, Desempeño de la EER en función de la T_f (T. L. Boyd & Lienau, 1995).

1.2.4 Componentes de una BCG

Una BCG está compuesta de tres elementos básicos (Luna & García, 2016):

- El edificio a ser acondicionado, que incluye un sistema de distribución de fluido portador de energía.
- La bomba de Calor, que mueve el calor entre el edificio y el subsuelo, localizada dentro del edificio o un cuarto de máquinas.
- El intercambiador de calor en el subsuelo a profundidades de 2-100 m, localizada fuera del edificio.

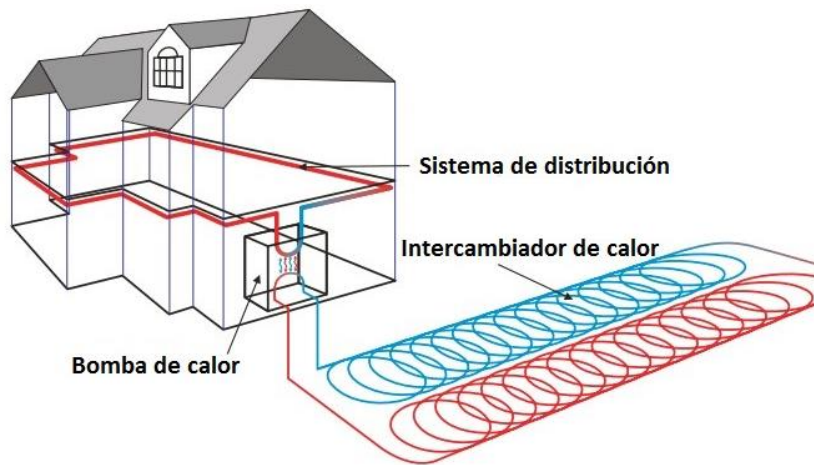


Figura 1-17.- Adaptación, Elementos que componen una BCG. (Green Building Advisor, 2016)

1.2.5 Clasificación de BCG

Las BCG pueden ser clasificadas como circuito abierto o circuito cerrado, y estos circuitos pueden instalarse de tres maneras: horizontal, vertical o en un estanque/lago. El tipo elegido dependerá de la superficie disponible y del tipo de suelo y roca en el lugar de instalación. Estos factores ayudarán a determinar la opción más económica para la instalación del intercambiador en la tierra. En los sistemas de circuito cerrado es un fluido que porta calor dentro de una tubería el que realiza el intercambio, generalmente con el suelo, aunque también se puede realizar con una masa de agua. En los sistemas de circuito abierto se realiza la

captación de un recurso hídrico (acuífero, lago, río...) para intercambiar calor devolviéndose posteriormente a su origen. (Kon & Ao, 2015, p. 16)

1.2.6 Sistemas de Circuito Cerrado

Los sistemas de circuito cerrado pueden utilizar agua o un refrigerante como fluido portador de calor. Una solución de un anticongelante o agua circula a través de los tubos, usualmente son de Polietileno de Alta Densidad, (HDPE, por sus siglas en inglés) enterrados debajo de la superficie de la tierra o sumergidos en un cuerpo de agua. Un intercambiador de calor transfiere el calor entre el refrigerante en la bomba de calor y la solución anticongelante en el circuito cerrado. El circuito puede ser instalado en forma vertical, horizontal o en un estanque o lago.

➤ Configuración vertical

La mayoría de las grandes construcciones comerciales y escuelas usan sistemas verticales debido a la limitada disponibilidad de terreno. También se usan en suelos someros donde no es posible hacer trincheras o donde se desea minimizar la perturbación del paisaje. Para sistemas verticales se excavan hoyos de 10 a 12 cm de diámetro, que son perforados a una distancia de separación de 6 m y con profundidades que van desde los 30.5 y hasta los 122 m. Dentro de los agujeros hay dos tuberías que se conectan al fondo en forma de “U” para formar un circuito. Las conexiones verticales son entrelazadas con tubería horizontal (Figura 1-18) y colocadas en zanjas.

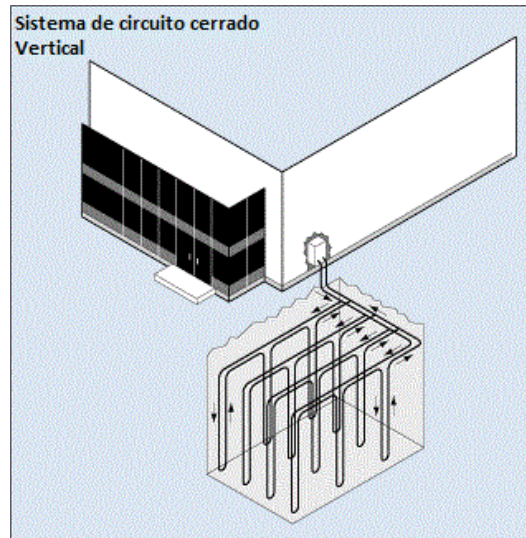


Figura 1-18.-Sistema de circuito cerrado con arreglo vertical

➤ Configuración Horizontal

Este tipo de configuración, es comúnmente menos costosa que los arreglos verticales, aunque requiere una mayor área de terreno disponible. Por esta razón, son usualmente instaladas en pequeñas aplicaciones como construcciones residenciales o comerciales pequeñas. Un sistema horizontal está compuesto de tubería enterrada en zangas, cuya profundidad es de 1.5 a 3 m y típicamente se instalan de 35 a 55 m de tubería por kW de calefacción o enfriamiento. (CANMET Energy Technology Centre, 2005)

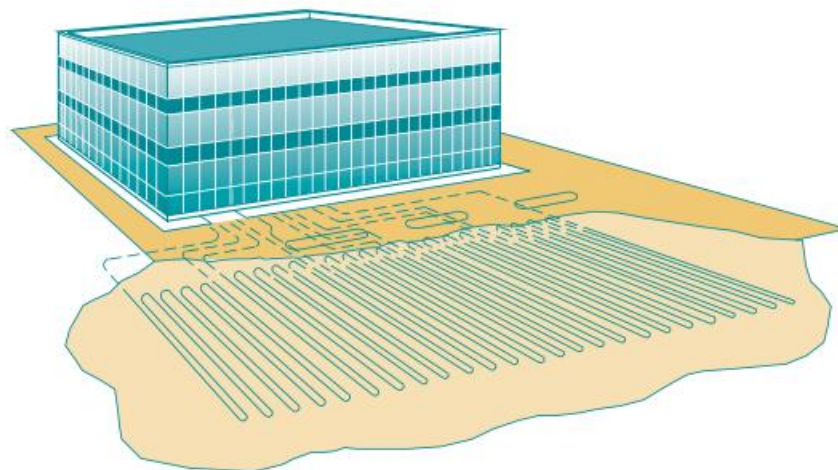


Figura 1-19.- Sistema horizontal de circuito cerrado (CANMET Energy Technology Centre, 2005)

- Configuración "slinky" o en espiral.

Este tipo de instalación es generalmente la más costo-efectiva para aplicaciones residenciales, particularmente para nuevas construcciones, donde existe la disponibilidad de terreno. Estas se instalan en "trincheras" de al menos 2m de profundidad. El método de colocar las tuberías en espiral permite más tubería en una trinchera más corta, lo cual reduce el costo de instalación y hace posible una instalación horizontal en áreas con espacio más reducido que una instalación horizontal convencional.

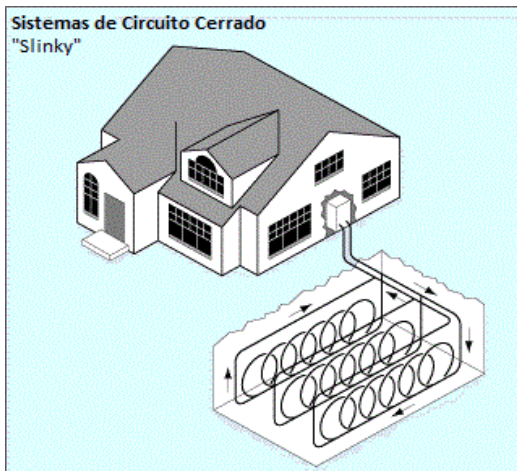


Figura 1-20- Sistema de circuito cerrado tipo "trinchera".

- Estanque o Lago.

Esta opción puede llegar a ser la más económica si se tiene la disponibilidad de un cuerpo de agua adecuado. Una línea de tuberías bajo la tierra es conectada en forma de círculos, desde la construcción hasta el cuerpo de agua con al menos 2.5 m bajo la superficie para prevenir congelamiento. Este tipo de instalaciones sólo podrán ser colocadas en aguas que cumplan ciertos criterios de volumen, profundidad y calidad.

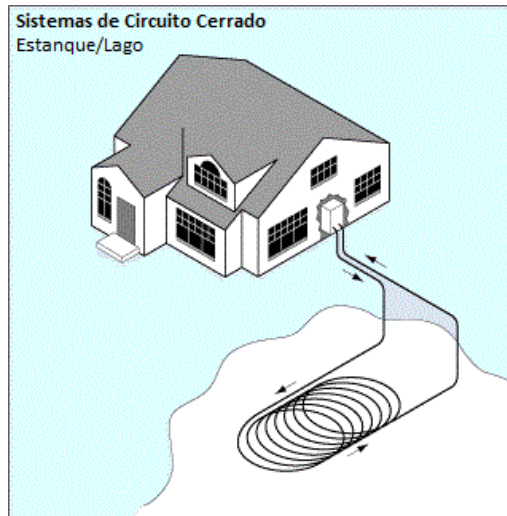


Figura 1-21-Sistema de circuito cerrado en un cuerpo de agua.

1.2.7 Sistemas de Circuito Abierto

Los sistemas de circuito abierto funcionan con el mismo principio que los sistemas de circuito cerrado. La diferencia es que este tipo de configuraciones ocupan pozos o cuerpos de agua como el fluido que intercambia calor y que circula a través de la bomba de calor. Una vez que el fluido circuló por el sistema, este regresa al pozo para reinjectarlo. Es evidente que esta opción es práctica sólo donde existe un suministro adecuado de agua relativamente limpia y se cumplan con las regulaciones con respecto a la descarga de agua subterránea.

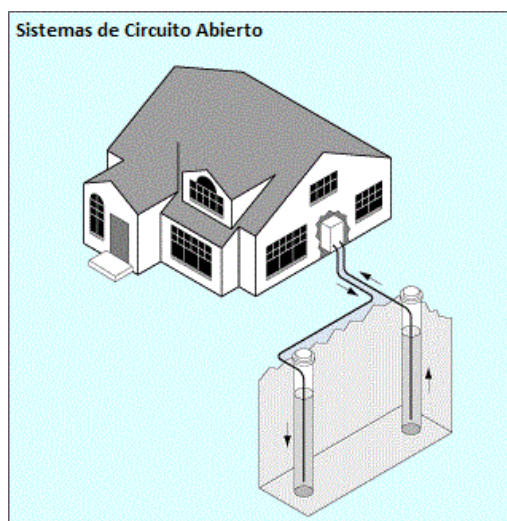


Figura 1-22-Sistema de circuito abierto.

1.2.8 Conexión con el subsuelo

La conexión con el subsuelo es donde se lleva a cabo la transferencia de calor, entre el intercambiador de calor enterrado o sumergido en un cuerpo de agua y la bomba de calor; a comparación de una bomba de calor tipo aire, que intercambia calor con el aire circundante. Diversos estudios han medido la temperatura del subsuelo y muestran que, a partir de ciertas profundidades, esta se mantiene prácticamente constante a través de años. Esto se debe al hecho que las fluctuaciones de temperatura en la superficie del suelo se ven disminuidas conforme la profundidad aumenta, ya que la energía aportada por la radiación solar, precipitaciones y otros efectos atmosféricos, es transferida diariamente a y desde la superficie de la tierra, manteniéndose un equilibrio térmico tal y como se muestra en la Figura 1-23.

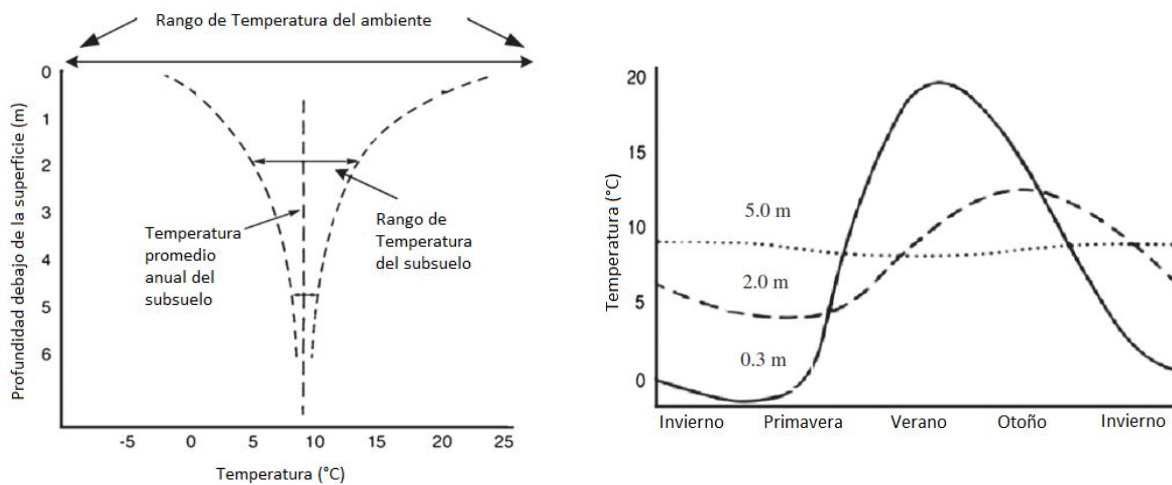


Figura 1-23.-Adaptación, Variación de la temperatura del subsuelo en función de la profundidad. (Self, Reddy, & Rosen, 2013)

El hecho que la temperatura del subsuelo no varía, convierte a las BCG en una tecnología muy eficiente y atractiva, en comparación de las bombas de calor tipo aire, donde el calor es intercambiado con el medio ambiente y por ello depende en su totalidad de las condiciones climatológicas del sitio. Es por ello que los sistemas geotérmicos son más eficientes, ya que el gradiente de temperatura es menor comparado con una bomba de calor de aire, es decir, “le cuesta menos” trabajo

mover el calor debido a que la temperatura del subsuelo y la de confort están más cercanas entre sí. (Figura 1-24)

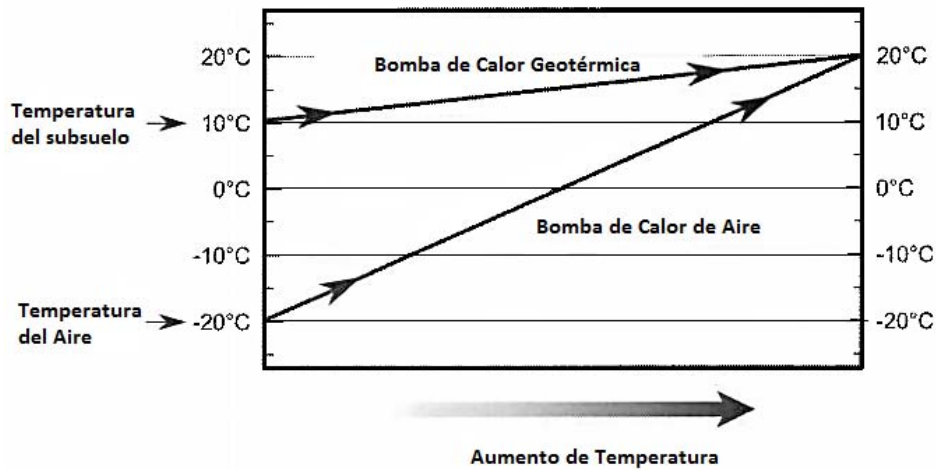


Figura 1-24.-Adaptación, Comparación del incremento de temperatura entre una bomba de calor tipo aire y una BCG. (Canadian GeoExchange Coalition, 2010)

Varios autores mencionan que la profundidad a la cual la temperatura del subsuelo se mantiene constante son 10 m, pero evidentemente, esta distancia variará dependiendo de las características del tipo de suelo: conductividad, difusividad, calor específico etc. (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, 2010)

1.2.9 Longitud del Intercambiador de Calor

El tamaño de la tubería en sistemas de circuito cerrado se reduce a encontrar el área en la ecuación de transferencia de calor:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Donde,

Q = Flujo de transferencia de calor, W (J/s) o Btu/h

U= Coeficiente total de transferencia de calor para el intercambiador en el subsuelo, W/m² °C o en Btu/h ft² °F.

A= Área de transferencia de calor o total de la superficie de la tubería en el subsuelo, m² o ft².

ΔT= Diferencia de temperatura entre la temperatura exterior y la temperatura del fluido en la tubería, °C o en °F.

En esta ecuación, Q es la carga térmica a la cual el sistema se diseña para entregar. U está en función del material y dimensiones de la tubería, así como de las condiciones de flujo dentro de la tubería y las características térmicas de la tierra fuera de esta. El área puede ser calculada de manera sencilla mediante la siguiente ecuación:

$$A = \pi \cdot \frac{D_i + D_e}{2} \cdot L$$

Donde,

L= Longitud de la tubería, m o ft

D_i y D_e = Diámetros interior y exterior, respectivamente, m o ft

Finalmente, ΔT, es un promedio de la diferencia de temperaturas a lo largo de la tubería en el subsuelo, conforme cambia la temperatura del fluido a lo largo de todo el intercambiador.

En la práctica, la industria geotérmica usa softwares comercialmente disponibles para llevar a cabo el diseño del intercambiador de calor, es por ello que no se hace un cálculo directo del área de transferencia de calor, sin embargo, es necesario conocer todas las propiedades térmicas y elaborar un procedimiento riguroso para el óptimo diseño de este. (Canadian GeoExchange Coalition, 2010)

La Agencia Espacial Canadiense recomienda longitudes mínimas para intercambiadores de calor del sector residencial Tabla 1-1. Estas medidas corresponden a lineamientos de referencia y no deberán usarse para diseño ya que deberá hacerse el estricto cálculo con las ecuaciones mencionadas anteriormente.

Tabla 1-1.-Lineamientos de longitud mínima del intercambiador de calor en el subsuelo.

Horizontal	Tubería de 1.25 in (32 mm)			Tubería de 1 in (25 mm)		
	Tubería por trinchera	Longitud de trinchera por kW de enfriamiento (m)	Longitud de tubería por kW de enfriamiento (m)	Tubería por trinchera	Longitud de trinchera por kW de enfriamiento (m)	Longitud de tubería por kW de enfriamiento (m)
	1	35	35	1	37	37
2	22	44	2	24	48	

Vertical	Tubería de 1.25 in (32 mm)			Tubería de 1 in (25 mm)		
	Tubería por pozo	Longitud de pozo por kW de enfriamiento (m)	Longitud de tubería por kW de enfriamiento (m)	Tubería por pozo	Longitud de trinchera por kW de enfriamiento (m)	Longitud de tubería por kW de enfriamiento (m)
	1 par	13	26	1 par	14	28
Arreglo Gal.	26	26	Arreglo Gal.	26	26	

1.2.10 Carga térmica

La carga de calentamiento o enfriamiento de un edificio es la energía requerida para mantener la temperatura interior al nivel deseado (condiciones de confort). Esto depende de muchos factores, los cuales incluyen (Canadian GeoExchange Coalition, 2010):

- Ganancias y pérdidas de calor asociadas a las características constructivas de la edificación, como lo son sus dimensiones físicas, espesor de paredes, materiales de construcción, orientación del edificio, etc.
- Datos atmosféricos del sitio, es decir, calor ganado proveniente de la radiación solar.
- El impacto de la generación interna de calor, proveniente de la iluminación, equipos eléctricos que generen calor o bien la concentración del personal en el recinto y su actividad.

1.2.11 Sistemas de distribución de energía

Como ya se mencionó anteriormente, existen básicamente tres componentes que juntos determinan la eficiencia del sistema: el intercambiador de calor en el subsuelo, la bomba de calor y el sistema de distribución; juntos, son diseñados para entregar la carga térmica determinada para el edificio. El sistema de distribución de energía, que en algunos casos puede ya existir en el edificio, siendo este, un sistema convencional de enfriamiento/calentamiento. Sin embargo, es esencial que el sistema de distribución corresponda con la capacidad de la bomba de calor, especialmente en nuevas construcciones, donde el diseñador tendrá la oportunidad de optimizar el sistema.

Existen básicamente dos maneras de distribuir el calor y frío dentro de la edificación: con aire, en un sistema de aire forzado (sistema agua-aire) o con agua, en un sistema hidrónico (sistema agua-agua). La diferencia entre estos dos radica en la etapa final de transferencia de calor entre el refrigerante y el sistema de distribución.

Un sistema agua-agua crea un número de posibilidades en el diseño que puede resultar en eficiencias que son significativamente más grandes que las logradas con sistemas agua-aire. Para este tipo de sistemas, normalmente se utilizan pisos radiantes donde el agua circula en tuberías debajo de la superficie final del inmueble. (Ver figura 1-25)



Figura 1-25- Sistema de distribución de energía. Aire forzado (lado izquierdo) y piso radiante (lado derecho).

Estas configuraciones tienen varias ventajas en comparación de un sistema de aire forzado, entre las cuales destacan: una mayor eficiencia, menor consumo de energía del equipo auxiliar ya que usan una bomba de circulación en lugar de un ventilador y por último la sensación de confort similar al de una chimenea debido a una distribución de temperatura más uniforme. (Figura 1-26)

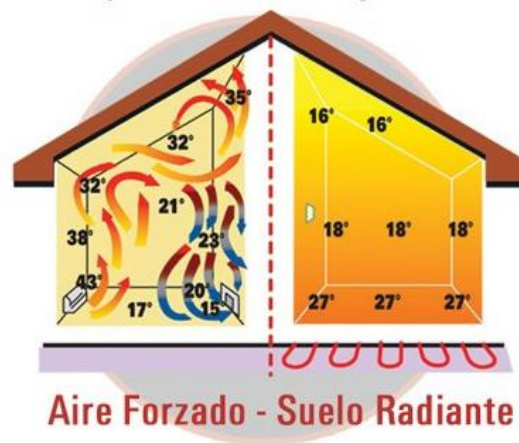


Figura 1-26-Distribución de temperatura de un sistema de aire forzado contra un piso radiante (MAR Construcciones, 2016)

1.2.12 Ventajas de las BCG

De acuerdo a la Asociación Internacional de Bombas de Calor Geotérmicas, IGSHPA por sus siglas en inglés, podemos enlistar una gran cantidad de beneficios que este tipo de tecnología ofrece respecto a sistemas convencionales de calefacción; estos beneficios serán clasificados en cinco grandes categorías que a continuación se mencionan:

a) Aspectos técnicos

- Altas eficiencias en modo calentamiento y enfriamiento comparado con sistemas convencionales.
- Reducen la demanda del pico de electricidad en modo enfriamiento.
- Un único sistema provee calentamiento/enfriamiento para una misma edificación.

