



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de la implementación de un sistema de captación de recursos geotérmicos para su aplicación en zonas cercanas a ventilas hidrotermales en la península de Baja California

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Saldivar Flores Luis Armando

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Héctor Miguel Aviña Jiménez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de obtener una educación de alto nivel.

A mis padres José Luis Saldivar Méndez y Ramona Flores Licona quienes con gran esfuerzo y sacrificio me permitieron cumplir mis sueños, enseñándome el valor del esfuerzo, la honestidad y la educación.

No solo me dieron la oportunidad de recibir una educación profesional sino también me dieron la oportunidad de ser feliz el resto de vida y por ello estaré eternamente agradecido.

A mis abuelos paternos, Rosa Linda Méndez Cruz y Luis Saldivar Toledo, quienes me apoyaron en todo momento siendo unos segundos padres. A mi abuela materna, Fidelia Licona López, quien, aunque no pudo ver este logro fue un ejemplo de superación y valentía y me enseñó el valor de la humildad y la perseverancia.

A mis hermanos, Juan Daniel y José Luis, quienes compartieron conmigo gratos momentos en especial a Daniel quien ha sido un ejemplo a seguir y un gran hermano apoyándome en todo momento.

A mis tíos Saúl Saldivar y Karina Gómez quienes siempre me han apoyado para cumplir mis metas.

A mi amigo Yoshua y sus padres Nadya Zamorán y Antonio Martínez quienes me apoyaron para iniciar mi trayectoria en la Universidad Nacional Autónoma de México.

A mis amigos quienes estuvieron conmigo en las diferentes etapas de mi camino Ricardo y David, con quienes compartí una gran infancia. A

Víctor, Lucio, Gerardo, Samantha y Vanessa mis amigos desde la secundaria. A Luis Gerardo mi amigo desde la preparatoria, a mi amigo Ernesto y a Derihan e Ivan mis compañeros de carrera.

Y por último a toda mi familia y personas que me han apoyado en alguna etapa de mi vida, brindándome conocimiento y experiencias que me ayudaron a terminar este logro.

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	I
FIGURAS	VI
TABLAS	X
NOMENCLATURA	XI
ABREVIATURAS	XII
RESUMEN	1
OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN	6
CAPÍTULO 1. ENERGÍA GEOTÉRMICA Y SUS USOS DIRECTOS.....	7
1.1. LA ENERGÍA GEOTÉRMICA	7
1.2. USOS DIRECTOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	11
1.3. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN MÉXICO.....	14
CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO	17
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE LAS VENTILAS HIDROTERMALES.....	19
2.1. VENTILAS HIDROTERMALES: FORMACIÓN Y DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA.....	19
2.2. DESCUBRIMIENTO DE UNA NUEVA FUENTE DE ENERGÍA.	25
2.3. VENTILAS HIDROTERMALES COMO FUENTE DE VIDA.	28
2.4. INVESTIGACIONES A NIVEL MUNDIAL	30
2.4.1. <i>China</i>	30
2.4.4. <i>Italia</i>	35
2.4.5. <i>India</i>	37
2.4.6. <i>Indonesia</i>	39
2.4.7. <i>Estados Unidos</i>	40
2.4.8. <i>Japón</i>	46
2.4.9. <i>México</i>	47
CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO	50

**CAPÍTULO 3. ESTRUCTURAS TERMO-ACTIVAS COMO DISPOSITIVO DE
CAPTACIÓN DEL RECURSO GEOTÉRMICO SUBMARINO53**

3.1. PILOTES GEOTÉRMICOS	54
3.2. USO DE PILOTES GEOTÉRMICOS EN BOMBAS DE CALOR	54
3.3. CONSTRUCCIÓN DE LOS PILOTES GEOTÉRMICOS	57
3.4. TIPOS DE CONFIGURACIÓN DE LA TUBERÍA EN LOS PILOTES GEOTÉRMICOS	61
3.5. MEJORAS EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR DE PILOTES GEOTÉRMICOS	64
3.5.1. <i>Optimización geométrica</i>	64
3.5.2. <i>Utilización de nano-fluidos como fluido de trabajo</i>	66
3.5.3. <i>Mejoras en los materiales de construcción de la tubería</i>	69
3.5.4. <i>Mejoras en la mezcla de concreto</i>	70
3.6. APLICACIÓN: PROPUESTA DEL USO DE PILOTES GEOTÉRMICOS EN ZONAS CERCANAS A LAS VENTILAS HIDROTERMALES	72
CONCLUSIÓN DEL CAPITULO	74

**CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL PILOTE GEOTÉRMICO PARA SU APLICACIÓN EN
ZONAS ALEDAÑAS A LAS VENTILAS HIDROTERMALES.....75**