- Consumen menos energía para operar que un equipo convencional de calefacción.

b) Beneficios económicos

- Grandes ahorros en costos de operación y mantenimiento comparado con sistemas convencionales.
- Vida mayor del equipo de más de 50 años para el intercambiador en el subsuelo y 25 años para la BC.
- La inversión inicial es recuperada en unos pocos años.

c) Beneficios ambientales

- La ventaja fundamental es que utilizan energía renovable que existe en el subsuelo.
- No existe la quema de combustibles fósiles.
- Utilizan menos refrigerante.
- Significante reducción de emisión de gases de efecto invernadero.
- Capacidad de integrarse con otras fuentes de energía renovable, como paneles solares térmicos.

d) Beneficios de confort y seguridad

- Son altamente confiables, ya que aprovechan la temperatura constante en el subsuelo.
- No hay combustión que genere monóxido de carbono, cuyo gas es asociado a envenenamiento.
- Mayor deshumidificación comparadas con bombas de calor de aire.
- Ofrece un rango de temperatura más alto que sistemas convencionales de calefacción.
- Muy silenciosas generan un ambiente agradable dentro y fuera del edificio.

- Se puede disponer de agua caliente.

e) Beneficios en sitio

- No hay equipo expuesto a la intemperie.
- Ofrecen un aspecto estético debido a que no hay equipo instalado en áreas descubiertas.
- No hay equipamiento que sea objeto de vandalismo.
- Reduce las penetraciones en la envoltura de la edificación debido a que no se requiere una chimenea o entrada de aire para combustión.
- Tuberías o intercambiadores de calor debajo de la tierra no afectan el paisaje.

1.3 Conclusiones

La energía geotérmica, se define de manera general, como la energía térmica contenida en el interior de la Tierra. Esta se ha explotado desde tiempos muy remotos, tanto para generación de energía eléctrica como para usos directos. A pesar de que la energía eléctrica generada a nivel mundial a partir de geotermia es de apenas el 1%, para países con escasos combustibles fósiles, esta representa una indispensable fuente de energía limpia y renovable.

Los usos directos de geotermia, se refiere a diversas aplicaciones diferentes a la generación de energía eléctrica. El aprovechamiento de estos recursos de baja y media entalpía ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años, donde destacan las BCG, las cuales representan más del 50% de la energía térmica consumida.

Una BCG es una máquina térmica que tiene como propósito proporcionar calefacción y enfriamiento, aprovechando la energía térmica contenida en el subsuelo. Este calor es transferido a través de un intercambiador de calor enterrado debajo de la superficie o en un cuerpo de agua. El tipo de configuración dependerá de la disponibilidad de un recurso hídrico o del tipo y superficie del terreno, entre otros factores.

Estos equipos resultan ser muy eficientes, ya que, a comparación de una bomba de calor de aire, estos aprovechan la temperatura en el subsuelo se mantiene prácticamente constante y no depende de las condiciones climatológicas del lugar. Este tipo de tecnología ofrece muchas ventajas en comparación de un sistema de calefacción convencional, entre las cuales destacan un ahorro considerable de energía que se traduce en grandes ahorros económicos para los usuarios. Además de que no existe la quema directa de combustible lo cual contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero.

Capítulo 2. Desarrollo y estado actual de Bombas de Calor Geotérmicas a nivel mundial

2.1 Introducción

Este capítulo tiene por objetivo, mostrar el estado actual de las BCG a nivel mundial, además, como se revisó en el capítulo anterior, el incuestionable éxito que esta tecnología ha tenido, nos hace plantear diversas preguntas acerca de su implementación por todo el mundo, por ejemplo: ¿Cómo fue la penetración del mercado en determinado país? ¿Qué causas o motivos llevaron a la utilización de BCG? ¿Qué factores permitieron el desarrollo? Estas y demás cuestiones serán planteadas y analizadas en el siguiente apartado. Se hará una evaluación comparativa de los países líderes en implementación de BCG, para lo cual, será necesario identificar los factores que han sido claves para el creciente desarrollo de esta tecnología.

2.2 Estado actual de las BCG a nivel mundial

Las BCG tienen el más grande consumo de energía y la mayor capacidad instalada de usos directos de geotermia a nivel mundial con 70.9 % de la capacidad instalada (Figura 2-1) y 55.15 % del consumo anual de energía. La capacidad instalada es de 50,258 MWt y el uso anual de energía es de 326,848 TJ/año. A pesar de que la mayoría de las instalaciones existen en Norte América, Europa y China, el número de países con instalaciones incrementó de 26 en el 2000 a 48 en 2015. (Lund & Boyd, 2016)

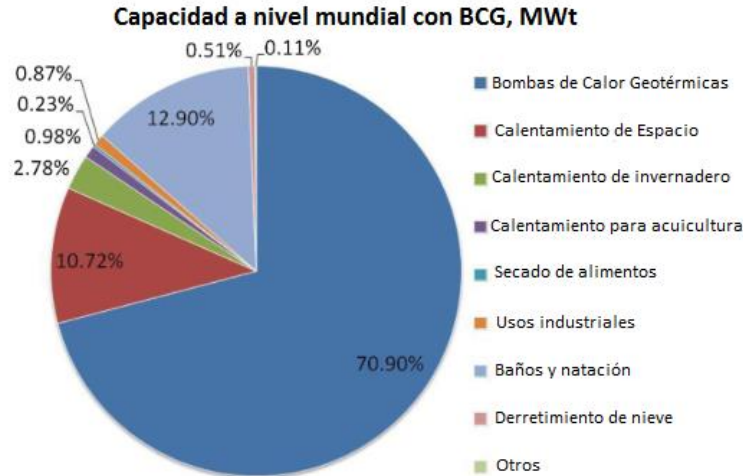


Figura 2-1.-Adaptación, Capacidad instalada a nivel mundial para usos directos de geotermia. (Lund & Boyd, 2016)

Datos del Congreso Mundial de Geotermia mostrados en la Figura 2-2, reportaron el estado actual de las bombas de calor a nivel mundial, siendo EUA el país que más sistemas tiene instalados con 1.4 millones de BCG, seguido de China con cerca de un millón de unidades y cuyo país representa un claro ejemplo del acelerado crecimiento de esta tecnología en comparación a los datos reportados en el año 2000; Francia es otro país que ha tenido un crecimiento notable en años recientes. (Simon J. Rees, 2016)

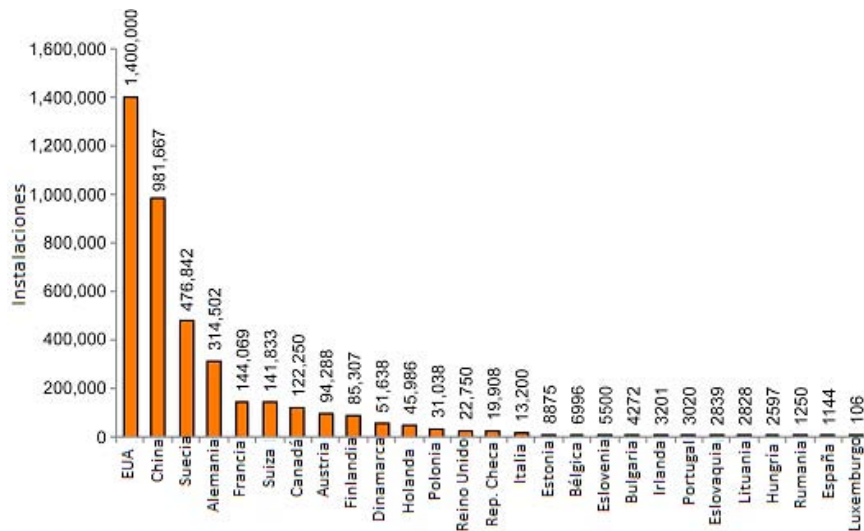


Figura 2-2.-Adaptación, Número de BCG instaladas a nivel mundial (Simon J. Rees, 2016).

Sin embargo, si estos datos son comparados en una base per cápita, una normalización de estos es introducida y dan un mejor entendimiento de la penetración de esta tecnología a nivel nacional. Se puede observar en la Figura 2-3 que los países nórdicos (Suecia, Finlandia, y Dinamarca), además de Suiza y Austria son los que lideran el ranking, esto se puede deber a la temprana entrada en el mercado y a las necesidades de confort térmico, producto de sus climas predominantemente fríos.

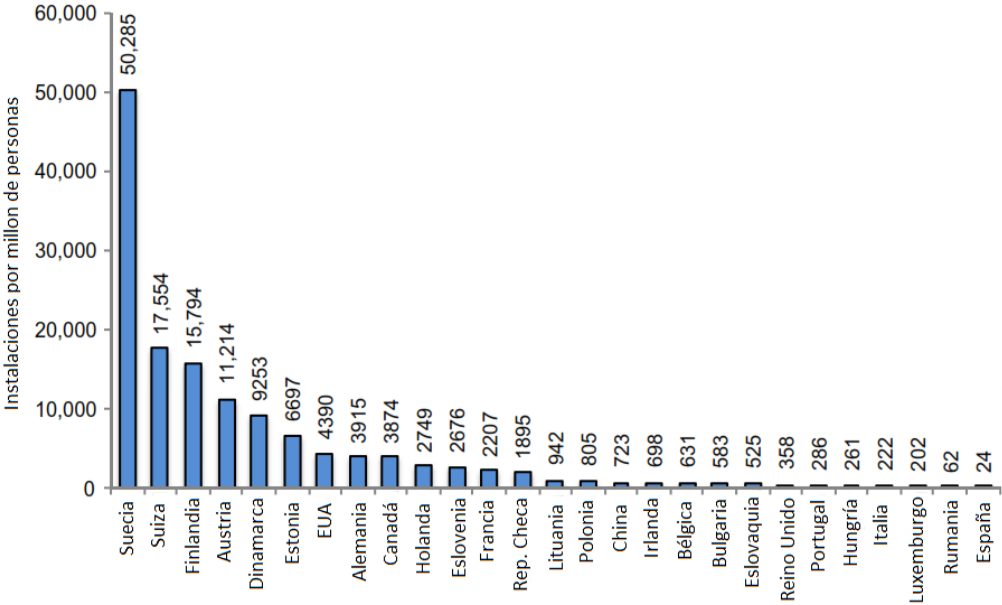


Figura 2-3.-Adaptación, Número de BCG instaladas por millón de personas (Simon J. Rees, 2016).

2.3 Desarrollo tecnológico e industrial a nivel mundial

El interés internacional en la aplicación de BCG comenzó a detonar a partir de la crisis energética de los 70's, donde los principales países industrializados alrededor del mundo se enfrentaron a la escasez del petróleo, que trajo como consecuencia elevados precios del mismo. A partir de ello, en Norte América y Europa (principalmente en países Nórdicos y Suiza), se realizaron investigaciones acerca de tecnologías que garantizaran la seguridad energética, en las cuales las BCG estaban involucradas. En Europa, la investigación fue enfocada principalmente a intercambiadores de calor de tipo vertical, mientras en EUA, laboratorios y

universidades lograron trabajos significativos en intercambiadores de calor horizontales. De hecho, fue en este periodo que se fundó la Asociación Internacional de Bombas de Calor Geotérmicas, con sede en la Universidad Estatal de Oklahoma, cuya organización tenía el propósito de brindar información confiable a universidades y al sector industrial pero también tenía el objetivo de capacitar a diseñadores y personas para la instalación de estos equipos. (Simon J. Rees, 2016)

El creciente avance de la tecnología hizo que fuera más factible el desarrollo de BCG, tal es el caso del crecimiento del mercado de aire acondicionado y el de refrigeradores para alimentos, ya que se fueron desarrollando compresores más eficientes y de menor tamaño. También fue posible con la viabilidad económica de tuberías de plástico y así evitar riesgos asociados a refrigerantes en tuberías de metal enterradas. Todos estos factores ayudaron a que el desarrollo de BCG fuera posible en los años 80's para países como EUA, Suiza, Suecia, seguidos de Alemania y Austria. De esta manera, para finales de los 90's, la industria de BCG en estos países fue creciendo de manera considerable y el número de instalaciones también aumentó.

2.4 Factores en el desarrollo del mercado

Las BCG son una tecnología comercial bien probada a nivel mundial, sin embargo, una cantidad de factores técnicos y económicos han limitado su aplicación en todo el mundo.

La adopción de una nueva tecnología energética normalmente trae consigo diversos obstáculos y no fue la excepción para las BCG, donde a pesar de ser atractivas para empresas y usuarios, el alto costo inicial crea barreras que crean incertidumbre de realizar una inversión sin conocer un periodo de retorno. Como resultado de este gran costo inicial comparado con alternativas que usan combustibles fósiles como un boiler de gas o calentadores convencionales, las BCG no han tenido un gran impacto en el mercado. Esto se traduce a que haya pocas personas involucradas en el diseño e instalación de estos equipos, que trae como consecuencia la falta de

conocimiento de los usuarios acerca del funcionamiento y de los costos asociados a su instalación.

Entre las principales barreras a las que las BCG se han enfrentado para una mayor penetración de mercado se encuentran principalmente el alto costo, la limitada falta de conocimiento y la poca infraestructura, aunque podemos numerar barreras específicas que han sido claves (Goetzler, Guernsey, & Kar, 2012):

- Alto costo inicial asociado con la perforación e instalación del intercambiador de calor en el subsuelo comparado con bombas de calor de aire, las cuales, generalmente, ofrecen periodos de retorno más cortos.
- Falta de conciencia del mercado y carencia de conocimiento o confianza de las BCG por parte de los consumidores, legisladores y reguladores.
- Limitada infraestructura para instalaciones de BCG (muchas regiones carecen de instaladores certificados o con experiencia).
- Falta de un plan de negocio para infraestructura de BCG.
- Escasez de nuevas tecnologías o técnicas que mejoren el costo beneficio de las BCG.
- Limitación de espacio en algunas zonas urbanas.

2.5 Casos de Estudio

En este apartado, se llevará a cabo un análisis comparativo de dos de los países líderes en instalaciones de BCG a nivel mundial: China y Estados Unidos. Se plantean los escenarios que se presentaron para que dichos países implementaran y desarrollaran esta tecnología, así como las medidas que los Gobiernos establecieron para posicionarse entre los primeros cinco en todo el mundo.

2.5.1 Aplicación en China

2.5.2 Introducción

El rápido crecimiento industrializado de China ha traído consigo diversos retos socioeconómicos y ambientales como la contaminación, escasez de energía y

recientemente, cambio climático. La escasez de energía es uno de los problemas más agravantes ya que el incremento en el consumo de energía para el sector residencial representa el 27.8 % del total de consumo de energía, el cual es apenas inferior al consumo en el sector industrial (Yang, Zhou, Xu, & Zhang, 2010). Otro problema al que China se ha enfrentado es el de reducir las emisiones de CO₂. Este país ha duplicado sus emisiones desde la adopción del protocolo de Kioto en 1997 y es ahora, el más grande contribuyente de CO₂ (Figura 2-4).

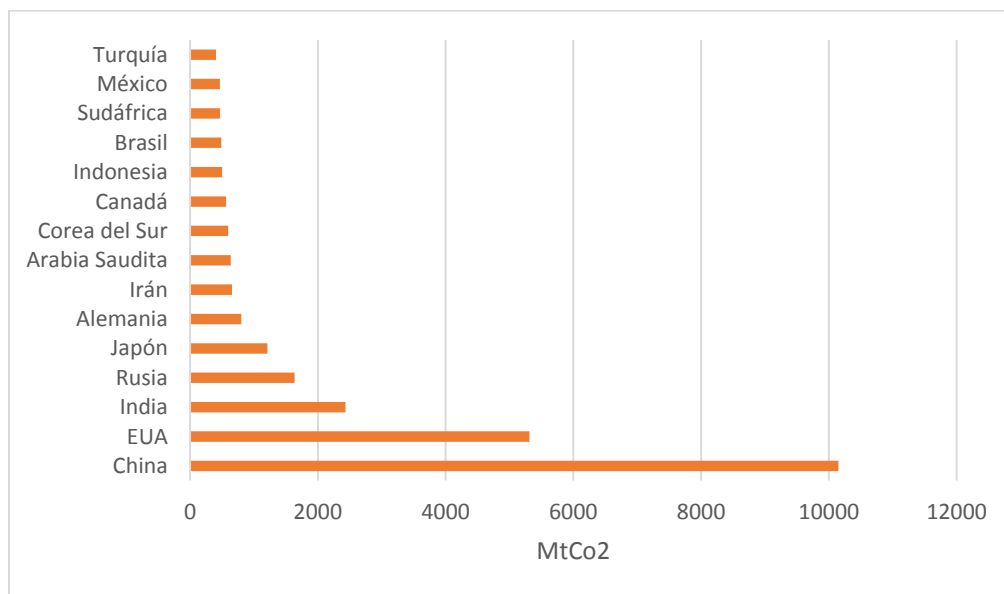


Figura 2-4.-Países con más emisiones de CO₂ en el 2016. (Elaboración propia con datos del Global Carbon Atlas)

En respuesta a los problemas de cambio climático, el Gobierno chino ha anunciado que para 2020 reducirán sus emisiones de dióxido de carbono en un 40-45 % por unidad de PIB, en referencia al 2005. También han anunciado un incremento en el consumo de energía proveniente de combustibles no fósiles, de aproximadamente 15% del consumo total de energía para 2020. Un gran número de iniciativas han sido propuestas para reducir las emisiones de CO₂, estas iniciativas incluyen: el incremento de sumideros de carbono, reducir el consumo total de combustibles fósiles, incrementar el consumo total de energía limpia y renovable, como lo es la energía eólica, energía solar, energía geotérmica, etc. Además de incrementar la eficiencia energética. Entre estas iniciativas, la tecnología de BCG ha sido promovida por el Gobierno Chino como una efectiva y eficiente tecnología

geotérmica ya que se estima que cerca del 65% del consumo de energía en el sector residencial se utiliza para calentamiento, ventilación y aire acondicionado (Geng, Sarkis, Wang, Zhao, & Zhong, 2013).

2.5.3 Desarrollo de mercado y estado actual de aplicación de BCG.

Los primeros estudios sobre BCG en China fueron realizados desde los años 60's, en la Universidad de Tianjin y en la Universidad de Tsinghua, se llevaron a cabo en laboratorios y en pocos centros de ingeniería, aunque no había condiciones para una aplicación práctica debido a la escasez de electricidad que se presentaba en aquella época. Sin embargo, no fue hasta mediados de los 90's donde se instaló la primer BCG en Beijing; se usó una bomba de calor de la marca Carrier, hecha en los EUA. Fue en esta época donde surgieron unos cuantos proyectos en diversas localidades de China y además muchas universidades llevaron a cabo estudios experimentales que incluían modelos teóricos y pruebas en campo. Para el año 2000, las BCG ya alcanzaban los 100 mil m² de aplicación, a pesar de ello, el crecimiento acelerado se dio en los años posteriores, ya que para el 2004 se tenían 7.67 millones m², aumentando a 100.7 millones m² para el 2009 y triplicando esa cantidad para el 2014, con 330 millones de m². (Zheng, Mo, & Chen, 2015). Cabe destacar que, en este periodo, la brecha que existe entre el área de aplicación con BCG y la que corresponde a "calefacción convencional" se ha acortado considerablemente debido al crecimiento descomunal de esta tecnología limpia, este comportamiento se puede observar en la Figura 2-5.

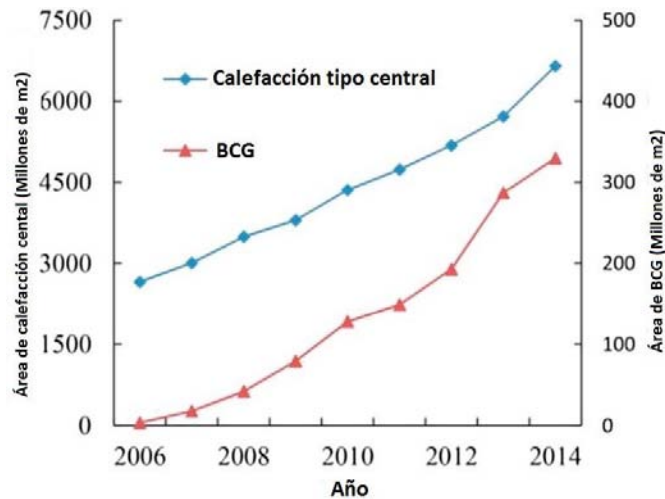


Figura 2-5.-Adaptación, Crecimiento de las BCG en comparación de sistemas convencionales de calefacción. (Zhu et al., 2015)

Diferentes tipos de BCG son distribuidos en casi todas las provincias de China. La Figura 2-6 deja ver la distribución de proyectos en diferentes zonas climáticas, siendo estos, principalmente instalados en la región Noreste y Norte, donde el clima es frío y la densidad de población es muy alta; esta región representa cerca del 70% del total de espacio acondicionado por BCG en China. La distribución del tipo de intercambiador de calor depende mucho de las condiciones geográficas, por ejemplo, las BCG de circuito cerrado son principalmente instaladas en regiones donde tienen principalmente climas fríos y veranos cálidos. (Yang et al., 2010)

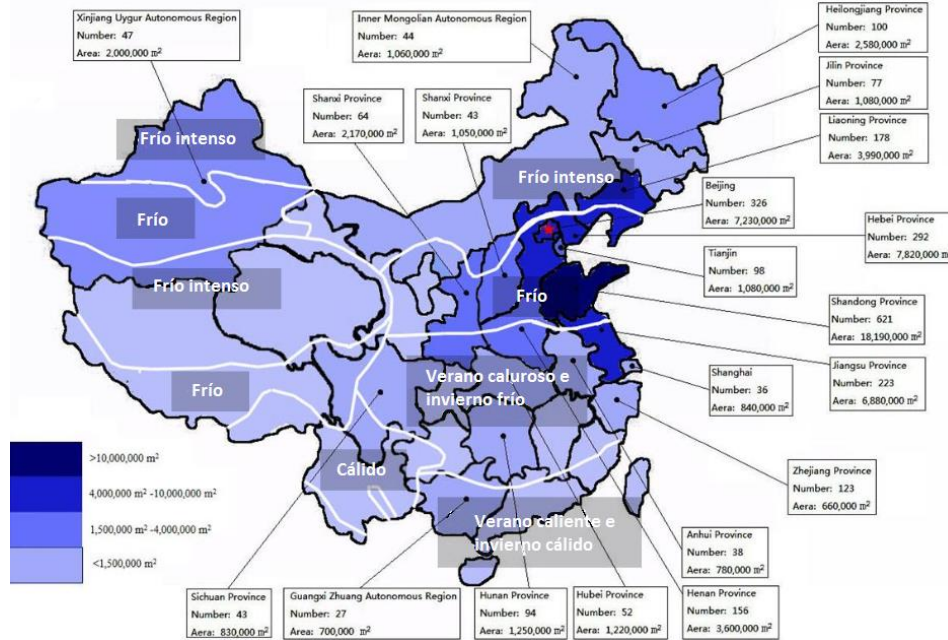


Figura 2-6.-Adaptación, Distribución de BCG en China (Liu, Lu, Hughes, & Cai, 2015).

Este crecimiento acelerado, se debe, principalmente, a la fuerte promoción y a incentivos financieros ofrecidos por el Gobierno Central de China. De hecho, un hito fundamental para el desarrollo de BCG en este país, fue la cooperación en eficiencia energética con EUA, a continuación, se mencionará las políticas energéticas que el Gobierno de China implementó.

2.5.4 Políticas para desarrollo de BCG en China

Uno de los pilares que ha llevado a China al desarrollo acelerado de BCG en los últimos años es, indiscutiblemente, la política promovida y apoyada por el Gobierno tanto a nivel nacional como a nivel local. La energía renovable fue impulsada por políticas, incentivos financieros y códigos o criterios relevantes.

Podríamos enmarcar un hecho importante para la apertura del mercado, cuando, en 1997, China y Estados Unidos empezaron una cooperación tecnológica en eficiencia energética, en la cual las BCG fueron consideradas un importante campo de aplicación, esta alianza estratégica comenzó a rendir frutos y, para principios del siglo XXI, se instalaron varios proyectos demostrativos en diferentes localidades de China; fue en ese entonces que el uso de esta tecnología parecía ser enormemente

considerada. Sin embargo, no fue sino hasta el 2006 cuando el Gobierno chino emitió la “La Ley de Energía Renovable de la República Popular de China”, en la cual, las BCG fueron fomentadas; también el Gobierno de Beijing publicó los “Lineamientos en el Desarrollo de Sistemas de BCG”, donde se exponía que el gobierno pagaría subsidios por la aplicación de BCG; esto se vio reflejado con el gran incremento de instalaciones para el año 2007 (Figura 2-7).

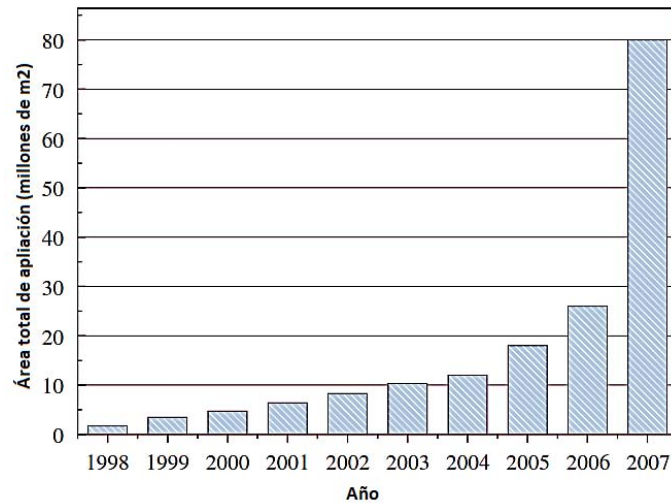


Figura 2-7.-Adaptación, Incremento en la aplicación de BCG en China (Yang et al., 2010).

Una serie de documentos fueron exitosamente emitidos en los años siguientes, un ejemplo de ello ocurrió cuando el Ministro de Territorio y Recursos emitió la “Declaración de la Promoción en el desarrollo y utilización de energía geotérmica de baja entalpia” en el 2008, y “Especificación de la Energía Geotérmica Superficial, Investigación y Evaluación” en el año 2009.

Es importante mencionar que en el 2006 el Ministro de Construcción publicó el documento “Medidas Provisionales en la Administración de Financiamientos Especiales para el uso de Energía Renovable en la Construcción de Edificios”, en el cual las BCG fueron identificadas como una tecnología clave y altamente calificada para este financiamiento. Antes del 2009, estos subsidios eran principalmente para proyectos piloto, pero fue en este año que el Ministro de Construcción y el Ministro de Finanzas, ampliaron un programa para subsidiar aplicaciones con energía renovable, incluyendo BCG y energía solar en

edificaciones seleccionados en ciudades competitivas y áreas rurales. Esta etapa tuvo un costo de 8-13 millones de dólares por ciudad seleccionada en función de factores como nivel de desarrollo económico, tipos de tecnologías propuestas y el potencial de ahorro de energía. (Liu et al., 2015)

También los gobiernos locales implementaron políticas e incentivos para soportar esta tecnología, la ciudad de Shenyang es un claro ejemplo de ello; el precio de la electricidad para el sector comercial que estuviera acondicionada con BCG, sería el mismo que para el sector residencial (\$0.08/KW h para el sector residencial y \$0.14/KW h), lo que implicó un enorme atractivo para invertir en estos equipos y disminuir en gran cantidad el consumo de energía eléctrica, esto convirtió a esta ciudad en la primera con más instalaciones de BCG, superando a Beijín. Otra medida que los gobiernos locales implementaron fue la de llegar a acuerdos con bancos locales y pedir que estos ofrecieran créditos comerciales para apoyar la implementación de BCG, con una tasa de interés 60% menor a la tasa normal.

2.5.5 Aplicación en EUA

2.5.6 Introducción

El sector residencial, comercial e institucional en este país, representó cerca del 40% del consumo total de energía primaria y de este total, más de la mitad se utiliza para calefacción, refrigeración y calentamiento de agua. Además, son el segundo país que mayor cantidad de gases de efecto invernadero emite, con cerca del 15% del total a nivel mundial. (Goetzler, Zogg, Lisle, Javier Burgos, & Navigant Consulting, 2009)

En EUA, esta tecnología, a diferencia de China, fue inicialmente desarrollada e introducida comercialmente en los años setenta y de igual manera, el Gobierno ha tenido programas, que apoyan o promueven la instalación de BCG.

2.5.7 Estado actual de aplicación de BCG y desarrollo del mercado

Se estima que actualmente existen, al menos, 1.4 millones de BCG instaladas en los 50 estados del país. Estas se ubican principalmente en el medio este y en estados del este, los cuales corresponden a regiones con alta densidad de población y un clima que varía de frío a cálido. Este país representa el 29% de las instalaciones de BCG e nivel mundial y se estima que el total de ingresos por ventas de estos equipos fue de \$319.5 millones USD en el 2009 para el sector residencial. (Liu et al., 2015)

En la Figura 2-8 se observa la distribución de BCG en función de la capacidad nominal medida en toneladas de enfriamiento, en la cual, los colores más intensos, representan a los estados que más BCG tienen instaladas.

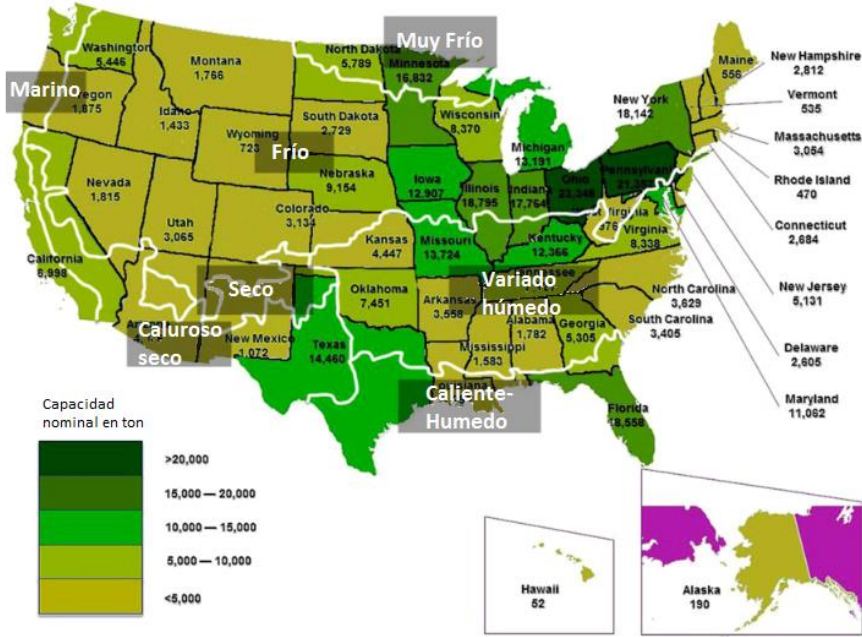


Figura 2-8-Distribución de BCG en EUA. (Lu, Cai, & Chen, 2015)

Del total de instalaciones, aproximadamente el 60% pertenecen al sector residencial y el restante 40% corresponde a construcciones comerciales e institucionales, aunque la tendencia actual está cambiando y las nuevas instalaciones están siendo acondicionadas en el sector comercial con cerca del 60% y 40% para el sector residencial. Aproximadamente, 90% de estas unidades son de circuito cerrado (debajo de la tierra), mientras el restante es de circuito abierto (una fuente de agua).

Del total de BCG con circuito cerrado, la distribución en función del tipo de intercambiador enterrado en el subsuelo es como sigue:

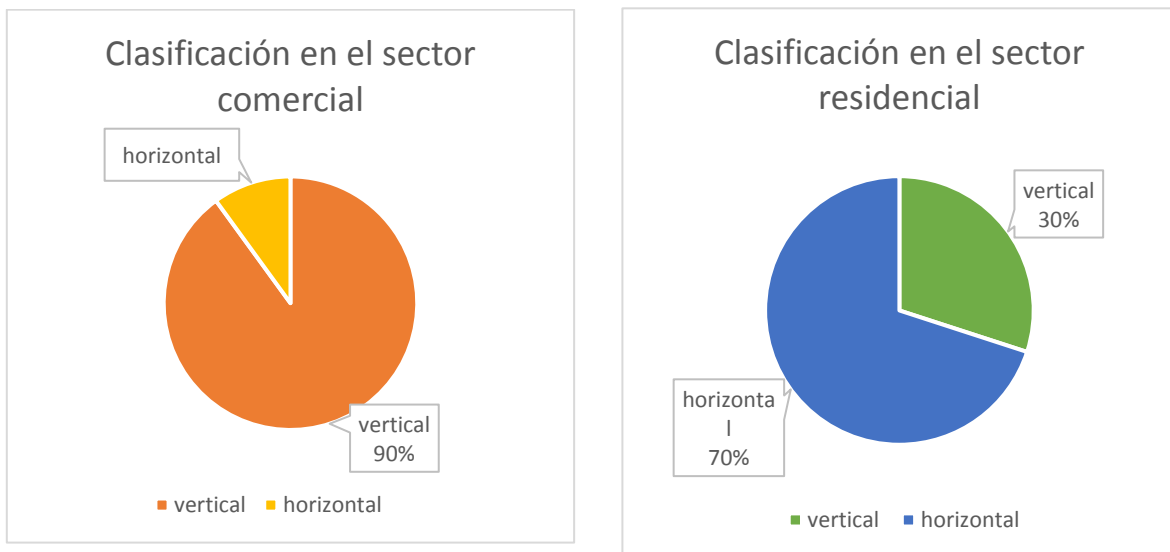


Figura 2-9.- Adaptación, Clasificación del tipo de instalación para el sector comercial y residencial. (T. Boyd, Sifford, & Lund, 2015)

El comportamiento para el sector comercial se debe, principalmente, a la limitante de espacio que existe en este tipo de construcciones mientras en el sector residencial, la inclinación es hacia intercambiadores de calor enterrados de manera horizontal, ya que estos resultan ser menos costosos.

El costo estimado por unidad instalada es de \$6,000 USD por tonelada para el sector residencial y de \$7,000 USD por tonelada para el sector comercial. Actualmente, esta industria representa de 2 a 3 billones de USD anuales. La más grande instalación, con 130 toneladas, se encuentra en *Ball State University*, Indiana con un total de 4,100 circuitos instalados verticalmente. (T. Boyd et al., 2015). El periodo de retorno simple para una instalación ya existente es normalmente de 8 a 14 años. Para nuevas construcciones, este periodo es generalmente más corto, sin embargo, un tiempo de más de 5 años es todavía común.

2.5.8 Políticas para desarrollo de BCG en EUA

La industria comenzó con muchos emprendedores, ellos estaban conformados por contratistas y fabricantes que construyeron iniciativas antes de que hubiera cualquier gobierno o empresa involucrada. Desde la década de los 80's, diferentes empresas del sector energético han patrocinado muchos modestos pero exitosos programas de BCG en los lugares donde prestaban servicios que, claramente, incrementó la pequeña industria en algunas localidades (Hughes, 2008). A principios de los años 90's, el Departamento de Energía (DOE por sus siglas en inglés), presentó un reporte que apoyaba el desarrollo de la Estrategia Nacional de Energía, en el cual, las BCG estimaban un potencial de ahorro de 2848 cuatrillones de Joules para 2030 (Liu et al., 2015). Por otra parte, la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), comparó varias opciones de aire acondicionado para aplicación residencial, seleccionando las BCG como la opción energética más eficiente y la más amigable con el medio ambiente.

Debido a la influencia de las etapas anteriores, poco tiempo después, en 1993, bajo la administración del Presidente Clinton, se anunció el Plan de Acción contra Cambio Climático, además, se anunciaron alianzas entre el DOE y grandes empresas del sector eléctrico que fueron atraídas para hacer frente al gran reto del cambio climático; estas se comprometieron a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y también seleccionaron a las BCG como una de las cinco iniciativas.

Diferentes instituciones como el Instituto Eléctrico Edison, apoyado por la Asociación Nacional Cooperativa de Electricidad Rural (NRECA) y el Instituto de Investigación en Energía Eléctrica (EPRI), Asociación Internacional de Bombas de Calor Geotérmicas, y demás empresas, iniciaron un esfuerzo colectivo para la movilización del mercado de BCG y demostración de la tecnología, lo llamaron "Programa Nacional de Bienestar de la Tierra", las metas fueron:

- Reducir la emisión de gases de efecto invernadero 1.5 millones de toneladas métricas de carbono anuales para el año 2000.
- Incrementar las ventas anuales de BCG de 40,000 a 400,000 para el año 2000.

- Crear un mercado sustentable de BCG, sin la dependencia de reembolsos de empresas o incentivos gubernamentales.

Casi en el mismo tiempo, el DOE formó el Programa Federal de Gestión de la Energía para reducir el costo e impacto ambiental del gobierno para eficiencia energética, y conservación de agua, promoviendo el uso de energía renovable. Las metas que se fijaron fueron agresivas y estas consistían en reducir para el 2005 y 2010, 30 y 35% la intensidad energética (uso de energía por área de edificación en BTU/m²), respectivamente, en todos los Organismos Federales, comparada con el año de 1985.

Estos programas aceleraron las ventas de BCG, ya que estas se duplicaron del 1994 a 1999 para usuarios privados y aumentaron más de diez veces para el mercado federal de 1999 al 2001.

En adición a las acciones y programas mencionados con anterioridad, se ofrecieron créditos por parte del Gobierno Federal para BCG instaladas entre el 1 de diciembre del 2009 y el 31 de diciembre del 2016. Algunos de los beneficios de estos créditos se exponen en la Tabla 2-1 (Goetzler et al., 2012)

Tabla 2-1.-Beneficios de los créditos otorgados por el Gobierno Federal de los EUA.

Residencial	Comercial
30 % del costo total del proyecto	10% del costo total del proyecto
Pueden ser usados para compensar créditos alternativos	Pueden ser usados para compensar créditos alternativos
Pueden ser combinados con otros créditos	Pueden ser usados con un subsidio 5 años de depreciación

Para el año 2011, el Gobierno Federal, a través del Departamento de Comercio, implementaron un programa piloto en el estado de Vermont, con el objetivo de financiar proyectos en eficiencia energética, en el cual se incluían las BCG. Este consistió en seleccionar a una empresa del sector eléctrico para financiar instalaciones de BCG; el financiamiento era cubierto mensualmente con los ahorros reflejados en los recibos de energía eléctrica y de esta manera convertir la gran inversión inicial en pequeños pagos. Estos programas pilotos crecieron y el número

de estados en ofrecer créditos o cualquier financiamiento para BCG también aumentaron.

2.6 Análisis comparativo

Con base en la información disponible, el estado actual de aplicación de BCG en China y EUA, será comparada en tres categorías generales: distribución geográfica, características del edificio y aplicación acumulada, tal y como se muestra en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2.-Comparación del estado actual de BCG en China y Estados Unidos. (Liu et al., 2015)

	Distribución Geográfica	Características de Edificio	Aplicación de BCG acumulada
EUA	Usados en los 50 estados del país. Cerca del 52% de BCG fueron enviadas a 10 estados: Florida, Illinois, Indiana, Michigan, Minnesota, Missouri, New York, Ohio, Pennsylvania y Texas	Se estima que 75% de las aplicaciones residenciales son para nuevas construcciones y el 25% corresponde a readaptación de casas existentes	Existe, al menos 1.4 millones de unidades instaladas con área de aplicación que supera los 200 millones de m ² de espacio acondicionado
China	Ampliamente usadas en todas las regiones climáticas. Cerca del 50% de BCG fueron acondicionadas en 4 provincias o municipios: Shandong, Liaoning, Beijing y Jiangsu. Estos equipos son relativamente más comunes en áreas urbanas con desarrollo económico y menos comunes en zonas rurales, pequeños pueblos y al oeste de China	Todo tipo de construcciones, incluye residenciales, comerciales e institucionales. En la región norte son más las aplicaciones residenciales, mientras el clima cuenta con veranos cálidos e inviernos fríos, son más populares las aplicaciones en edificios comerciales o públicos	En total, aproximadamente 400 millones de m ² de espacio ha sido acondicionado con BCG para el 2013

Las BCG han sido usadas en todas las regiones climáticas y en todo tipo de edificios para ambos países, aunque la orientación en China es hacia climas predominantemente fríos, mientras que en EUA varía de frío a cálido húmedo. A pesar de que la aplicación en China empezó casi tres décadas después que en los EUA, el uso acumulado en China es casi tan grande que en los EUA, como resultado del rápido crecimiento en instalaciones en los recientes años. Esto se debe,

principalmente, a la fuerte promoción e incentivos que el Gobierno Federal promovió.

Respecto a la consideración del desarrollo de BCG, ambos países, basados en sustentos científicos, visualizaron a esta tecnología como una herramienta clave para el cumplimiento de sus objetivos en términos de reducción de CO₂ y de seguridad energética, basada en el uso eficiente de la energía.

Pese al gran posicionamiento de estos países en la industria de BCG a nivel mundial, estos se han enfrentado a diferentes obstáculos que han “obstruido” el óptimo desarrollo del mercado. Estas barreras han sido identificadas en tres niveles de priorización, siendo el nivel 1 las de mayor prioridad (Tabla 2-3).

Tabla 2-3.- Principales barreras que han frenado el desarrollo de BCG en China y EUA.

Barreras	Estados Unidos	China
Nivel 1	Alto costo inicial de BCG para los usuarios	Falta de certificaciones por parte del gobierno sobre la calidad de los equipos, diseño, instalación y operación de las BCG
Nivel 2	Falta de conocimiento por parte de los usuarios y confianza de los beneficios sobre BCG	Menores ahorros energéticos o un desempeño menor al esperado
	Falta de legislación y regulación sobre BCG	
	Limitaciones en un plan de negocio para infraestructura de BCG	Falta de recopilación de datos o experiencias de grandes proyectos ejecutados
Nivel 3	Falta de nueva tecnología y técnicas que mejoren los costos de una BCG	Operadores de BCG no calificados
		Falta de tecnología para reinyección en pozos y adecuado dimensionamiento de intercambiadores

2.7 Conclusiones

Las BCG protagonizan la aplicación más predominante de usos directos de geotermia, ya que representan cerca del 71% de la capacidad instalada a nivel mundial y el número de países que utiliza esta tecnología ha aumentado considerablemente en los últimos años. Las BCG no son una tecnología nueva, ya que en algunos países empezó a desarrollarse desde los años 70's. Los países que más instalaciones tienen a nivel mundial son EUA, seguido de China y Suecia, sin embargo, las naciones que mayor penetración en el mercado tienen (en función al tamaño de su territorio y población) son los países nórdicos debido a la necesidad de calefacción, producto de sus climas predominantemente fríos y a la temprana entrada de esta tecnología.

Se realizó un análisis comparativo de los dos primeros países en instalaciones de BCG (China y EUA); esto sirvió de base para identificar a los elementos claves en la evolución de esta tecnología. Las instalaciones de BCG predominan en climas fríos, sin embargo, se han instalado en todo tipo de climas y edificaciones.

Es evidente que el despliegue de este tipo de tecnologías requiere, en principio, una base científica que demuestre la viabilidad técnica y los beneficios futuros que ofrecerán, medidos en términos económicos o ambientales. No obstante, cierto tipo de factores, como la gran inversión inicial o la falta de conocimiento acerca de las BCG han generado ciertas barreras que dificultan un desarrollo acelerado en el mercado.

El apoyo por parte de Gobierno Federal ha sido clave para, primeramente, identificar los objetivos que se fijan en términos de encaminar a un país hacia el aprovechamiento de energía renovable y, posteriormente, identificar las medidas necesarias para lograr las metas establecidas. Por último, dar seguimiento y brindar apoyos con programas o subsidios fueron acciones fundamentales para el despliegue de las BCG tanto en China como en EUA.

Capítulo 3. Bombas de Calor Geotérmicas en México, retos y oportunidades.

3.1 Introducción

El presente capítulo, tiene como propósito, describir el panorama general del aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía en México, así como identificar el potencial de aplicación de BCG dadas las necesidades de confort térmico que se presentan en distintas zonas del país. Por ello, se hará un análisis de la tecnología actual con la que las BCG podrían competir y se presentará el estado actual del mercado de aire acondicionado en el país y lo que este representa en términos de demanda de energía eléctrica y emisiones de CO₂.

Además, se expone la situación actual en materia de regulación y recursos humanos, que, como se expuso en el capítulo anterior, representan factores clave en el desarrollo de BCG.

3.2 Usos directos de la geotermia en México

Los usos directos en México se encuentran escasamente desarrollados y están limitados a balneología. Existen, principalmente, instalaciones para bañarse y nadar con propósitos recreativos y en algunos casos con propósitos terapéuticos. Estas instalaciones son operadas, principalmente, por inversionistas privados y sólo unas pocas son operadas por gobiernos federales, estatales o municipales.