4.1. ZONA DE ESTUDIO: PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA Y NAYARIT.....	75
4.1.1. CUENCA WAGNER.....	76
4.1.2. LOS CABOS	77
4.1.3. BAHÍA CONCEPCIÓN.....	79
4.1.4. PUNTA MITA	81
4.2. ELECCIÓN DE LA ZONA DE APLICACIÓN	83
4.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO	84
4.3.1. <i>Análisis geohidráulico</i>	86
4.3.2. <i>Análisis de transferencia de calor del suelo circundante al pozo</i>	92
4.3.3. <i>Materiales de fabricación</i>	99
4.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	101
4.4.1. <i>Variación del flujo másico</i>	102
4.4.2. <i>Variación de los parámetros de diseño del relleno</i>	105

4.4.3. Intercambiadores de calor en serie.....	106
CONCLUSIÓN DEL CAPITULO	107
CAPÍTULO 5. PROPUESTA DE APLICACIÓN.....	108
5.1. PROYECTO: ACUACULTURA	109
5.2. PRODUCCIÓN DE TILAPIA.....	111
5.3. BOMBEO.....	113
5.4. ANÁLISIS ECONÓMICO	115
5.4.1. Plan de operaciones.....	115
5.4.2. CAPEX	117
5.4.3. Proyección de ingresos	119
5.4.4. OPEX.....	121
5.4.5. Flujo de caja libre	123
5.4.6. Indicadores financieros y análisis de rentabilidad.....	125
5.5. ANÁLISIS DE RIESGO.....	126
5.5.1. Variables del modelo.....	126
5.5.2. Distribución de valores posibles de TIR	132
5.5.3. Distribución de los valores posibles de VPN.....	134
5.5.4. Distribución de los posibles valores de Pay Back	137
5.5.5. Distribución de los posibles valores del ROI.....	138
5.6. CONCLUSIÓN DEL CAPITULO	139
CONCLUSIONES	140
REFERENCIAS.....	143

Figuras

FIG. 1 " ENERGÍA GEOTÉRMICA "	8
FIG. 2 " CLASIFICACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS "	9
FIG. 3 " CAPACIDAD INSTALADA DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DEL AÑO 2010 AL AÑO 2018 "	11
FIG. 4 " ENERGÍA ELÉCTRICA GEOTÉRMICA GENERADA DEL AÑO 2010 AL AÑO 2016 "	11
FIG. 5 " USOS DIRECTOS DE LA GEOTERMIA "	12
FIG. 6 " CAPACIDAD INSTALADA DE USOS DIRECTOS EN EL MUNDO (LADO IZQUIERDO) Y ENERGÍA TÉRMICA UTILIZADA (LADO DERECHO) "	13
FIG. 7 " USOS EN CASCADA "	14
FIG. 8 " METAS DE CRECIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE FUENTES DE ENERGÍAS LIMPIAS "	14
FIG. 9 " CAPACIDAD INSTALADA A NIVEL MUNDIAL "	16
FIG. 10 " SISTEMA HIDROTERMAL Y CELDA CONVECTIVA "	20
FIG. 11 " CICLO DE UNA VENTILA HIDROTERMAL "	21
FIG. 12 " SISTEMA DORSAL MEDIO OCEÁNICO "	23
FIG. 13 " CUENCAS TRAS-ARCO "	24
FIG. 14 " DISTRIBUCIÓN DE LOS SISTEMAS HIDROTERMALES SUBMARINOS ALREDEDOR DEL MUNDO "	25
FIG. 15 " DESCUBRIMIENTO DE LAS VENTILAS HIDROTERMALES "	27
FIG. 16 " BIODIVERSIDAD EN LAS VENTILAS HIDROTERMALES "	29
FIG. 17 " THERMOELECTRIC CAP "	31
FIG. 18 " EFECTO SEEBECK "	31
FIG. 19 " COLOCACIÓN DEL DISPOSITIVO SOBRE UNA VENTILA HIDROTERMAL "	32
FIG. 20 " COMPONENTES DEL DISPOSITIVO TERMOELECTRIC CONVERTER "	33
FIG. 21 " DISPOSITIVO COLOCADO EN LA CRESTA INDIA "	34
FIG. 22 " TURBINA DE SALIDA RADIAL "	37
FIG. 23 " CICLO DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO BASADO EN EL EFECTO SEEBECK "	39
FIG. 24 " CICLO ORGÁNICO RANKINE SUMERGIBLE "	40