La única aplicación conocida de usos directos además de baños y natación, hasta el año 2015 (ver tabla 3-1), fue desarrollada por la Comisión Federal de Electricidad CFE, en el campo geotérmico Los Azufres, donde se desarrolló un proyecto de calentamiento de espacio individual con el aprovechamiento de un remanente térmico. Este proyecto representa una capacidad instalada de 0.47MWt y un consumo anual de 4.5 TJ/año. (Gutiérrez-Negrín, Maya-González, & Quijano-León, 2015)

Actualmente existen cuatro proyectos que usan BCG, pero estos siguen aún bajo desarrollo del CeMIEGeo, un par de ellos están siendo instalados en Morelia mientras los otros dos están en los Humeros y en Mexicali. (García-gutiérrez, 2017)

Tabla 3-1-Resumen de Usos Directos de Geotermia en México. (Gutiérrez-Negrín et al., 2015)

Uso	Capacidad Instalada (MWt)	Consumo Anual de Energía (TJ/año)	Factor de planta
Calentamiento de espacio Individual	0.460	4.397	0.303
Calentamiento de Invernaderos	0.004	0.028	0.210
Secado o deshidratación de alimentos	0.007	0.067	0.300
Baños y natación	155.347	4166.512	0.850
TOTAL	155.819	4171.004	0.849

3.3 Confort térmico

El confort térmico es el resultado del intercambio de calor entre el cuerpo y el medio ambiente y este está influenciado por cuatro principales variables (temperatura del aire, temperatura radiante, humedad relativa, velocidad del aire) y por dos parámetros personales (vestimenta y nivel de actividad o metabolismo). Para medir el confort térmico se utiliza un índice usado por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, ASHRAE por sus siglas en inglés, conocido como PMV opinión media predecible (Predicted Mean Vote). Este índice refleja la sensación térmica en condiciones estacionarias y es medido en una escala de siete valores definidos como sigue: +3 caliente, +2 cálido, +1 ligeramente cálido, 0 neutral, -1 ligeramente fresco, -2 fresco y -3 frío. Un ser humano en un estado de equilibrio térmico es cuando la cantidad de calor producido y ganado por el cuerpo es igual a la cantidad de calor perdido por el cuerpo. Es decir, en la escala PMV, este estado corresponde a cero. Condiciones de confort

aceptable están típicamente en el rango de valores del PMV [-0.5, +0.5]. En la figura 3-1 se visualiza la zona de confort en una carta psicrométrica para valores de PMV en el dominio de [-0.5, +0.5] y [-1, +1]. La zona con un ligero sombreado corresponde a $-0.5 \leq \text{PMV} \leq +0.5$, mientras la región más oscura corresponde a $-1 \leq \text{PMV} \leq 1$. (Morales-Valdés, Flores-Tlacuahuac, & Zavala, 2014)

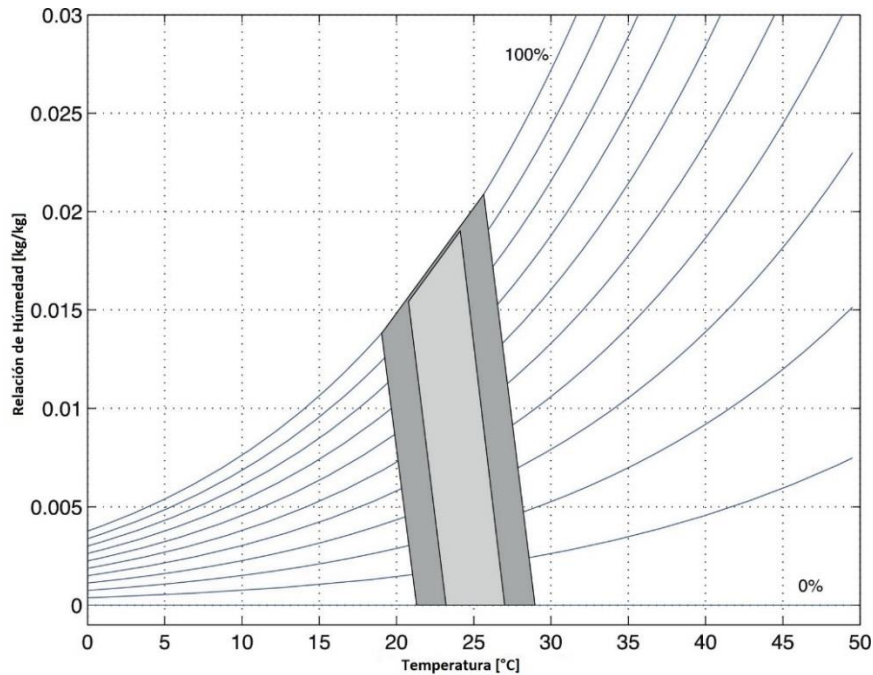


Figura 3-1.- Adaptación, Visualización de la zona de confort térmico en una carta psicrométrica (Morales-Valdés et al., 2014).

3.4 Necesidades de confort térmico en México

En México es indispensable el consumo de energía para el confort de los ocupantes de edificios tanto para el sector residencial como para el comercial o de servicios, ya que predomina el clima cálido, y en algunas estaciones, la temperatura alcanza hasta los 40°C (Figura 3-2). Pese al predominante clima cálido, en algunas regiones de la zona norte, así como en regiones montañosas, se presentan estacionalmente temperaturas bajas, que llegan a estar por debajo de los 0°C (ver figura 3-3).

Es por ello que, el creciente uso de equipos que consumen energía para proveer confort térmico en México, particularmente para enfriar el aire en zonas de clima cálido, se ha vuelto uno de los más grandes retos de política pública para la

eficiencia energética. El reto mayor se ubica en el hecho de que, por varias décadas, la mayoría de las viviendas nuevas en zonas de clima cálido no han incluido todos los elementos que se pueden aprovechar para limitar la ganancia de calor hacia las viviendas, lo cual ha venido acompañado de una creciente y significativa disponibilidad y acceso a sistemas de enfriamiento. (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2016)

En nuestro país, se construyen cerca de 225 mil viviendas al año en regiones de clima cálido, a través de desarrolladores de vivienda, en localidades con altas temperaturas en verano (principalmente en el norte del país) o con calor todo el año (como el sur del territorio nacional y zonas costeras).

Debido a las necesidades de confort térmico, estas viviendas tienen consumos de electricidad que superan dos y hasta cinco veces a las ubicadas en regiones de clima templado ya que el confort térmico es una necesidad para tener calidad de vida y ser productivo.

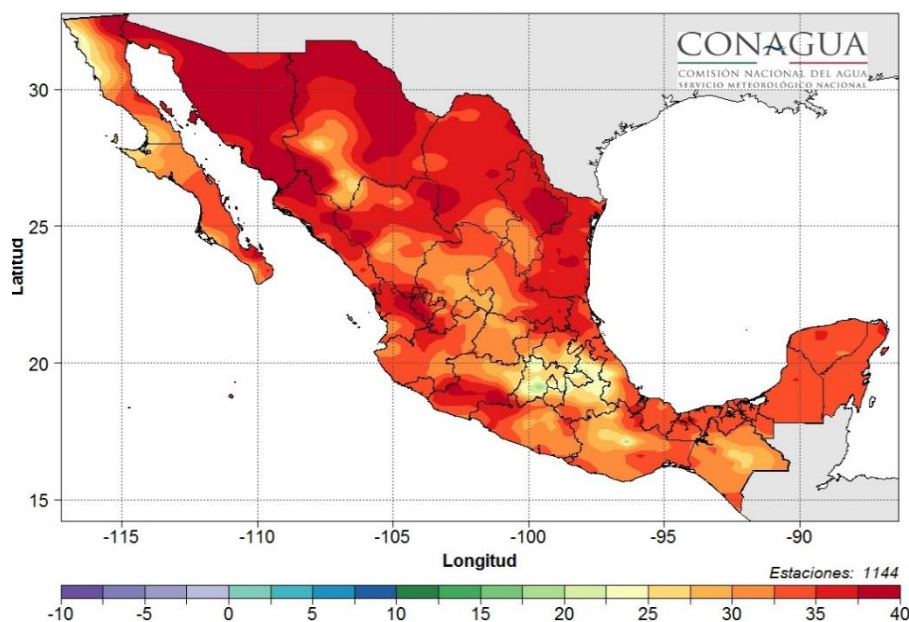


Figura 3-2-Temperatura máxima promedio mensual (°C), junio de 2017. (Sistema Meteorológico Nacional)

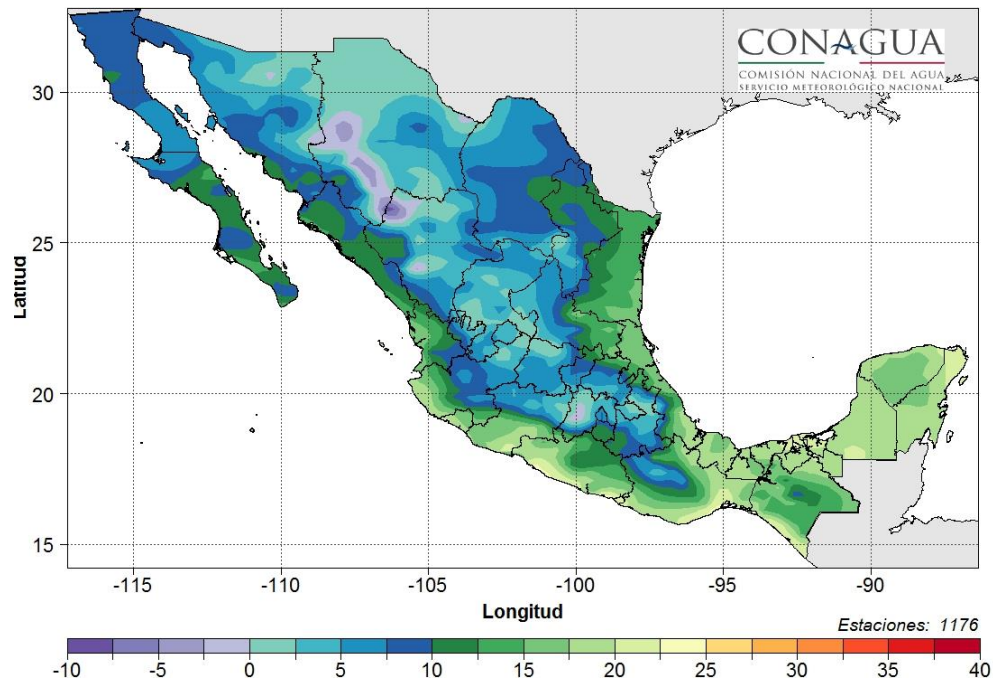


Figura 3-3-Temperatura mínima promedio mensual (°C), enero 2017. (Sistema Meteorológico Nacional)

3.5 Tarifas de Energía Eléctrica en México

Como se mencionará más adelante, México se encuentra en una etapa de transición energética a causa de la llamada Reforma Energética. Estos nuevos cambios incluyen modificaciones en el sector eléctrico. Por ejemplo, referente al costo de la energía eléctrica, es ahora, la Comisión Reguladora de Energía (CRE), el organismo encargado en aplicar las metodologías para determinar el cálculo y ajuste de las tarifas finales del suministro básico.

El nuevo esquema toma en cuenta el costo de cada segmento de la cadena de valor de la industria eléctrica. Así, las cuotas que aplicará CFE Suministrador de Servicios Básicos a sus clientes por el servicio eléctrico, se integran por los cargos asociados a las Tarifas Reguladas de Transmisión, Distribución, Operación del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), Operación del Suministrador de Servicios Básicos y Servicios Conexos no incluidos en el Mercado Eléctrico Mayorista, además del costo de la energía, potencia y Certificados de Energías Limpias necesarios para atender la demanda de los usuarios del Suministro Básico.

De esta manera, la CRE determinó las Tarifas Finales del Suministro Básico que aplicará CFE en el periodo que comprende de diciembre del 2017 a marzo del 2018. Es así que, de manera general, las tarifas para el sector residencial se dividen en 7 grandes categorías. La determinación de cada una de ellas se basa en la zona geográfica en la que se encuentre el usuario y por consecuencia en las temperaturas medias promedio de esa región (Figura 3-4). Estas tarifas se aplicarán a todos los servicios que destinen energía para uso exclusivamente doméstico, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento en condominio o vivienda.

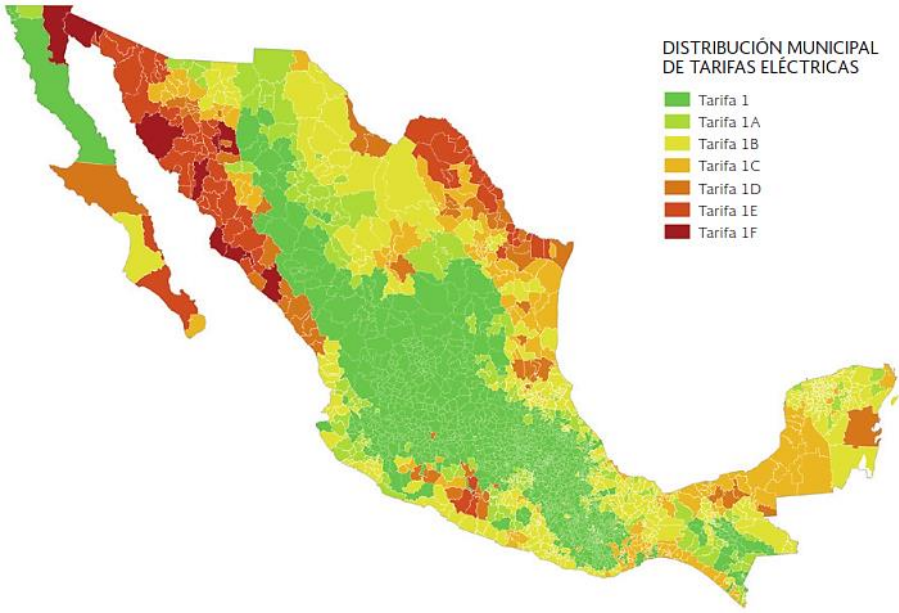


Figura 3-4.- Tarifas de electricidad en función de la temperatura media mínima. (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2016)

Debido a este periodo de transición y con el objetivo de presentar las tarifas referentes al sector doméstico que se aplican en todo el país, las tablas 3.2 y 3.3 muestran los precios para el 2017 tanto para temporada fuera de verano y en verano¹, respectivamente, así como el rango de aplicación que abarca cada una. Estas difieren, principalmente, en el rango de consumo que la CFE ajusta, siendo este mayor para las regiones más calurosas. Dicho de otra manera, la energía eléctrica se vende a un menor precio en las regiones de mayor temperatura ya que

¹ La CFE define verano como el periodo que comprende los seis meses consecutivos más cálidos del año.

existe un subsidio considerable por parte del Gobierno Federal. Un ejemplo de esto se observa en la tarifa 1, donde la temperatura media mínima es menor a 25 °C, y en la cual no existe subsidio alguno, ya que el precio por kW/h fue el mismo durante todo el 2017.

Si el usuario de alguna de las diferentes tarifas supera el consumo excedente, este será reclasificado en una nueva categoría, llamada Domesticas de Alto Consumo (DAC), la cual tiene un precio de venta más elevado.

Tabla 3-2.-Cuotas aplicables para temporada fuera de verano. (Elaboración propia con datos de CFE)

Cuotas aplicables para temporada fuera de Verano			
Tarifa	Consumo	Precio/ kWh	Rango kWh
1 <25°C	Básico	\$ 0.793	0 - 75
	Intermedio	\$ 0.956	76 - 140
	Excedente	\$ 2.802	141 - 250
1A 25 °C	Básico	\$ 0.793	0 - 75
	Intermedio	\$ 0.956	76 - 150
	Excedente	\$ 2.802	151 - 300
1B 28°C	Básico	\$ 0.793	0 - 75
	Intermedio	\$ 0.956	76 - 175
	Excedente	\$ 2.802	176 - 400
1C 30°C	Básico	\$ 0.793	0 - 75
	Intermedio	\$ 0.956	76 - 175
	Excedente	\$ 2.802	176 - 850
1D 31°C	Básico	\$ 0.793	0 - 75
	Intermedio	\$ 0.956	76 - 200
	Excedente	\$ 2.802	201 - 1000
1E 32 °C	Básico	\$ 0.793	0 - 75
	Intermedio	\$ 0.956	76 - 200
	Excedente	\$ 2.802	201 - 2000
1F 33°C	Básico	\$ 0.793	0 - 75
	Intermedio	\$ 0.956	76 - 200
	Excedente	\$ 2.802	201 - 2500

Tabla 3-3.- Cuotas aplicables para temporada de verano. (Elaboración propia con datos de CFE)

Cuotas aplicables para temporada de Verano			
Tarifa	Consumo	Precio/ kWh	Rango kWh
1A 25 °C	Básico	\$ 0.697	0 - 100
	Intermedio	\$ 0.822	101 - 150
	Excedente	\$ 2.802	151 - 300
1B 28°C	Básico	\$ 0.697	0 - 125
	Intermedio	\$ 0.822	126 - 225
	Excedente	\$ 2.802	226 - 400
1C 30°C	Básico	\$ 0.697	0 - 150
	Intermedio bajo	\$ 0.822	151 - 300
	Intermedio alto	\$ 1.050	301 - 450
	Excedente	\$ 2.802	451 - 850
1D 31°C	Básico	\$ 0.697	0 - 175
	Intermedio bajo	\$ 0.822	176 - 400
	Intermedio alto	\$ 1.050	401 - 600
	Excedente	\$ 2.802	601 - 1000
1E 32 °C	Básico	\$ 0.583	0 - 300
	Intermedio bajo	\$ 0.726	301 - 750
	Intermedio alto	\$ 0.948	751 - 900
	Excedente	\$ 2.802	901 - 2000
1F 33°C	Básico	\$ 0.583	0 - 300
	Intermedio bajo	\$ 0.726	301 - 1200
	Intermedio alto	\$ 1.786	1201 - 2200
	Excedente	\$ 2.802	2200 - 2500

En relación a las tarifas que no son para el sector residencial, es decir, para un negocio o la industria, no se aplica la metodología anterior. Estas se clasifican, de manera general, en dos grandes categorías:

1. Tarifas generales, la cual abarca: baja tensión, media tensión, alta tensión, servicio de respaldo y servicio interrumpible
2. Tarifas específicas, que incluye: servicios públicos, agrícolas, temporal, acuícola.

Las cuotas y asignación de cada una de ellas, dependerá de la necesidad de energía y el voltaje que el cliente necesite. Sin embargo, para fines estadísticos la CFE, divide las tarifas en seis grandes categorías, las cuales son: residencial, comercial, mediana industria, gran industria, servicios y agricultura, tal y como lo

muestra la figura 3-5, donde se presentan los precios promedios de electricidad en México, del periodo de 2002 al 2017.

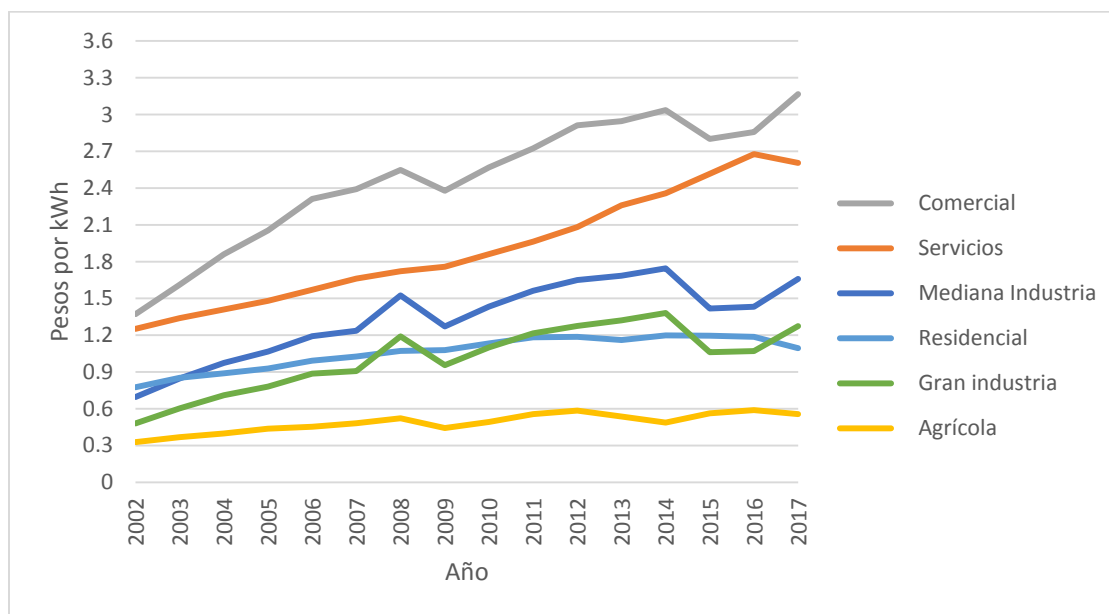


Figura 3-5.- Precios promedio de energía eléctrica por sector tarifario. (Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética)

Dentro de las múltiples causas por las que se atribuye un aumento a las tarifas eléctricas se encuentran los altos precios de los combustibles fósiles. En los últimos años se ha dado un aumento en los precios del combustóleo y diésel, combustibles que son empleados en las centrales de generación eléctrica, lo que ha ocasionado variaciones en las tarifas de energía eléctrica.

En el periodo de 2006 a 2016, el precio medio de energía eléctrica se mantuvo a una tasa media de crecimiento anual de 2.9%. El sector agrícola, debido a que se encuentra subsidiado al igual que el residencial en bajo consumo, presentó un crecimiento de 2.7% y el residencial de 2.3%.

Los sectores comerciales y de servicios son los que tienen una mayor variabilidad en sus precios medios durante la última década con 3.0% y 5.5% respectivamente. Por su parte, el sector industrial, ha tenido un crecimiento de 2.9% en el mismo periodo. (Secretaría de Energía, 2017)

3.6 Consumo de energía eléctrica para acondicionamiento de espacios

La electricidad usada específicamente para enfriar casas y negocios en México no es medida directamente, pero puede ser inferida mediante el análisis de datos existentes. Un estudio detallado realizado para la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (Lawrence Berkeley National Laboratory / U.C. Berkeley / UNAM-IER, 2018) demuestra que, como se observa en la figura 3-6, el consumo de energía eléctrica aumenta en los meses más calurosos. El sector residencial muestra el más grande efecto, con aumento en la electricidad de cerca del 50% del mes de enero a agosto. La categoría gran comercio y mediana industria (Gran Demanda en Media Tensión), tiene el consumo de energía más grande en general, dejando ver la misma tendencia, correspondiente a la electricidad consumida por equipos de aire acondicionado. Considerando a todos los sectores, este total es cerca de 5 TWh más alta que el promedio de diciembre a mayo o cerca del 30%.

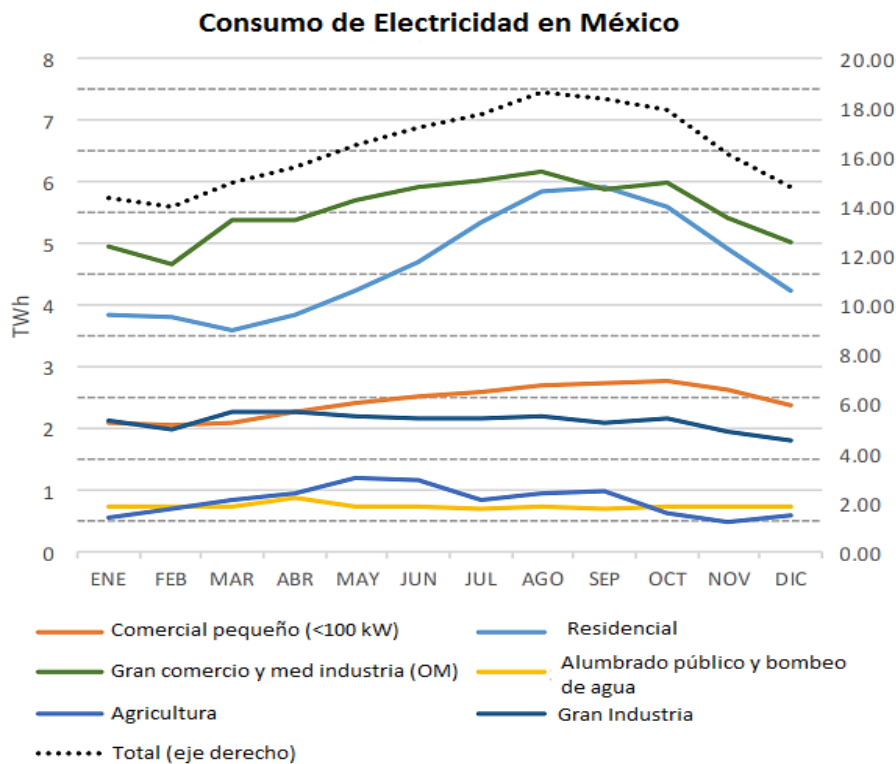


Figura 3-6.- Adaptación, Consumo anual de electricidad en México. (Lawrence Berkeley National Laboratory / U.C. Berkeley / UNAM-IER, 2018)

Para calcular el total de energía destinada para enfriar espacios, en la figura 3-7, se aísla la carga de enfriamiento de cada sector, comparado con una base de invierno más la suma de los sectores que no presentan carga de enfriamiento (alumbrado público, bombeo y agricultura). Es claro que, el sector residencial junto con gran comercio y mediana industria representan la mayor parte de la energía para enfriamiento en México. Sumando cada región sombreada, se calcula el total anual de energía de enfriamiento, siendo este valor de 22.6 TWh en 2015, lo que representa el 9% de la energía generada ese año. (Lawrence Berkeley National Laboratory / U.C. Berkeley / UNAM-IER, 2018)

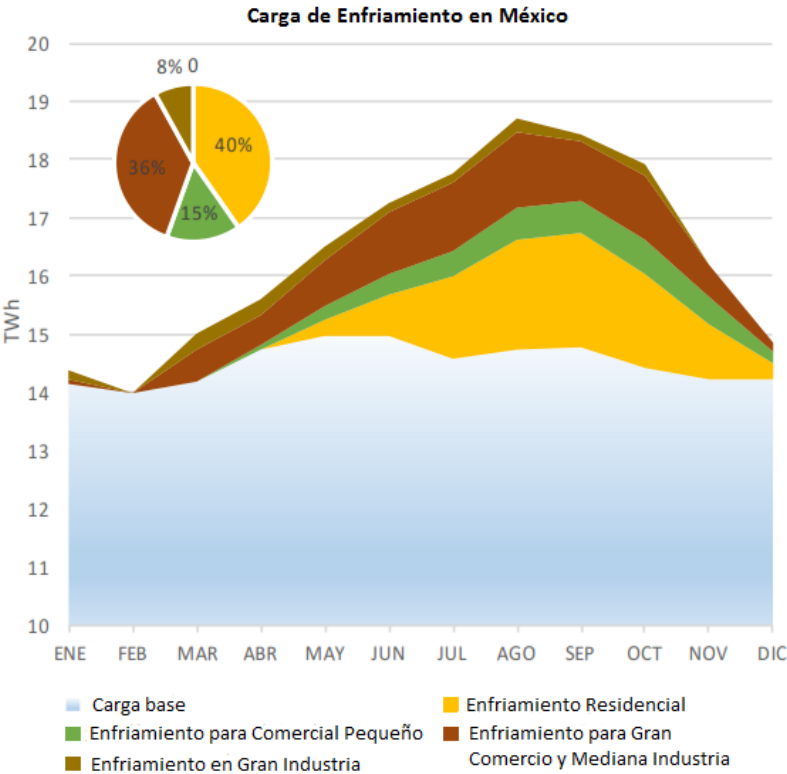


Figura 3-7.-Adaptación, Carga de enfriamiento dividido en los diferentes sectores.

De la misma manera, de acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee), el uso de electricidad para confort térmico en zonas de clima cálido representa más del 30% de todo el consumo eléctrico del sector residencial. Según estiman algunos estudios, el uso de la electricidad para el confort térmico seguirá creciendo, debido que es una necesidad insatisfecha que crece a medida que zonas de clima cálido se urbanizan. Tan sólo en los últimos cuatro años, la

demanda eléctrica para confort térmico ha crecido más de 50% en zonas bajo tarifas 1B y 1C. (Ver figura 3-4)

Este problema crece año con año con viviendas que son habitadas sin tener elementos que satisfagan las necesidades de confort térmico y la solución que se le ha dado es dar subsidios al consumo de electricidad, que hoy en día representan una fuerte carga a los recursos financieros del Estado, por más de 40 mil millones de pesos al año. A costos actuales, se estima que cada año se agregan, sólo por el consumo para el confort térmico, 400 millones de pesos que tiene que pagar el Gobierno. (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2017)

El análisis anterior indica impactos negativos para los consumidores mexicanos, Gobierno, el medioambiente y las redes de electricidad, como consecuencia del fuerte crecimiento ocasionado por la creciente demanda por las necesidades de enfriamiento. Básicamente, existen dos maneras para reducir la energía usada para enfriamiento: (1) reducir la demanda para enfriamiento y (2) mejorar la eficiencia de los equipos empleados. Por ello se detalla y recomienda lo siguiente:

- La electricidad usada para enfriamiento ya es alta y se espera que siga creciendo desproporcionalmente en los siguientes 15 a 35 años, un hecho que, debería ser incorporado dentro de la planeación energética y la implementación de estrategias en la Ley de Transición Energética.
- Las emisiones relacionadas con enfriamiento podrían alcanzar 20 millones de toneladas métricas de CO₂ para 2030. Por ello, el acondicionamiento de espacios es una consideración importante para los compromisos establecidos bajo el Acuerdo de París.
- Adoptar equipos más eficientes mediante normas o certificaciones.
- Adaptar nuevas tecnologías mediante la investigación y desarrollo para equipos alternativos de aire acondicionado.

Con respecto al sector comercial o de servicios, calcular el consumo de energía eléctrica destinada a aire acondicionado se torna un tanto complejo, ya que este dependerá de las actividades que se realizan en dicho sector, el tamaño del inmueble, categoría, ubicación geográfica, combustibles y fuentes de energía

utilizadas. Por ejemplo, la distribución del consumo hotelero para un hotel situado cercano a la costa o en una región calurosa, como en los casos de Ensenada, Los Cabos, Puerto Peñasco, etc., el consumo de energía será predominante para el aire acondicionado (Rowe, Paredes Rubio, Reveles González, Chidiak, & Stanley, 2009), tal y como se muestra en la figura 3-8.

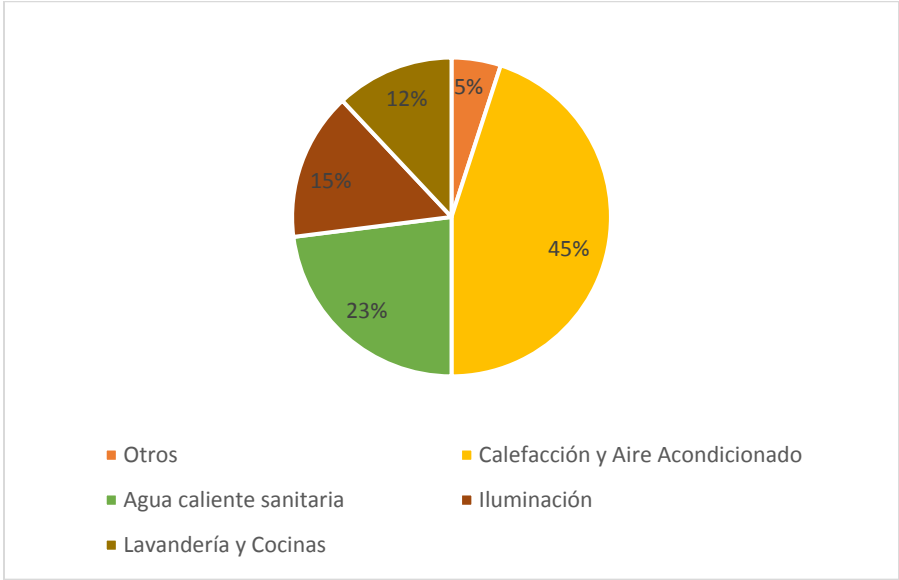


Figura 3-8.- Distribución de los consumos de energía en un hotel. (Rowe et al., 2009)

Es importante mencionar que los estudios que se han realizado sobre eficiencia energética o consumo de energía eléctrica de aire acondicionado se han enfocado al sector residencial y la información es escasa para el sector comercial. A pesar de ello y teniendo en consideración el análisis que se realizó, es necesario tener una mejor concientización del gran efecto que tiene el consumo de energía en edificaciones y, en consecuencia, de aire acondicionado. Un ejemplo de esto es la interpretación del Balance Nacional de Energía 2016, ya que se estima que el consumo final energético en México, el sector residencial, comercial y público representó el 18.1% del consumo final total, mientras que el sector industrial representó el 30.7 % (Sener, 2018). Estos datos podrían no tener el impacto suficiente para las políticas públicas, ya que, como menciona (De Buen R., 2016), se subestima significativamente el peso que tienen las instalaciones en la que opera el sector servicios (edificios de oficinas, tiendas departamentales, escuelas,

hospitales, entre otros). Esta subestimación se origina en la manera en la que CFE clasifica a los usuarios, ya que la mayoría de las instalaciones típicas de servicios están conectadas en tarifas OM y HM, y estas se clasifican dentro de la categoría “mediana industria”.

3.7 Mercado de aire acondicionado

La Asociación Nacional de Fabricantes de Aparatos Domésticos (ANFAD) señala que las ventas anuales de aire acondicionado se han triplicado desde 1998 para llegar a cerca de 600 mil al año, lo que representa una rápida penetración de esta tecnología en los hogares mexicanos. Además, de acuerdo con los rangos de consumo que la CFE indica para el sector doméstico, se estima que el número de viviendas con acondicionamiento de aire es del orden de 5.5 millones, sobre un total de 27.3 millones de viviendas en el 2010, lo que representa una tasa de penetración de 20.1%. Normalmente son para equipos de enfriamiento y, en un número menor, de ciclo reversible, como lo son las bombas de calor, además de ello, se estima un crecimiento anual de 3.5% de construcciones en zonas donde se requiere acondicionamiento ambiental. (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2011)

Un problema evidente que agrava el uso de acondicionadores de aire es, la cantidad de gases de efecto invernadero que se emite por la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad que hace funcionar a estos equipos. En promedio, el uso de electricidad por acondicionamiento térmico en una vivienda en región de clima cálido es de media tonelada de CO_{2eq} por año, y que incluso puede ser hasta cuatro veces más en climas extremos.

En México se usan básicamente tres tipos de acondicionadores de aire para uso residencial (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2011):

- Tipo Ventana
- Tipo minisplit y multisplit
- Tipo central, paquete o dividido

En 2004, 76 % de los equipos vendidos eran de tipo ventana y sólo 18% eran minisplit. Esta situación se ha estado revirtiendo, ya que para el 2010, el 46% de estos equipos correspondía a tipo ventana y el 53% a equipos minisplit. La gráfica 3-9 muestra la evolución del mercado de equipos de aire acondicionado, en la cual se observa el aumento en el uso de quipos tipo minisplit, los cuales son muy sencillos de instalar, no requieren ductos, son fáciles de operar, además de ser relativamente económicos.

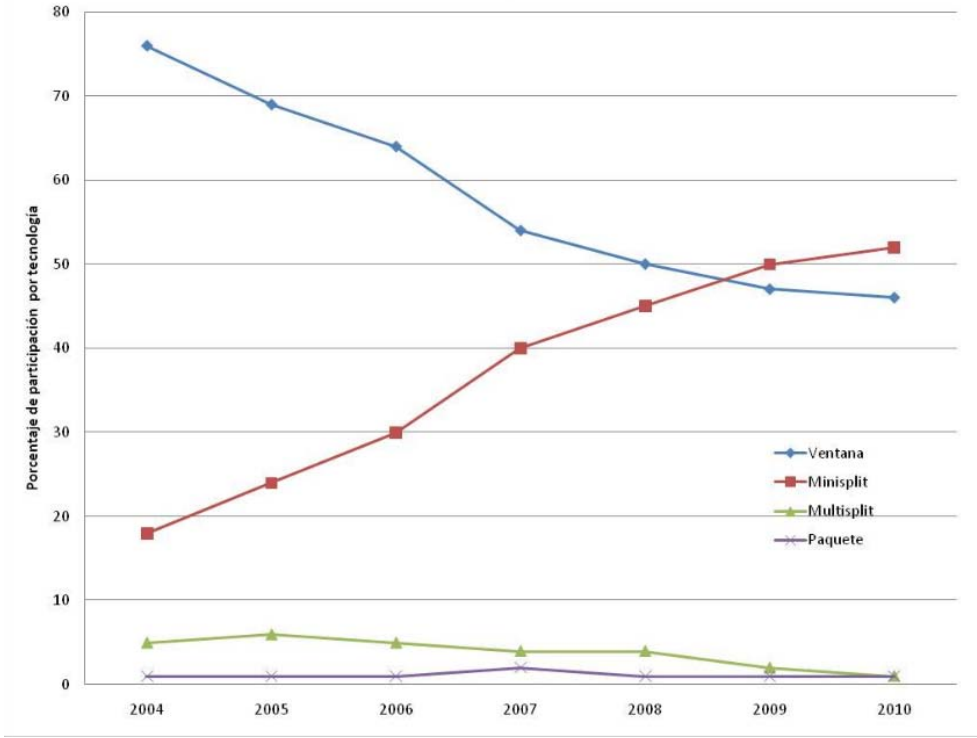


Figura 3-9.- Tendencia histórica de consumo por tipo de unidad. (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2011)

Los fabricantes de aire acondicionado en México son LG Electronics México, Rheem de México, Samsung Electronics Corporativo, Whirlpool México, York México, Grupo Mabe, Daikin México, Trane. No obstante, las BCG son muy poco comunes entre estos fabricantes y sólo los últimos dos proveedores las ofrecen.

3.8 Marco legal

México ha entrado en un periodo de importantes cambios estructurales en el sector energético con la llamada Reforma Energética y la Ley de Transición Energética,

aprobada en diciembre del 2013. La Secretaría de Energía (Sener), estableció metas, entre las cuales destacan, reducir el precio de la electricidad, elaborar estrategias para tener un adecuado suministro de combustibles a mejores precios, incrementar la participación de energías limpias en la generación de electricidad, de 25% para 2018, 30% para el año 2021 y 35% para el año 2024. (Rosas-Flores, 2017)

Poco tiempo después, el 11 de agosto del 2014, se publicó la Ley de la Energía Geotérmica, como un instrumento jurídico, cuyo objeto es el de regular el reconocimiento, la exploración y explotación de recursos geotérmicos para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo dentro de los límites del territorio nacional, con el fin de generar energía eléctrica o destinarla a usos diversos (Cámara de Diputados México, 2014). Para quien desee hacer uso o aprovechar un recurso geotérmico, primero deberá obtener un registro, permiso o concesión emitido por la Sener.

La definición de los términos como reconocimiento, exploración y explotación, empleados en la Ley de Energía Geotérmica, hacen referencia a técnicas que son empleadas para identificar y explotar manifestaciones geotérmicas ya que menciona procedimientos específicos, como estudios de geología por fotos aéreas, percepción remota, toma y análisis de muestras de rocas, muestreo geoquímico y geohidrológico, entre otras.

Lo anterior denota que la Ley de Energía Geotérmica está orientada a recursos donde exista manifestaciones geotérmicas, inclusive para usos directos ya que el enfoque está orientado a recursos de alta y media entalpia y más específicamente a la generación de energía eléctrica. No hace énfasis a usos directos y por consecuencia no menciona el procedimiento con el que debieran tratarse las BCG, que, como se describió en el primer capítulo, no necesitan una manifestación geotérmica para operar, sólo la energía contenida en el subsuelo, es decir, aprovechan la temperatura constante que se presenta debajo de la tierra empleando un intercambiador enterrado debajo de la superficie para transferir la energía a ella.

Actualmente no existe una Ley para Usos Directos de Geotermia, que conduzca, regule u oriente a la explotación o mejor dicho a la apertura de BCG, cuya tecnología es ampliamente empleada y aprobada a nivel mundial. Hay diversos factores que han frenado este desarrollo y el marco jurídico, leyes, incentivos, fideicomisos y demás, como se vio en el segundo capítulo, han sido claves para un fructífero crecimiento.

3.9 Recursos económicos y humanos

La Reforma Energética ha mostrado que se requieren expertos de alto nivel, profesionales y técnicos con los conocimientos y capacidades para hacer frente a los grandes retos que enfrentará el sector energético en el futuro próximo, tanto en las áreas de las ingenierías como en las económicas, sociales, legales, entre otras. (Secretaría de Energía & Secretaría de Educación (SEP), 2014)

En lo que respecta al personal con Grado Universitario trabajando en actividades geotérmicas, la Tabla 3-4 muestra la cantidad de personas laborando del 2010 al 2014.

Tabla 3-4.-Personal laborando en Geotermia. (Gutiérrez-Negrín et al., 2015)

Año	Cantidad de profesionales laborando por año				
	Gobierno	Empresas públicas	Universidades	Consultores extranjeros	Industria privada
2010	6	105	25	0	21
2011	7	107	24	0	23
2012	7	105	26	1	26
2013	7	105	30	1	50
2014	8	105	40	0	70

Los profesionistas trabajando para el Gobierno, son principalmente de la Sener, los cuales regulan actividades que no sólo son de la geotermia, sino de energías renovables. La columna referente a empresas públicas reporta el personal trabajando en Comisión Federal de Electricidad (CFE), en la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. El apartado Universidades contabiliza a la cantidad de profesionales trabajando en Centros de Investigación como el Instituto Nacional de

Electricidad y Energías Limpias (INEEL), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y en Universidades como la UNAM.

La industria privada está concentrada principalmente por compañías perforadoras y unas pocas consultoras y desarrolladoras de los primeros proyectos de energía geotérmica en el país.

Es importante mencionar el ligero incremento de profesionistas que hubo para el año 2014, donde la Reforma Energética comenzó a ser implementada y se formó el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) y la industria privada comenzó a invertir. Es de esperar que esta cifra siga en aumento en los años subsecuentes.

Actualmente, nuestro país cuenta con el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo), la cual representa una alianza entre la academia y la industria con el apoyo de la Sener y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), cuyo objetivo es promover y acelerar el desarrollo de la energía geotérmica de México. Este consorcio incluye a varias universidades, institutos de investigación científica, así como empresas públicas y privadas.

La idea del CeMIEGeo es utilizar la infraestructura física y humana existente en el país, fortalecer y promover su funcionamiento de manera cotidiana, de tal manera que los esfuerzos se concentren para promover la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en el campo de la energía geotérmica.

Por lo anterior mencionado, las inversiones para el desarrollo de la geotermia también han venido en aumento; la tabla 3.5 muestra que, en el último periodo, para investigación y desarrollo, esta cantidad fue hasta cuatro veces mayor que para el periodo anterior y que por primera vez en la historia hubo inversión privada. También es de destacar que los recursos económicos son destinados a generación de energía eléctrica y que, como se señaló con anterioridad, los usos directos están escasamente desarrollados.

Tabla 3-5.-Inversión total en Geotermia. (Gutiérrez-Negrín et al., 2015)

Periodo	Investigación y Desarrollo	Desarrollo en Campo	Utilización		Tipo de financiamiento	
			Usos Directos	Generación de electricidad	Privado	Público
	Millones USD	Millones USD	Millones USD	Millones USD	%	%
1995-1999	7.41	246.64	0	254.05	0	100
2000-2004	11.61	315.17	0	326.77	0	100
2005-2009	15.65	237.69	0	253.34	0	100
2010-2014	64.61	265.67	0	330.28	5	95

3.10 Conclusiones

Los usos directos de Geotermia en México están escasamente desarrollados debido a que sólo se aprovecha la energía térmica contenida en el subsuelo en balnearios o instalaciones para usos recreativos y terapéuticos, sin realmente aprovechar el potencial que las BCG representan, ya que, como se expuso en este capítulo, el uso de aire acondicionado debido a las necesidades de confort térmico en México trae consigo problemas técnicos, económicos y ambientales.

Un ejemplo de ello es el gran gasto que representa para el Gobierno Federal, consecuencia del gran subsidio que se hace en los seis meses más calurosos de cada año, en cada región del país. Se demostró que el consumo de energía eléctrica para los distintos sectores tiene un aumento considerable en los meses más cálidos del año que llega a ser de hasta 50% mayor que en los meses menos cálidos.

México va por buen camino, ya que con la Reforma Energética se han hecho inversiones tanto en materia legal como en la formación de recursos humanos, a pesar de ello, hay un largo camino por recorrer, ya que no existen políticas públicas que regulen u orienten la aplicación de BCG, así como tampoco se ha fomentado la investigación y desarrollo de esta tecnología. De esta manera, será necesario incluir a las BCG como una tecnología sustentable, que ayudará al país a cumplir las metas de reducción de CO₂.

Capítulo 4. Estudio de Factibilidad

4.1 Introducción

Las inversiones en sistemas de eficiencia energética, particularmente en energías renovables, requieren una inversión inicial relativamente alta en infraestructura energética, la cual busca obtener ahorros y demás beneficios a futuro. Para hacer una correcta evaluación de estas inversiones será necesario hacer una comparación con una tecnología convencional y analizar cuidadosamente todos los parámetros técnico económico que intervienen en la implementación de una nueva tecnología.

Los costos asociados a las BCG en México se tornan un tanto complejos de estimar, debido a que no hay desarrollo de esta tecnología en nuestro país. Utilizar valores de otros países como referencia, donde el mercado está completamente desarrollado, tendrá que ser tomado con precaución, ya que no representan la situación actual del país. Sin embargo, hacer las consideraciones apropiadas respecto a dichos escenarios, será un buen punto de partida para analizar la implementación de las BCG.

4.2 Definición de parámetros técnicos y económicos

Para llevar a cabo el análisis técnico-económico sobre la instalación de la BCG, se requiere conocer los valores de ciertos parámetros para realizar el estudio lo más detallado posible. A continuación, se definen los valores de los parámetros utilizados para el cálculo económico del valor presente neto, tasa interna de recuperación y el periodo de recuperación. Para todos los cálculos donde sea necesario convertir dólares americanos a pesos mexicanos, se tomará como referencia el tipo de cambio FIX correspondiente al día 5 de abril del 2018, cuyo valor es de \$18.1081.

4.3 Conceptos económicos

Para cuantificar el valor de una inversión en un proyecto, existen varios métodos que describen si una inversión es atractiva para llevarse a cabo, así mismo, estos métodos proporcionan indicadores que definen la factibilidad del proyecto. Los más comúnmente utilizados y con los que se analizará este proyecto son: el Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR), se muestra también el parámetro Periodo de Recuperación (PR) como indicador del tiempo de retorno de la inversión. Se definirán los dos primeros de manera general de acuerdo a (CossBu, 1995).

4.4 Método del Valor Presente Neto (VPN)

El método del VPN es uno de los criterios económicos más ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de inversión. Consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Cuando dicha equivalencia es mayor al desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado.