FIG. 25 " ESTRUCTURA SISTEMA MARSHALL "	43
FIG. 26 " SISTEMA DE MÚLTIPLE OBTENCIÓN DE FLUJO "	44
FIG. 27 " MINERÍA MARINA "	44
FIG. 28 " SEGUNDA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA MARSHALL "	45
FIG. 29 " CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO BASADO EN LA OXIDO REDUCCIÓN "	47
FIG. 30 " PROYECTO IMPULSA IV "	48
FIG. 31 " INVESTIGACIONES A NIVEL MUNDIAL "	52
FIG. 32 " ELEMENTOS BÁSICOS DE UNA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA "	55
FIG. 33 " MECANISMOS CONDUCTIVOS Y CONVECTIVOS EN UN PILOTE GEOTÉRMICO "	56
FIG. 34 " PILA DE CIMENTACIÓN "	57
FIG. 35 " CONFIGURACIÓN DE LA TUBERÍA DE INTERCAMBIO DE CALOR TIPO U SIMPLE, DOBLE U, TRIPLE U Y TIPO W "	58
FIG. 36 " CONFIGURACIÓN DE LA TUBERÍA DE INTERCAMBIO DE CALOR TIPO ESPIRAL "	58
FIG. 37 " CONFIGURACIÓN DE LA TUBERÍA DE INTERCAMBIO DE CALOR TIPO COAXIAL "	59
FIG. 38 " PERFORADORA ROTATORIA "	59
FIG. 39 " INSTALACIÓN DEL CIRCUITO PRIMARIO EN LA PARED INTERNA DEL PILOTE "	60
FIG. 40 " PERFORADORA DE HÉLICE CONTINUA "	60
FIG. 41 " INSTALACIÓN DEL CIRCUITO PRIMARIO EN EL CENTRO DE LA PILA DE CIMENTACIÓN "	61
FIG. 42 " COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO DE LA CONFIGURACIÓN TIPO U SIMPLE, DOBLE U Y MULTI- TUBO "	62
FIG. 43 " COMPARACIÓN DE FUNCIONAMIENTO CONTINUO E INTERMITENTE DE LA TUBERÍA TIPO TRIPLE U Y LA TIPO W "	63
FIG. 44 " INCREMENTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA TUBERÍA TIPO U SIMPLE "	65
FIG. 45 " DISMINUCIÓN DE LA ENERGÍA UTILIZADA PARA REFRIGERACIÓN Y CALEFACCIÓN EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD "	65
FIG. 46 " RELACIÓN DE LA FRACCIÓN DE VOLUMEN CON EL INCREMENTO EN LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "	68
FIG. 47 " VOLUMEN DE GRAFITO CONTRA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA "	70
FIG. 48 " ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA "	73
FIG. 49 " ZONAS DE ESTUDIO: CUENCA WAGNER; BAHÍA CONCEPCIÓN Y LOS CABOS "	76

FIG. 50 " MAPA LITOLÓGICO DE LA ZONA DE LOS CABOS "	78
FIG. 51 " COMPOSICIÓN GEOLÓGICA DE BAHÍA CONCEPCIÓN "	80
FIG. 52 "LOCALIZACIÓN DE PUNTA MITA "	81
FIG. 53 " MAPA GEOLÓGICO DE PUNTA MITA, MÉXICO "	82
FIG. 54 "DIAGRAMA DE INSTALACIÓN "	85
FIG. 55 " LEY DE DARCY "	87
FIG. 56 "RESISTENCIAS TÉRMICAS EN CIRCUITO DELTA "	95
FIG. 57 " RADIO EQUIVALENTE "	97
FIG. 58 " TIPOS DE ESPACIAMIENTO EN LA TUBERÍA "	102
FIG. 59" VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE SALIDA Y CALOR EN LA TUBERÍA DE 1 [IN] (LADO IZQUIERDO) Y 4 [IN] (LADO DERECHO) CON AGUA COMO FLUIDO DE TRABAJO "	103
FIG. 60 " VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE SALIDA Y CALOR EN LA TUBERÍA DE 1 [IN] (LADO IZQUIERDO) Y 4 [IN] (LADO DERECHO) CON R134A COMO FLUIDO DE TRABAJO "	104
FIG. 61 " VARIACIÓN DEL RADIO DEL RELLENO "	105
FIG. 62 "VARIACIÓN DEL ESPACIAMIENTO ENTRE TUBERÍAS "	106
FIG. 63 " COMPARACIÓN DE LA TEMPERATURA DE SALIDA UTILIZANDO AGUA Y REFRIGERANTE R134A "	107
FIG. 64 " DIAGRAMA DE PROCESO "	109
FIG. 65 " DISTRIBUCIÓN TRIANGULAR DEL COSTO DEL ALIMENTO DE SIEMBRA "	127
FIG. 66 " DISTRIBUCIÓN TRIANGULAR DEL COSTO DEL ALIMENTO DE LEVANTE "	127
FIG. 67 " DISTRIBUCIÓN TRIANGULAR DEL COSTO DEL ALIMENTO DE ENGORDA "	128
FIG. 68 " DISTRIBUCIÓN NORMAL PARA EL PORCENTAJE DE SOBREVIVENCIA SIEMBRA-LEVANTE "	128
FIG. 69" DISTRIBUCIÓN NORMAL PARA EL PORCENTAJE DE SOBREVIVENCIA LEVANTE-ENGORDA "	129
FIG. 70 " PRECIO DE VENTA EN EL MES DE DICIEMBRE "	129
FIG. 71 " PRECIO DE VENTA EN EL MES DE MARZO "	130
FIG. 72 " PRECIO DE VENTA EN EL MES DE JUNIO "	130
FIG. 73 " PRECIO DE VENTA EN EL MES DE SEPTIEMBRE "	131
FIG. 74 " PRECIO PROMEDIO DE LA TILAPIA COSECHADA "	131
FIG. 75 " DISTRIBUCIÓN DE VALORES POSIBLES DEL TIR "	132
FIG. 76 " POSIBLE PORCENTAJE POR ENCIMA DEL WACC "	133