Para comprender mejor la definición anterior, a continuación, se muestra la fórmula utilizada para evaluar el valor presente de los flujos generados por un proyecto de inversión:

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

donde:

VPN = Valor Presente Neto

I_0 = Inversión inicial

F_t = Flujo de efectivo neto del periodo t

n = Número de periodos de vida del proyecto

i = Tasa de recuperación mínima atractiva

4.5 Tasa interna de Rendimiento (TIR)

En todos los criterios de decisión, se utiliza una clase de índice, medida de equivalencia, o base de comparación capaz de resumir las diferencias de la importancia que existe entre las alternativas inversión. Es importante distinguir entre criterio de decisión y una base de comparación. Esta última es un índice que contiene cierta clase de información sobre la serie de ingresos y gastos a que da lugar una oportunidad de inversión.

La tasa interna de rendimiento TIR, como se llama frecuentemente, es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado. Está definida como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente de una serie de ingresos y egresos. Es decir, la TIR de una propuesta de inversión, es aquella tasa de interés i que satisface la siguiente ecuación:

$$\sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + i^*)^t} = 0$$

4.6 Costo de instalación

Se refiere a la inversión inicial que se requiere hacer para instalar, en su conjunto, una BCG. Esta incluye a los tres componentes principales: el intercambiador de calor en el subsuelo, la bomba de calor y el sistema de distribución de energía. El valor total de la instalación es mayor (por el costo asociado a la perforación y/o tubería), que un sistema convencional, no obstante, los ahorros son mayores. El costo de instalación en otros países varía, dependiendo de la experiencia o habilidad de las compañías contratistas para la perforación o excavación, que está ligado a qué tan robusta es la industria en determinado país.

4.7 Costo del intercambiador de calor en el subsuelo

Como se mencionó en el capítulo 1, hay diferentes tipos de instalaciones para el intercambio de calor con el subsuelo: vertical, horizontal, slinky, y en un cuerpo de agua o GW (Ground Water). El tipo de instalación variará, principalmente, de la disponibilidad de espacio y del tipo de suelo. Se usaron valores reportados por Kevin

Rafferty (Rafferty, 2008) que corresponden a precios de EUA para el 2008 (Figura 4-1.)

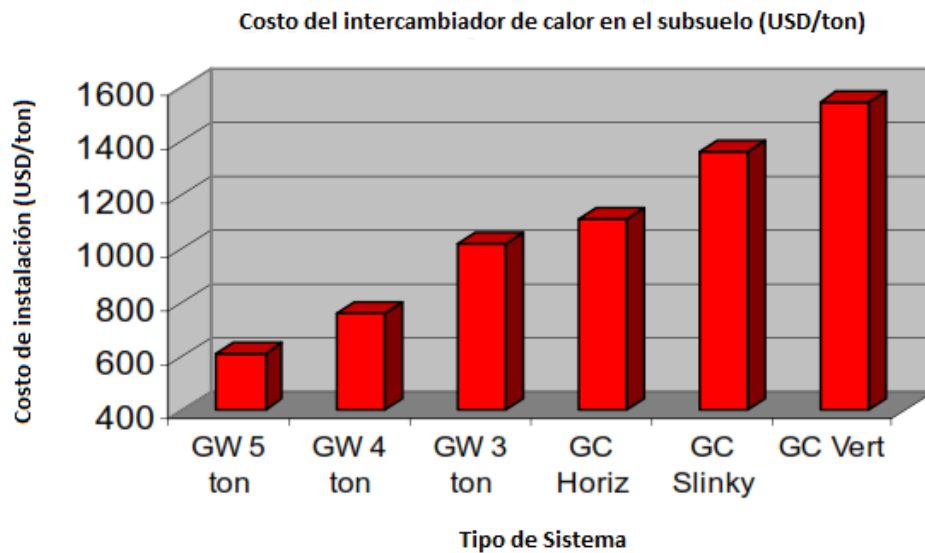


Figura 4-1.-Adaptación, Costo de instalación del intercambiador de calor en el subsuelo (Rafferty, 2008).

Se puede observar que la configuración vertical es la más costosa debido al elevado costo de los equipos de perforación, comparado con equipos más pequeños como retroexcavadoras que se utilizan en un sistema horizontal o slinky. Para un sistema que utiliza un cuerpo de agua (GW), el costo incluye una bomba sumergible, tanque, tubería hacia y desde la casa y un pozo de agua. El costo de este disminuye cuando la capacidad de refrigeración aumenta debido a que se ocupa el mismo pozo para todas las capacidades. Las configuraciones verticales, horizontales y slinky, incluyen la perforación o trinchera en el subsuelo, y la instalación de la tubería.

Para poder utilizar estos valores correctamente se deberán deflactar mediante el Índice de Precios Productor, es decir, hay que eliminar el efecto producido por la inflación o deflación. Este índice mide el cambio promedio de los precios de venta para determinada industria a través del tiempo.

Se seleccionó el índice referente a la categoría "Plomería, Contratistas de Calefacción y Aire Acondicionado, trabajos en construcciones no residenciales"

publicado por el Departamento del Trabajo de los EUA. Los datos correspondientes al periodo 2008-2017 fueron graficados (Figura 4-2).

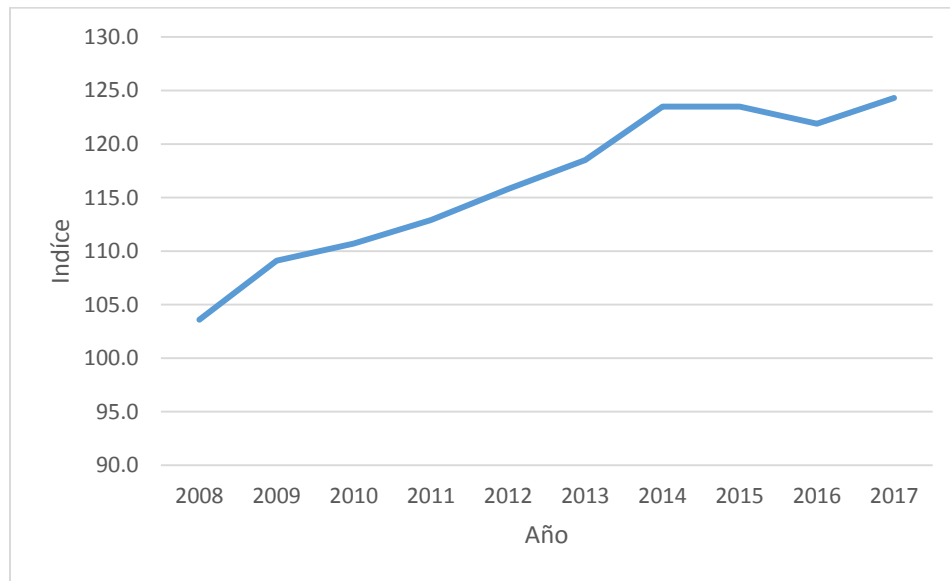


Figura 4-2.-Índice de Precios Productor para “Plomería, contratistas de calefacción y aire acondicionado, trabajos en construcciones no residenciales”. (Elaboración propia con datos del Departamento del Trabajo de los EUA)

Para obtener el valor por el cual se deben multiplicar los precios del 2008 se utiliza la siguiente ecuación para cada periodo de acuerdo a Jonathan Heath (Heath, 2012):

$$\text{Cambio porcentual entre periodos} = \left(\frac{\text{Periodo 2}}{\text{Periodo 1}} - 1 \right) * 100 = 18.5 \%$$

Con el respectivo tipo de cambio y multiplicando los precios del 2008 por el porcentaje calculado, obtenemos los siguientes valores por tonelada de refrigeración:

- En un cuerpo de agua: \$12,992
- Configuración horizontal: \$ 23,793
- Configuración slinky: \$ 28,098
- Configuración vertical: \$ 32,479

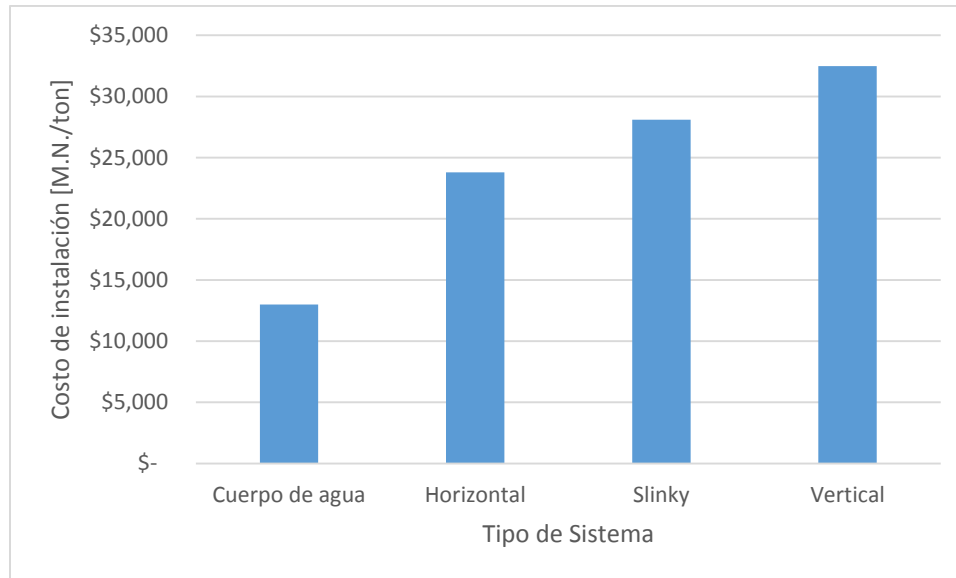


Figura 4-3.- Costo de instalación actualizado del intercambiador de calor en el subsuelo (Elaboración propia con datos de Kevin Rafferty).

4.8 Costo de configuración vertical en México

Este estudio tiene por objetivo intentar modelar la proyección económica lo más cercano a la realidad, por ello, es necesario aclarar que los valores anteriores no representan el costo de instalación en México, sin embargo, detallar cada tipo de instalación es poco práctico para un estudio de factibilidad. Para evaluar la proporción en la que podrían variar estos precios, se cotizaron los elementos que componen la configuración vertical.

La tubería se cotizó con el proveedor Extrumex, s.a de c.v. El material es de HDPE con una relación de diámetro (SDR) 11 de 1.00 y 1.25 pulgadas de diámetro, medidas que son típicas en estas instalaciones. El precio por metro lineal fue de \$13.40 para tubería de una pulgada y \$21.2 para la de 1.25.

Por otra parte, se cotizó la perforación en el subsuelo, mediante la compañía Ingenera®, ofreciendo un valor de \$600 por metro lineal con ademe de PVC de 4 pulgadas. Es decir, si se requiere hacer una instalación de tipo vertical y basándose en las longitudes mínimas que se presentaron en la tabla 1.1 del primer capítulo, se necesita perforar aproximadamente 45 m por tonelada de refrigeración, teniendo así, un costo de perforación de aproximadamente \$27,456 pesos mexicanos por

tonelada de refrigeración. De igual manera se calculó el costo aproximado de la tubería, obteniendo un costo de \$2,516 por tonelada de refrigeración. Por lo tanto, el costo total para una instalación vertical es de \$29,972 el cual es apenas 7.7% menor que los valores reportados anteriormente; con lo cual se puede inferir que los precios reportados en la Gráfica 4.3 pueden ser usados para una buena estimación económica.

4.9 Capacidad de enfriamiento

Se refiere a la capacidad o carga térmica que los equipos de aire acondicionado entregan, resultado del cálculo la edificación necesita para alcanzar el confort térmico. El cálculo de esta es fundamental para tener una adecuada selección de los equipos de aire acondicionado y de esta manera hacer uso eficiente de la energía. Sin embargo, el presente análisis comparativo pretende evaluar y competir con la tecnología actual, por ello, se tomará como punto de partida el diseño existente de cada uno de los casos de estudio. Sólo se evaluará el costo la bomba de calor, (la unidad empaquetada), y el costo del intercambiador de calor en el subsuelo, no se tomará en cuenta el costo del sistema de distribución de energía, a sabiendas de que este ya existe en la edificación y sólo se hará un reacondicionamiento del sistema de aire acondicionado.

4.10 Caso de Estudio Cancún

En el capítulo 3 se hizo un análisis de las regiones donde la necesidad de aire acondicionado para confort térmico es evidente. Para medir esta necesidad de climatizar el ambiente de una localidad, ya sea para calefacción y/o refrigeración, comúnmente se usa una herramienta llamada “grados-día”, los cuales se definen como la diferencia algebraica, expresada en grados, entre la temperatura media de un día determinado y una temperatura de referencia. Para un periodo dado (meses, años) sólo se realiza la suma algebraica de los grados-día de los diferentes días del periodo. Para enfriamiento, normalmente se utiliza 10 °C como el valor de referencia mientras que para calentamiento se utiliza 18°C. Estos valores se hacen mediante mediciones en estaciones meteorológicas. La figura 4.4 muestra los grados día de

enfriamiento para la Ciudad de Cancún, calculados mediante el programa Retscreen®. Es importante señalar que el software no calcula grados día para calentamiento, ya que esta zona climática es clasificada como muy caliente-húmeda y obviamente no tiene necesidades de calefacción. Esta gráfica muestra que la necesidad de enfriamiento se mantiene constante casi durante todo el año y aumenta ligeramente en los meses más calurosos, el calor más alto corresponde al mes de julio, con un total de 577 grados-día.

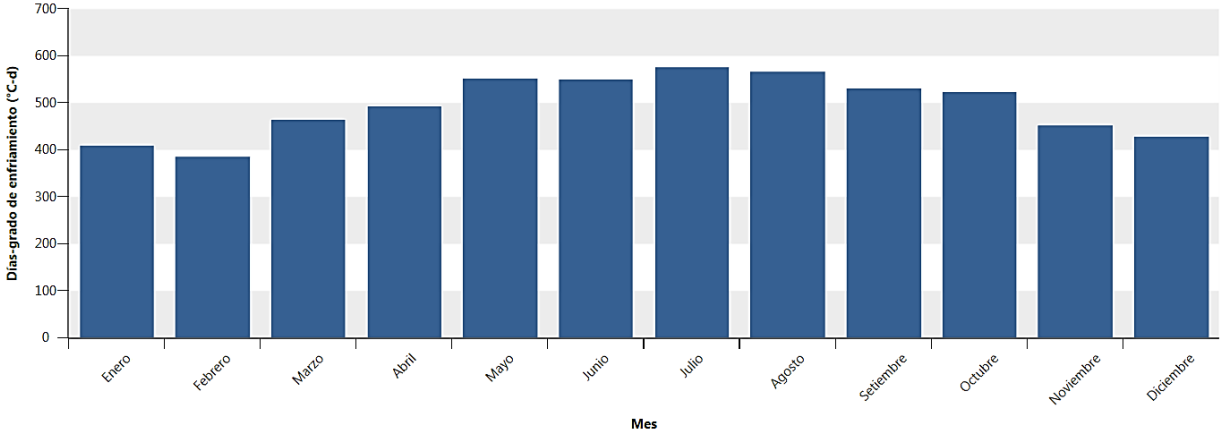


Figura 4-4.- Grados día de enfriamiento para Cancún.

El espacio a analizar corresponde a oficinas del sector comercial, donde se contó con la disponibilidad de información referente al sistema de aire acondicionado y de los gastos relacionados al consumo de energía eléctrica del recinto.

Esta edificación tiene un área de 525 m², cuenta con nueve equipos de aire acondicionado tipo condensadora de la marca Lennox®. (Figura 4.5), todos ellos de diferente capacidad de enfriamiento. En su conjunto, suman una capacidad de 25 toneladas. Todos cuentan con una eficiencia de 13 SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) a excepción del equipo más pequeño que tiene una eficiencia de 10 SEER.



Figura 4-5.- Sistema de aire acondicionado tipo condensadora.

4.10.1 Consumo de energía eléctrica

Cuantificar la cantidad de energía que estos equipos consumen mensualmente se podría calcular con la potencia y el tiempo de operación de cada equipo, mediante la siguiente ecuación:

$$Potencia = \frac{Capacidad\ del\ equipo}{Eficiencia\ (SEER)} [=] \frac{\frac{Btu}{h}}{\frac{Btu}{hW}} [=] W$$

$$Consumo\ mensual\ de\ energía = \frac{W\ x\ tiempo\ de\ operación}{1000} [=] kWh$$

Haciendo el respectivo calculo, obtenemos un valor de 5137.8 kWh, cifra que no corresponde con el consumo real que aparece en el recibo de electricidad (Figura 4-6) esto debido a que los equipos no operan a su máxima capacidad y a que las necesidades de confort térmico cambian en el transcurso del año.

Es así que se torna un tanto complejo estimar, del total de energía consumida, la correspondiente al aire acondicionado. Existen básicamente dos maneras de calcular o aproximar esta cantidad de energía. La primera, es hacer mediciones directamente con un medidor de energía eléctrica, lo cual es poco práctico y no es objetivo de esta tesis.

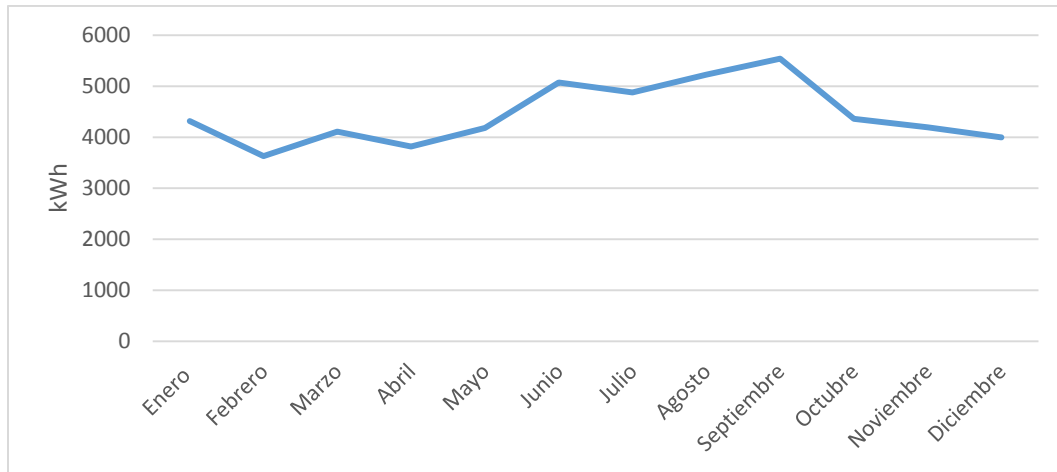


Figura 4-6.- Consumo mensual de energía eléctrica en oficinas comerciales de Cancún para el año 2017.

La segunda opción es realizar un diagnóstico energético, herramienta que se utilizó en este caso de estudio. Esto consiste en contabilizar los equipos que consumen energía eléctrica y, mediante las ecuaciones mostradas anteriormente, estimar el consumo total de energía eléctrica que no corresponde a aire acondicionado. Es decir, si se cuenta con el consumo de energía eléctrica total, sólo se tendrá que “descontar” el consumo energético de los equipos, con excepción del aire acondicionado, y suponer que operan de manera constante a lo largo de todo el año, siendo el restante, el correspondiente a los equipos de enfriamiento. Los resultados para el mes de enero se muestran en la Tabla 4-1, donde se observa que el consumo de energía eléctrica que corresponde a los equipos de enfriamiento es del 68.1%, valor que está por encima del 30% o 50% que se reportó en el capítulo anterior.

Tabla 4-1.-Distribución del consumo de energía eléctrica para el mes de enero de 2017.

Equipo	Consumo mensual [kW/h]	Distribución del consumo de energía [%]
Equipo de computación	455.5	10.5
Iluminación	499.2	11.6
Refrigerador	360	8.3
Horno microondas	26	0.6
Fotocopiadora	36	0.8
Aire acondicionado	2942.3	68.1

La tendencia en el aumento de aire acondicionado del mes menos cálido al mes más cálido (de acuerdo a la Figura 4-4), corresponde del mes de febrero al mes de julio. Estos meses tienen una diferencia del 34.3%. A diferencia del sector residencial, que representa cerca del 50 %, como se mostró en la Figura 3-5. Con lo cual se infiere que el consumo de aire acondicionado en estas oficinas del sector comercial se hace de manera más “constante” a lo largo del año. A pesar de ello, el consumo de energía eléctrica está determinado por el uso de aire acondicionado, llegando a representar hasta el 78.4% del consumo total (Tabla 4-2).

Tabla 4-2.- Consumo mensual de aire acondicionado y porcentaje máximo de operación de los equipos de aire acondicionado para el año 2017.

Periodo	Consumo [kWh]	Relación correspondiente de AA [%]	Relación del equipo operando a máxima capacidad [%]
Enero	4319	72.3	57.3
Febrero	3632	67.0	43.9
Marzo	4110	70.9	53.2
Abril	3818	68.6	47.5
Mayo	4182	71.4	54.6
Junio	5075	76.4	72.0
Julio	4879	75.5	68.2
Agosto	5228	77.1	75.0
Septiembre	5540	78.4	81.0
Octubre	4362	72.5	58.1
Noviembre	4195	71.5	54.9
Diciembre	3996	70.0	51.0

4.10.2 Inversión inicial

Esta representa una de las principales barreras en la implementación de BCG, debido al alto costo de perforación. Los equipos que se tienen instalados en las oficinas comerciales de Cancún, en su conjunto, tienen un precio de \$265,827, el cual es cuatro veces menor a la inversión que se realizaría con una BCG, la cual incluye la perforación, la tubería y la bomba de calor. A continuación de describirá como se llegó a esta cifra.

La bomba de calor se cotizó con el proveedor Daikin®, con la misma capacidad que los equipos instalados (25 toneladas), esta es 31.5 % más eficiente que el sistema actual (18.5 EER vs 12.67 SEER), aunque es 16.4% más costosa que todos los equipos Fan Coil juntos. Cabe destacar la dificultad para, primeramente, encontrar proveedores que ofrezcan este tipo de equipos y segundo, la disponibilidad de los mismos, ya que son productos importados.

Considerando el costo de una configuración vertical, tal como se calculó en el apartado 4.8, se tiene una inversión inicial total de \$1,067,088, es decir, se tendrían que invertir \$801,261 más, que en el sistema actual.

4.10.3 Evaluación del proyecto

Para cuantificar los ahorros de energía eléctrica que ofrece la BCG y, evaluar si es conveniente invertir en este tipo de tecnología, se tomó el precio promedio por kWh que la CFE calcula, ya que el precio por kWh de consumo promedio diario no es el que determina el total que el usuario pagaría, sino está fuertemente influenciada por el precio de kWh en demanda máxima. La tarifa es OM, ahora llamada GDMTO (Gran Demanda en Media Tensión Ordinaria) y está clasificada bajo la categoría de mediana industria, así el precio promedio es de \$3.13 por kWh. Se consideró, además, una inflación anual media de 3.0% para el precio de electricidad, tal y como fue descrito en el capítulo anterior.

El proyecto se evaluó a 25 años, que es el tiempo de vida útil de la bomba de calor. Se consideraron las condiciones de operación del recinto, este equipo opera 12 horas al día, por cinco días a la semana. Cabe destacar que, si el equipo operara a máxima capacidad, es decir, entregando siempre las 25 toneladas de refrigeración, se tendrían ahorros anuales de \$67,204, sin embargo, como esto no ocurre, se tomó en consideración el porcentaje al cual opera el equipo de la Tabla 4-2, lo cual reduce el ahorro anual a \$40,177. Teniendo de esta manera un VPN de -\$409,831, lo cual interpreta que, al ser negativo, el proyecto debe ser rechazado, ya que los ahorros

que generará la BCG no compensan la gran inversión inicial. Los flujos de efectivo son negativos y no se logra recuperar la inversión en el tiempo de evaluación de este proyecto (Figura 4-7)

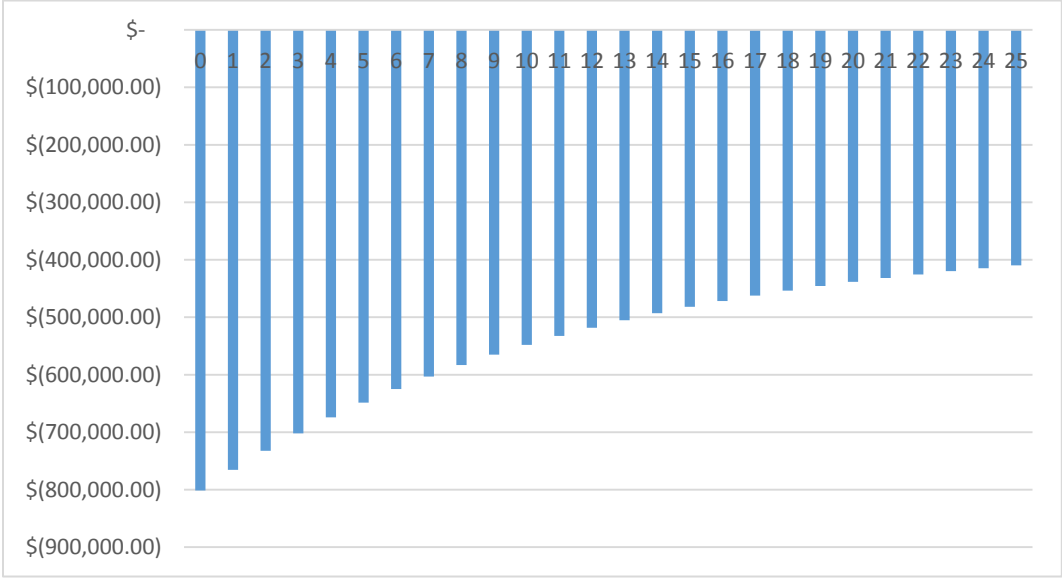


Figura 4-7.- Flujos de caja de la instalación de una BCG en Cancún.

La TIR es de 4.62%, lo cual indica que no se alcanza la rentabilidad mínima que se espera para esa inversión, ya que la tasa de descuento de fijo en 12%.

4.11 Caso de Estudio Mexicali

La Ciudad de Mexicali, en el estado de Baja California, representa una región con mucho potencial para la instalación de BCG, ya que es una de las localidades que más recursos invierte en aire acondicionado (Ortega, 2013), debido al intenso calor que se presenta, tiene una temperatura media de 42.1 °C en el mes de julio. Los grados-día, reflejan esta necesidad de enfriamiento, siendo el valor más alto para enfriamiento son 732 grados-día para los meses julio y agosto. (Figura 4-8), una diferencia de más de 200 grados-día a comparación de la Ciudad de Cancún. Sin embargo, su clima extremo, también plantea la necesidad de calefacción durante 4 meses del año (Figura 4-9).

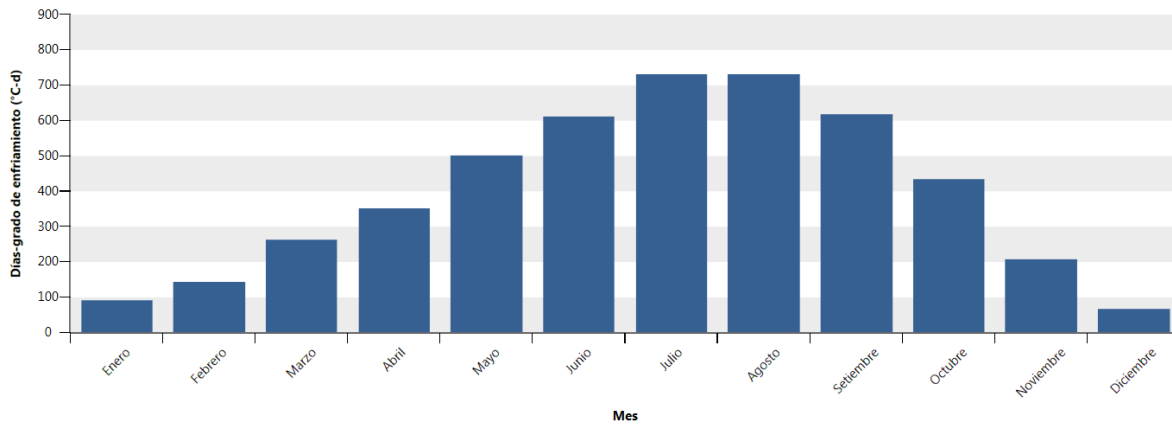


Figura 4-8.-Grados-día de enfriamiento para Mexicali.

Lo anterior plantea que esta región sea muy atractiva para la implementación de BCG, ya se aprovecharían los beneficios de calefacción y enfriamiento que estas ofrecen.

Este caso de estudio corresponde a una institución bancaria; de igual manera se contó con la información referente al consumo de energía eléctrica y la ubicación del recinto, sin embargo, fueron los únicos parámetros con los que se contó para la evaluación del proyecto.

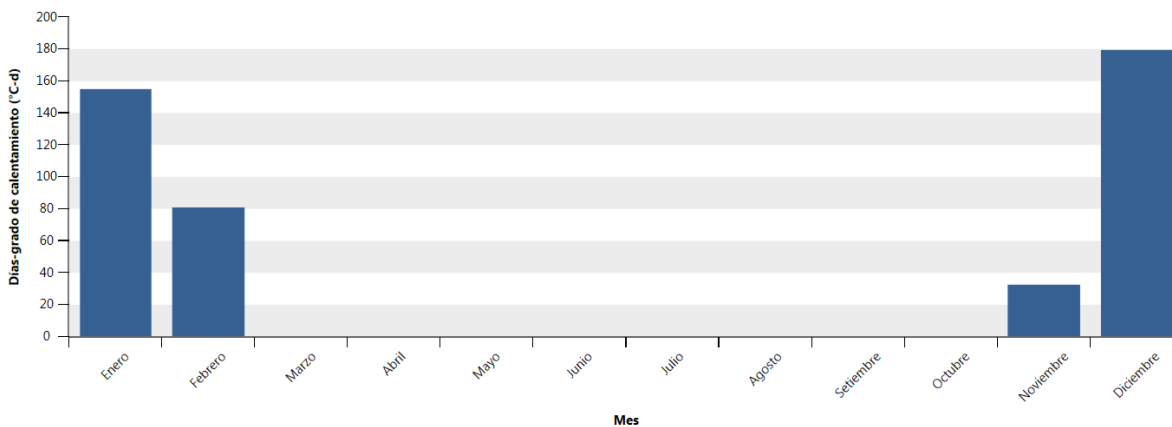


Figura 4-9.- Grados-día de calefacción para Mexicali.

4.11.1 Consumo de energía eléctrica

Los datos de consumo de energía eléctrica fueron graficados y se muestran en la Figura 4-10. La tendencia es muy marcada hacia la necesidad de enfriamiento para los meses más calurosos, y esta corresponde a la gráfica de grados día para

enfriamiento. De hecho, la diferencia que existe entre los dos meses más distantes fue del 81.14 %.

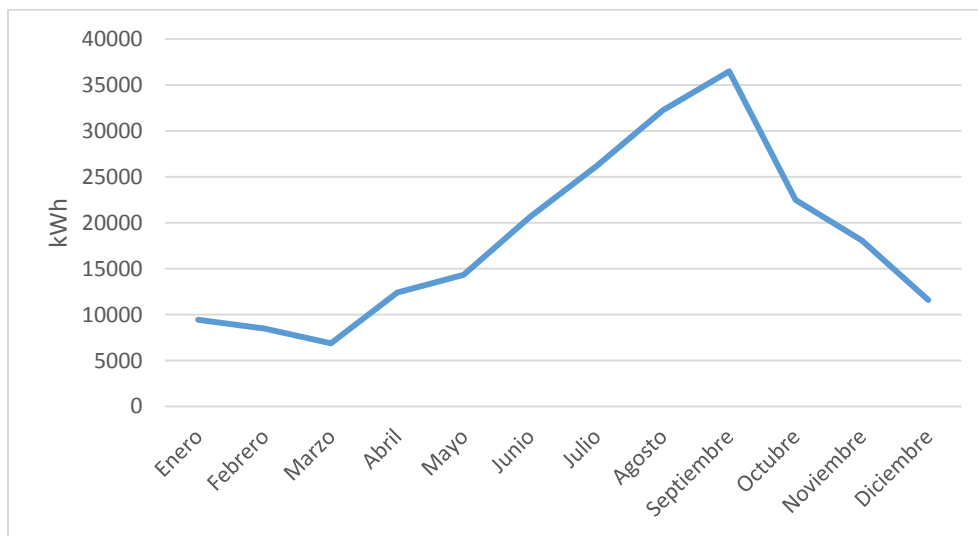


Figura 4-10.- Consumo de energía eléctrica para una institución bancaria en Mexicali.

4.11.2 Cálculo de carga térmica

Para realizar el cálculo de la carga térmica se tienen que tomar en cuenta una gran cantidad de factores, como la latitud de la zona, la temperatura promedio, materiales de construcción, orientación de la edificación, ubicación de las ventanas, entre otras. El cálculo para una recinto en Mexicali, fue realizado por (Ortega, 2013), considerando las condiciones más extremas: la peor orientación posible en la época del año con la mayor radiación solar.

El total de cargas internas y externas calculadas para una vivienda de 100 m² fue de 5699.3619 kcal/h, lo que equivale a 1.88 toneladas de refrigeración.

Con la ubicación del edificio y con la ayuda de Google Earth, se logró calcular el área, siendo esta de 1044 m². De esta manera, se estimó una carga de refrigeración de 20 toneladas.

4.11.3 Inversión inicial

Con la necesidad de tener las dos modalidades para confort térmico, es decir, calefacción y enfriamiento, y cubrir la demanda de 20 toneladas de refrigeración, se

cotizaron 5 bombas de calor convencionales, de 4 toneladas cada una de la marca Rheem. El costo total de estos equipos fue de \$320,151 con una eficiencia de 14.5 SEER y un COP de 3.2.

Para evaluar el costo de una BCG y con la dificultad de cotizar este tipo de equipos, se utilizó una relación lineal con relación a la bomba de calor de 25 toneladas empleada en el caso anterior. Teniendo así, un precio de \$254,238 con una eficiencia de 18.5 EER y un COP de 5.5. Con esto se puede afirmar que este equipo es un 21.6 % más eficiente para refrigeración y un 41.8% más para calentamiento.

El costo del intercambiador y la perforación en el subsuelo se calculó como una configuración vertical, de la misma manera que el apartado 4.8, obteniendo un valor de \$599,433. Si se suma el costo de la bomba de calor más la tubería y perforación, el total de la inversión inicial necesaria para instalar la BCG, es de \$853,671. Dicho de otra manera, se necesitarían \$533,520 más que lo que se requiere invertir para un sistema convencional, lo que significa un incremento de 2.6 veces.

4.11.4 Evaluación del proyecto

Se hicieron las mismas consideraciones que el caso anterior para el costo de la energía eléctrica. El recibo indicaba una tarifa GDMTO, se determinó un precio promedio de 1.87 por kWh, con incremento en el costo de la energía del 3%. El proyecto fue evaluado a 25 años, con un tiempo de operación de diez horas diarias por cinco días a la semana.

Con base en las gráficas de grados-día, se evaluó calefacción para los meses de noviembre a febrero y enfriamiento para el resto del año. Con la BCG los ahorros son mayores para calentamiento (\$3,432 mensuales) debido a que la eficiencia es mayor en este modo, en comparación a enfriamiento, donde se estimaron ahorros mensuales de \$1,336. Calculando de este modo, ahorros anuales de \$24,422.

Con estos parámetros se obtuvo un VPN de -\$295,586, nuevamente negativo, lo que indica que el proyecto debe ser rechazado. La TIR fue de 3.8%, la cual es menor a la tasa de descuento, fijada en 12%.

Los flujos de caja no lograron ser positivos y, por lo tanto, el periodo de recuperación menor a 25 años, no se concretó. (Figura 4-11)

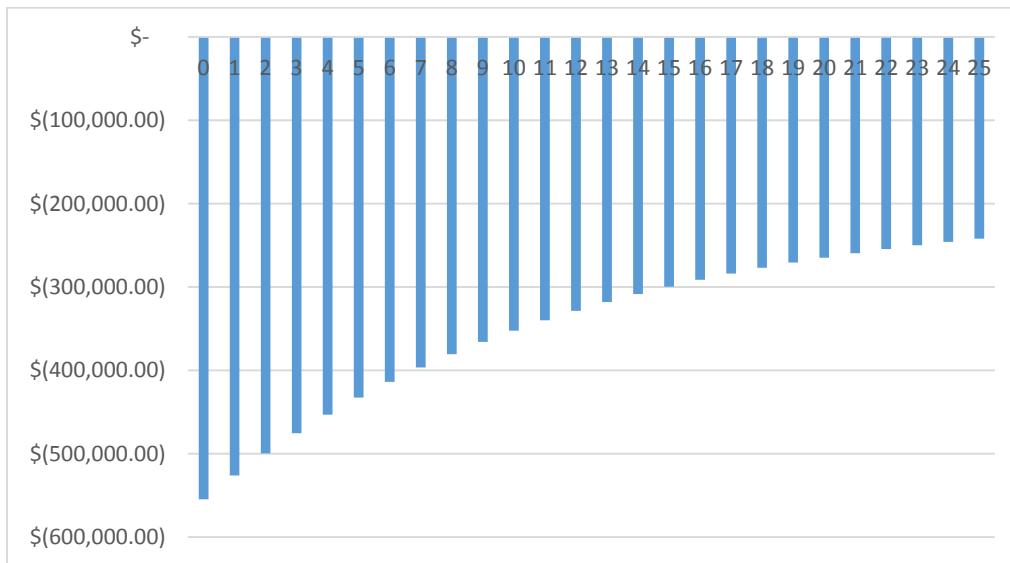


Figura 4-11.- Flujos de caja de la instalación de una BCG en Mexicali.

4.12 Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de identificar las principales variables que afectan la rentabilidad del proyecto y así poder analizar las posibles soluciones para la implementación de BCG, se efectuó un análisis de sensibilidad. Se evaluó el impacto que tiene cada una de las variables manipulables en los parámetros de rentabilidad del proyecto (VPN, TIR y periodo de retorno).

4.12.1 Metodología del tipo de variables a evaluar

Es evidente que la inversión inicial y, por lo tanto, la rentabilidad del proyecto, se verán fuertemente influenciadas por el tipo de instalación del intercambiador de calor en el subsuelo. Por ello, se cuantificará en qué medida afecta al proyecto, teniendo en cuenta que el tipo de instalación dependerá, principalmente, de la disponibilidad de espacio para la obra civil.

Se establecieron los parámetros objetivos como salidas del modelo, en este caso el VPN, y con ayuda del software Top Rank, se evaluaron cómo se comportan las

entradas (inversión inicial, eficiencia, tiempo de operación e incremento en el precio de la energía eléctrica). Los resultados que se obtuvieron para los dos casos de estudio, fueron los siguientes:

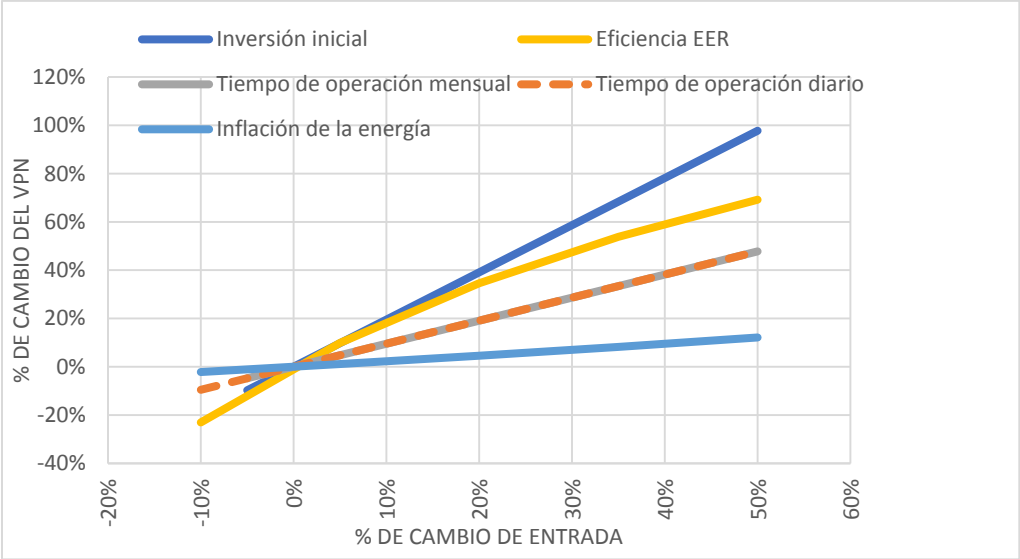


Figura 4-12.- Gráfico de araña del VPN para la instalación en Cancún.

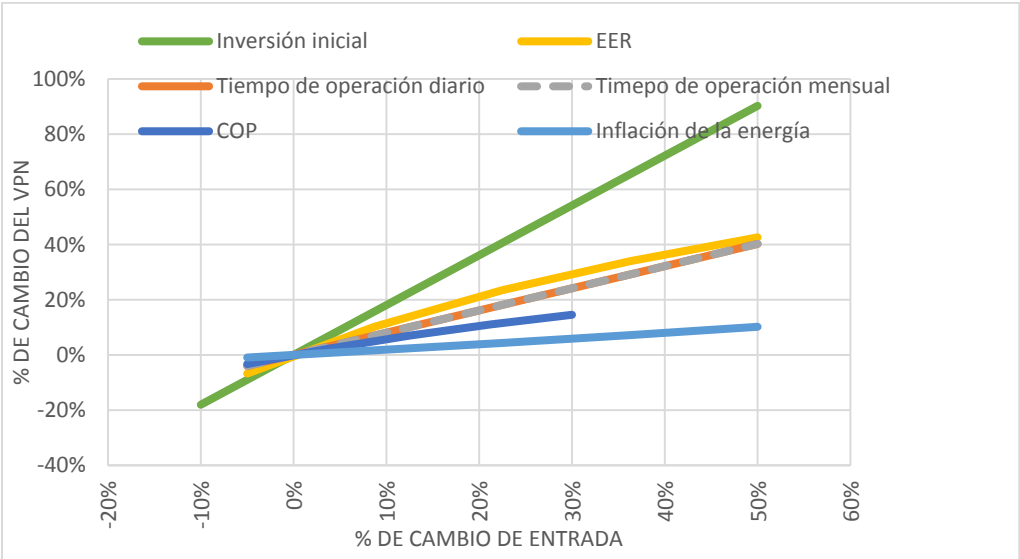


Figura 4-13.- Gráfico de araña del VPN para la instalación en Mexicali.

Las gráficas anteriores cuantifican en qué proporción cambia el VPN, con relación a las entradas establecidas. Se observa que ambas tienen el mismo comportamiento, ya que las rectas que tienen una mayor pendiente, tienen un mayor impacto en el valor del VPN. De esta manera, la variable más influyente en la

rentabilidad del proyecto es la inversión inicial, seguida por la eficiencia y el tiempo de operación.

Por ejemplo, un cambio en el 50% de la inversión inicial, se traduce a un cambio del 100% en el valor del VPN para el caso de Cancún y de un 90% para el caso en Mexicali. El tiempo de operación fue dividido en dos, diario y mensual, debido a las condiciones de operación de los establecimientos del sector comercial; aunque evidentemente estos tienen el mismo comportamiento y por ello se sobreponen.

Con el propósito de visualizar en términos monetarios, como cambia el VPN y enlistar de manera más explícita la priorización y magnitud de las variables de entrada, se muestra la interpretación de los datos anteriores en gráficos tipo tornado. (Figura 4-14 y 4-15)

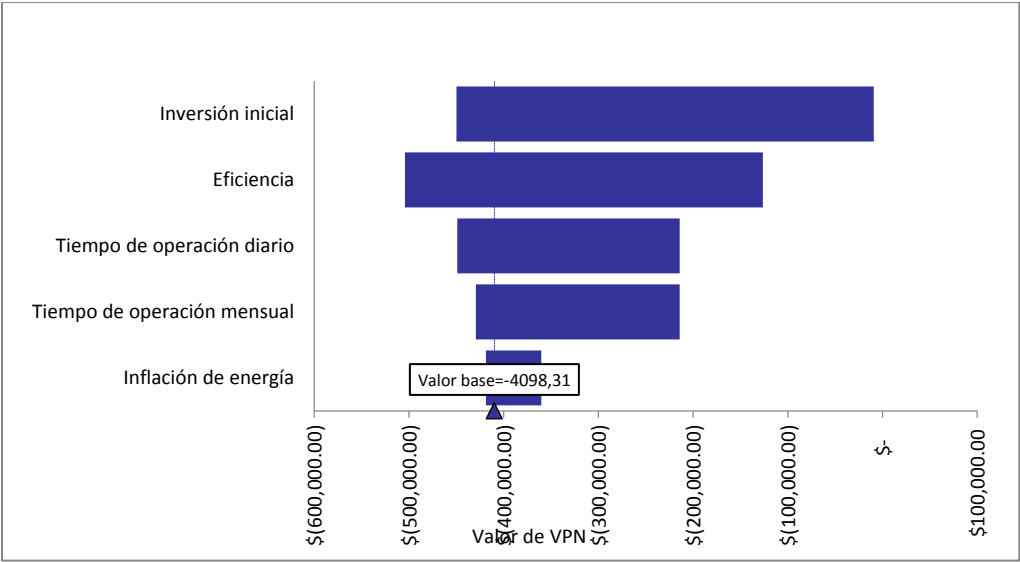


Figura 4-14.- Gráfico tipo tornado del VPN para la instalación en Cancún.

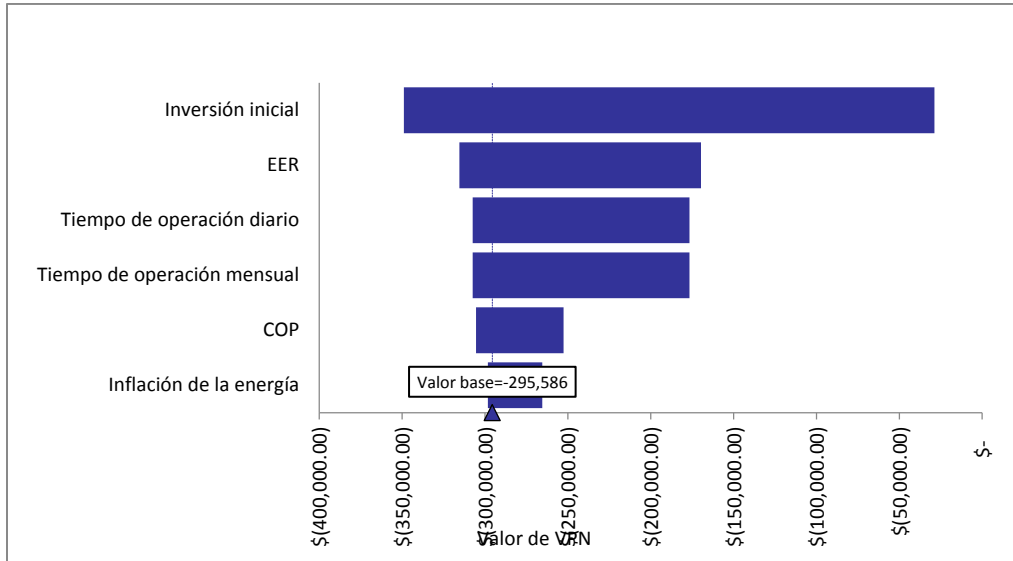


Figura 4-15.-Gráfico tipo tornado del VPN para la instalación en Mexicali.

La magnitud de las barras en los gráficos está relacionada con el impacto que tienen sobre el VPN. Es decir, manipular una sola variable no lograría que el proyecto fuera atractivo para invertir, ya que el valor del VPN es apenas cercano a cero. Un ideal sería ejecutar cada una de las variables en una proporción razonable o para un caso o aplicación en específico.

Por lo anterior mencionado, la inversión inicial es la variable que más impacto tiene sobre la rentabilidad del proyecto, por ello, se tratará de analizar los posibles mecanismos para intentar reducir este valor. Como se comentaba, es evidente que una instalación en un cuerpo de agua, disminuye de manera considerable los costos de instalación del proyecto, aunque esta configuración dependa totalmente de la disponibilidad de un volumen de agua que cumpla con ciertos criterios de limpieza y de regulación para su adecuada explotación. Utilizando los precios para la instalación del intercambiador de calor que fueron deflactados y actualizados, se tendría una disminución de 60% en la inversión inicial, que trae como consecuencia un ajuste en los flujos de caja a lo largo del proyecto, con lo cual, el periodo de retorno sería de 23 años para Cancún y de 15 años para Mexicali. Hacer la instalación en un cuerpo de agua reduce la gran ventaja de instalar una BCG en casi en cualquier parte, por ello se intentará disminuir este valor mediante programas públicos o privados que impulsan el desarrollo de energías renovables,

ofreciendo créditos a bajas tasas de interés. Por ejemplo, el Fideicomiso Para el Ahorro de la Energía Eléctrica (FIDE), ofrece créditos simples con interés ordinario para pequeñas y medianas empresas con más de un año de operación, con tarifa eléctrica comercial, con el objetivo de sustituir equipos eléctricos ineficientes por nuevos de alta eficiencia, en el cual incluyen equipos de aire acondicionado.

La eficiencia del sistema variará ampliamente dependiendo del tipo de tecnología. Los sistemas abiertos tienen, normalmente, mayores eficiencias que los sistemas cerrados, aunque dependerá de muchos otros factores como se mencionó en el capítulo 1, tales como: la diferencia de temperaturas entre la fuente y el sumidero, el adecuado diseño del sistema de distribución de energía, aunque estará ampliamente determinada por el tipo de compresor que usa. Los equipos que tienen eficiencias más bajas utilizan compresores rotatorios o reciprocantes de una velocidad. Eficiencias medias son entregadas por compresores tipo scroll o compresores reciprocantes avanzados. Y finalmente, los equipos que entregan alta eficiencia tienden a usar compresores de dos velocidades y/o motores de velocidad variable en el ventilador. (Canadian GeoExchange Coalition, 2010)

Adquirir una bomba de calor más eficiente tendrá, evidentemente, repercusiones en el costo de la misma. De acuerdo con la información proporcionada por el proveedor de BCG, esta será de aproximadamente 20% más que los equipos cotizados. A pesar de que no se cuenta con información precisa, los valores de eficiencia para ambos modos varían ampliamente. Por ejemplo, la compañía Trane, ofrece equipos con eficiencias de hasta 40 EER y COP arriba de 5. A pesar de ello, los ahorros siguen siendo insuficientes para lograr que el proyecto sea rentable.

Respecto al tiempo de operación, este no podrá ser modificado para las aplicaciones de los casos de estudio analizados, ya que son hábitos de consumo propios y sólo variaran en pequeñas proporciones. Por ello, se tendrá que explorar en ciertos sectores en específico que tengan la necesidad de garantizar la demanda de refrigeración de manera adecuada y eficiente o inclusive operando 24 horas al día, los 7 días de la semana y los 365 días del año. Entre estos sectores, destacan (TRANE, 2014):

- Centros de datos
- Sector sanitario
- Sector hotelero
- Sector farmacéutico
- Alimentación y bebidas.

Con lo anterior analizado se sientan las bases para orientar al proyecto a ciertas condiciones que favorezcan la rentabilidad del mismo. Por ejemplo, si se supone un tipo de instalación que sea más económico y factible como lo es una instalación de tipo horizontal, se considera una eficiencia mayor sin ser la más elevada disponible y, además, se incrementa el tiempo de operación enfocada a un sector como los ya mencionados, el proyecto se beneficia de manera significativa. Con esto, tendremos el caso hipotético en cada una de las dos ciudades, estableciendo una instalación de tipo horizontal para el intercambiador de calor en el subsuelo, una eficiencia en modo enfriamiento de 28 SEER y un COP de 4.4 para el caso de Mexicali, con un tiempo de operación de 15 horas al día, los 30 días al mes. Los resultados obtenidos fueron agrupados en la tabla 4-3.

Tabla 4-3.-Resumen de parámetros económicos para casos hipotéticos.

Parámetro	Cancún	Mexicali
VPN	\$ 564,747	\$ 310,324
TIR (%)	21	19.8
Periodo de retorno (años)	9	9

En resumen, la inversión inicial disminuyó un 8.5%, la eficiencia aumentó 35.7 %, el tiempo de operación diario tuvo un incremento de 25.0 % y el tiempo de operación mensual lo hizo un 33.3%. Teniendo efectos en las salidas del modelo, esto es, efectos favorables en el VPN, de 153.3 % para Cancún y de 105.0 % para Mexicali.

Los flujos de caja y el comportamiento económico de los proyectos se representan en las figuras 4-16 y 4-17. Se observa que, a partir del año 9, los flujos de efectivo comienzan a ser positivos. La instalación en Cancún tiene un ligero beneficio, por encima de Mexicali, esto se debe a que, en la primera ciudad, el precio de la energía

eléctrica es mayor y por lo tanto los ahorros también aumentan. Sin embargo, ambos proyectos, con base a los criterios de rentabilidad, parecen ser muy atractivos.

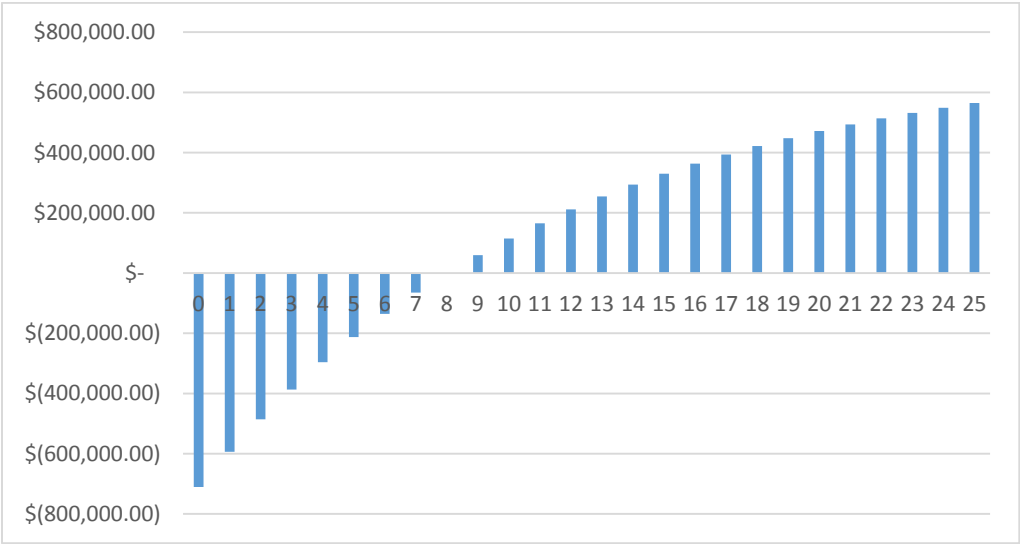


Figura 4-16.- Flujos de caja para caso hipotético en Cancún.

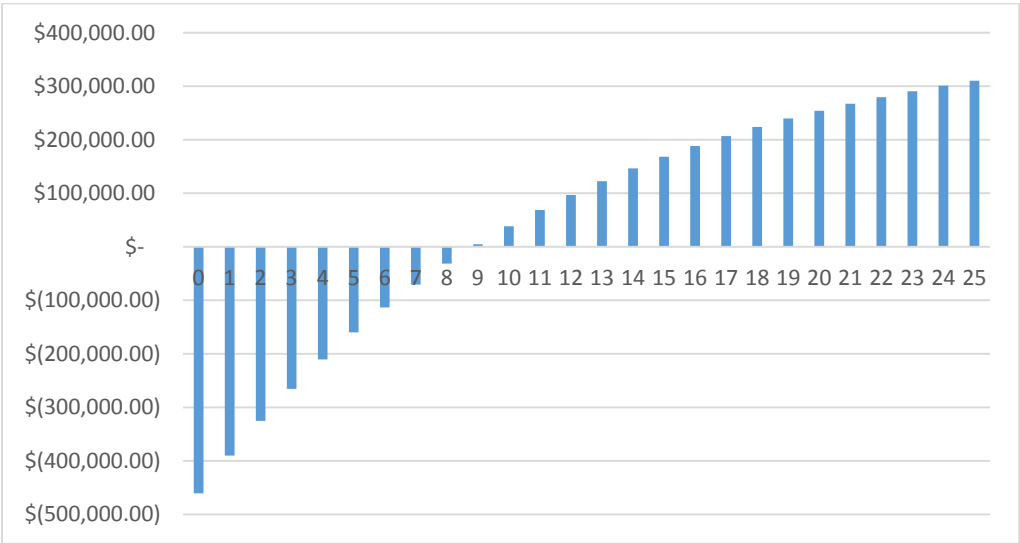


Figura 4-17.- Flujos de caja para caso hipotético en Mexicali.

Es importante mencionar que la aplicación para el sector residencial tendrá un comportamiento similar o incluso más desfavorecido, consecuencia de los subsidios que el Gobierno Federal aplica en la tarifas de energía eléctrica, sin embargo, la

inversión inicial puede verse beneficiada con financiamientos o subsidios que ofrece el FIDE, como el “Programa de Mejoramiento Integral Sustentable”, el cual ofrece financiamientos de hasta el 40%, pagado con los ahorros generados en un periodo de 5 años, siempre y cuando el usuario cumpla con un 5% de ahorro previo.

4.13 Conclusiones

En este capítulo se analizaron dos casos de estudio para la sustitución de equipos de aire acondicionado convencionales por equipos más eficientes, como lo son las BCG para las ciudades de Cancún y Mexicali. Las dos regiones climáticas plantean la necesidad del confort térmico y, en primera instancia, pretendían tener el potencial para la instalación de BCG en edificaciones del sector comercial y de servicios. Se demostró que, en ambas instalaciones, el consumo de energía eléctrica está determinado por el uso del aire acondicionado, ya que, en algunos casos, la diferencia porcentual de los meses de menor temperatura a los más cálidos, representa hasta el 80 % del consumo total de electricidad.

Para plantear la evaluación económica, se cotizaron los elementos que se requieren en una instalación de tipo vertical. Se calcularon los parámetros de rentabilidad del proyecto (VPN, TIR y PR), y con base en las características de los equipos a instalar y condiciones de operación (capacidad de refrigeración, eficiencia, tiempo de operación, etc.), se concluyó que, a pesar de que una BCG es más eficiente, la inversión inicial no alcanza a ser recuperada con los ahorros generados para estos casos. Dicho de otra manera, el periodo de retorno es mayor a los 25 años de vida útil del equipo.

Por ello, se cuantificaron las variables que más impacto tienen sobre la rentabilidad de la instalación de una BCG, en orden de importancia son: la inversión inicial, la eficiencia, el tiempo de operación y por último el aumento en el precio de la energía eléctrica. Dicho así, las instalaciones deberán, primeramente, ser enfocadas a otros sectores que cumplan con ciertos criterios de operación como lo son: sector sanitario, sector hotelero, sector farmacéutico, centros de datos y alimentos y bebidas.

Capítulo 5. Conclusiones generales

- Los usos directos de geotermia, se refiere a diversas aplicaciones diferentes a la generación de energía eléctrica. El aprovechamiento de estos recursos de baja y media entalpía ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años, donde destacan las BCG, la cuales representan más del 50% de la energía térmica consumida, a pesar de ello, en México no se tienen instalaciones.
- Una BCG ofrece muchas ventajas en comparación de un sistema de calefacción convencional, entre las cuales destacan un ahorro considerable de energía que se traduce en grandes ahorros económicos para los usuarios, además de que no existe la quema directa de combustible lo cual contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero.
- México representa un país con potencial para instalar BCG, ya que, en los meses más cálidos de todo el año, el consumo de aire acondicionado aumenta de manera significativa, representando esto, un aumento de más del 70% en el consumo de energía eléctrica. La solución que se le ha dado a dicho problema, es otorgar subsidios a las tarifas de electricidad por parte del Gobierno Federal, lo que representa un gasto de más de 400 millones de pesos al año.
- Las BCG son una tecnología bien conocida a nivel mundial, no obstante, se han enfrentado a varias barreras para su óptimo desarrollo, entre las cuales destacan: alto costo inicial debido a la perforación en el subsuelo, falta de conciencia del mercado y carencia de conocimiento por parte de los usuarios, legisladores y reguladores.
- Nuestro país carece de políticas públicas que orienten, conduzcan o regulen la implementación de BCG. También, es necesario seguir invirtiendo en recursos humanos y económicos para continuar haciendo investigación y desarrollo sobre esta tecnología y, de esta manera, poder difundir los grandes beneficios que se podrían obtener, como actualmente lo hace el CeMIEGeo, cuyo objetivo es fortalecer las capacidades en materia de

energía geotérmica que permitan vencer las barreras tecnológicas que existen.

- En México se podrían instalar BCG bajo ciertas condiciones, dando prioridad a las variables que más impacto tienen para una proyección económica favorable. La inversión inicial ocupa el primer puesto en la rentabilidad del proyecto. La disminución del 50% en esta, tendrá un impacto del 90% en la rentabilidad del mismo, por ello la relevancia que cobra contar con incentivos o subsidios que permitan a las BCG ser más atractivas.
- La eficiencia de la bomba de calor es el segundo parámetro que debe priorizarse si se pretende instalar una BCG, sin embargo, la disponibilidad de proveedores que ofrezcan este tipo de equipos es muy escasa. Dicho así, se deben eliminar barreras tecnológicas o comerciales, tratando de impulsar el mercado interno y así facilitar el despliegue de BCG.

Referencias y Bibliografía

- Arellano V., Iglesias E., G. A. (2008). La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura. *Boletín IIE*, 102–114.
- Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. (2010). *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Bobok, E., & Tóth, A. (2003). Geothermal energy production and its environmental impact in Hungary, 19–25.
- Boyd, T. L., & Lienau, P. J. (1995). GEOTHERMAL HEAT PUMP PERFORMANCE. *Geo-Heat Center*.
- Boyd, T., Sifford, A., & Lund, J. (2015). The United States of America Country Update 2015. *Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*, (April), 19–25.
- Cámara de Diputados México. (2014). Ley de Energía Geotérmica. *Diario Oficial de La Federación (DOF)*, 1–22.
- Canadian GeoExchange Coalition. (2010). *Design and Installation of Residential Ground Source Heat Pump Systems*.
- CANMET Energy Technology Centre. (2005). *Ground-Source Heat Pump Project Analysis. Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases Textbook*.
- Cengel, Y. a., & Boles, M. E. (2011). Termodinámica - Cengel 7th. *Termodinámica*, 1456.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2011). Normas de desempeño energético mínimo para acondicionadores de aire tipo ventana en México, 62.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2016). Estudio de

Caracterización del Uso de Aire Acondicionado en Viviendas de Interés Social en México, 80. Consultado en marzo de 2018 en <http://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/estudio-caracterizacion-del-uso-de-aire-acondicionado-en-vivienda-de-interes-social-en-mexico?idiom=es>

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2017). Costos y Beneficios de la Norma Oficial Mexicana para Envoltente de Edificaciones Residenciales (NOM-020-ENER), 1–24.

CossBu, R. (1995). *Análisis y evaluación de proyectos de inversión*. (LIMUSA, Ed.).

Council World Energy. (2016). World Energy Resources: Geothermal.

De Buen R., O. (2016). La importancia del consumo de energía en inmuebles no residenciales en México y su evidente subestimación en las estadísticas nacionales, 1–10.

Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2006). *Geothermal Energy: Utilization and Technology*.

García-gutiérrez, A. (2017). Geothermal Direct Use and Heat Pump Applications in Mexico Installed Capacity.

García, A., & Martínez, I. (2012). Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico. *Geotermia*, 25(2), 58–68.

Geng, Y., Sarkis, J., Wang, X., Zhao, H., & Zhong, Y. (2013). Regional application of ground source heat pump in China: A case of Shenyang. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18(72), 95–102. Consultado en abril del 2018 en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.015>

Goetzler, W., Guernsey, M., & Kar, R. (2012). Research and Development Roadmap: Geothermal (Ground Source) Heat Pumps, (October), 41.

Goetzler, W., Zogg, R., Lisle, H., Javier Burgos, & Navigant Consulting, I. (2009). Ground - Source Heat Pumps : Overview of Market Status , Barriers to Adoption , and Options for Overcoming Barriers Final Report Submitted to : Prepared By : Heather Lisle. *U.S. Department of Energy Energy*.

- Gutiérrez-Negrín, L., Maya-González, R., & Quijano-León, J. (2015). Present situation and perspectives of geothermal in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015*, (April), 1–10. Consultado en abril del 2017 en <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01002.pdf>
- Heath, J. (2012). *Lo que indican los indicadores*. INEGI. Retrieved from
- Hughes, P. J. (2008). *Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps : Market Status , Barriers to Adoption , and Actions to Overcome Barriers. Program.*
- Kon, H., & Ao, K. S. (2015). *Transactions on Engineering Technologies*. Consultado en marzo del 2018 en <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9804-4>
- Lawrence Berkeley National Laboratory / U.C. Berkeley / UNAM-IER. (2018). *MEXICO SPACE COOLING ELECTRICITY IMPACTS AND MITIGATION STRATEGIES Analysis Supporting the Summit on Space Cooling California , Mexico City.*
- Liu, X., Lu, S., Hughes, P., & Cai, Z. (2015). A comparative study of the status of GSHP applications in the United States and China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 558–570. Consultado en noviembre de 2017 en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.035>
- Lu, S., Cai, Z., & Chen, J. (2015). A Comparative Study on the Status of GSHP Applications in US and China 2 . *Landscape of GSHP Applications*, 48, 558–570.
- Luna, V., & García, A. (2016). Introducción a las bombas de calor geotérmicas. In *XXIII Congreso Anual*. Morelia, Mich: Asociación Geotérmica Mexicana.
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66–93. Consultado en octubre de 2017 en <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Morales-Valdés, P., Flores-Tlacuahuac, A., & Zavala, V. M. (2014). Analyzing the effects of comfort relaxation on energy demand flexibility of buildings: A

- multiobjective optimization approach. *Energy and Buildings*, 85, 416–426. Consultado en mayo de 2018 en <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.040>
- Naicker, S. S. (2015). Performance Analysis of a Ground Source Heat Pump System, (December 2015).
- Ortega, N. (2013). *Factibilidad del aprovechamiento de Bombas de Calor Geotérmicas para localidades de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Quijano León, J. L. (2007). Manual de Geotermia, 1–109.
- Rafferty, K. (2008). An Information Survival Kit For The Prospective Geothermal Heat Pump Owner. *Heatspring Learning Institute*, (March).
- Rosas-Flores, J. A. (2017). Elements for the development of public policies in the residential sector of Mexico based in the Energy Reform and the Energy Transition law. *Energy Policy*, 104(September 2016), 253–264. Consultado en diciembre de 2017 en <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.015>
- Rowe, L., Paredes Rubio, H. R., Reveles González, B., Chidiak, M., & Stanley, L. (2009). Análisis de mercado para la aplicación de tecnología de energías renovables y eficiencia energética en hoteles en México, y mercado potencial para el sector financiero, 133. Retrieved from <http://energy-base.org/wp-content/uploads/2013/11/REEEP-UNEP-CONUEE-Market-Analysis-of-Renewable-Energy-and-Energy-Efficiency-in-Hotels-in-Mexico-Spanish.pdf>
- Rubio-Maya, C., Ambríz Díaz, V. M., Pastor Martínez, E., & Belman-Flores, J. M. (2015). Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 689–716. Consultado en diciembre de 2017 en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.162>
- Santoyo-Gutiérrez, E., & Torres-Alvarado, I. S. (2010). Escenario Futuro De Explotación De La Energía Geotérmica: Hacia Un Desarrollo Sustentable. *Digital Universitaria*, 11, 26.
- Santoyo, É., & Barragán-Reyes, R. (2010). Energía Geotérmica, 40–51.

- Secretaría de Energía. (2017). *Prospectiva del Sector Eléctrico 2017-2031*, 34.
- Secretaría de Energía, (SENER), & Secretaría de Educación (SEP), C. N. de C. y T. (CONACYT). (2014). Programa estratégico de formación de recursos humanos en materia energética 2014, 1–48. Consultado en marzo de 2018 en www.gob.mx/sener
- Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101, 341–348. Consultado en enero de 2018 en <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>
- Sener. (2018). Balance nacional de energía 2016, 184.
- Simon J. Rees. (2016). *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*.
- Toth, A., & Bobok, E. (2017). What Is Geothermal Energy? *Flow and Heat Transfer in Geothermal Systems*, 1–19. Consultado en noviembre de 2017 en <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800277-3.00001-3>
- TRANE. (2014). *Sistemas y Servicios de Trane*.
- Yang, W., Zhou, J., Xu, W., & Zhang, G. (2010). Current status of ground-source heat pumps in China. *Energy Policy*, 38(1), 323–332. Consultado en febrero de 2018 en <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.021>
- Zheng, K., Mo, Y., & Chen, L. (2015). Twenty Years of Geothermal Heat Pumps in China. *World Geothermal Congress 2015*, (April), 2–5.
- Zhu, J., Hu, K., Lu, X., Huang, X., Liu, K., & Wu, X. (2015). A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects. *Energy*, 93, 466–483. Consultado en febrero de 2018 en <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.098>