FIG. 77 “ SENSIBILIDAD DEL TIR ANTE LAS VARIABLES DE ENTRADA ”	134
FIG. 78 “ DISTRIBUCIÓN DE LOS POSIBLES VALORES DEL VPN (AUTOR) ”	135
FIG. 79 “ SENSIBILIDAD DEL VPN ANTE LAS VARIABLES DE ENTRADA ”	136
FIG. 80 “ GRAFICA DE ARAÑA DE LA SENSIBILIDAD DEL VPN ANTES LAS VARIABLES DE ENTRADA ”	137
FIG. 81 “ DISTRIBUCIÓN DE LOS POSIBLES VALORES DE PAY BACK ”	138
FIG. 82 “ DISTRIBUCIÓN DE POSIBLES VALORES DEL ROI ”	139

Tablas

TABLA 1 " POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON ENERGÍAS LIMPIAS EN MÉXICO "	15
TABLA 2 "PROYECTO DE USOS EN CASCADA EN EL PAÍS "	17
TABLA 3 " CARACTERÍSTICAS DE LAS POSIBLES ZONAS DE APLICACIÓN "	83
TABLA 4 " MATRIZ DE SELECCIÓN "	84
TABLA 5 "PROPIEDADES FÍSICAS PROMEDIO DE LA ZONA "	91
TABLA 6 " PROPIEDADES FÍSICAS DEL FLUIDO DE TRABAJO "	91
TABLA 7 " VELOCIDAD LINEAL MEDIA DEL FLUIDO GEOTÉRMICO EN PUNATA MITA "	92
TABLA 8 " RESULTADOS CON UN FLUJO MÁSCO DE 1 [KG/S] "	99
TABLA 9 "DIMENSIONES ESTÁNDARES DE TUBERÍA GEOPERFORMX-V2 "	100
TABLA 10 " TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN POWERCRETE "	101
TABLA 11 " PROPIEDADES CONSTANTES EN EL DISEÑO "	101
TABLA 12 " PROPIEDADES DEL FLUIDO DE TRABAJO AGUA "	102
TABLA 13 " PROPIEDADES DEL FLUIDO DE TRABAJO REFRIGERANTE "	104
TABLA 14 " PORCENTAJE DE ALIMENTO POR ETAPA "	110
TABLA 15 " DENSIDAD DE CULTIVO POR METRO CUADRADO "	111
TABLA 16 " TEMPERATURAS DE PUNTA MITA, NAYARIT "	111
TABLA 17 " FLUJO MÁSCO PROMEDIO Y FLUJO MÁSCO MÁXIMO "	112
TABLA 18 " POTENCIA DE LA BOMBA "	114
TABLA 19 " PLAN DE PRODUCCIÓN "	116
TABLA 20 " CAPEX "	118
TABLA 21 "PROYECCIÓN DE INGRESOS PARA EL PRIMER AÑO DE PRODUCCIÓN "	120
TABLA 22 " INGRESOS PARA EL HORIZONTE DE EVALUACIÓN "	120
TABLA 23 " DESGLOSÉ DE LOS COSTOS Y GASTOS EN EL PRIMER AÑO DE OPERACIÓN "	122
TABLA 24 " OPEX "	122
TABLA 25 " FLUJO DE CAJA LIBRE "	124
TABLA 26 " INDICADORES FINANCIEROS "	126

Nomenclatura

[hrs] – horas
[s] – Segundos
 $\left[\frac{cm}{día}\right]$ – Centímetros por día
 $\left[\frac{m}{s}\right]$ – metros por segundo
 $\left[\frac{m^2}{s}\right]$ – metros cuadrados por segundo
[mm] – milímetros
[m] – metros
[m²] – metros cuadrados
[km] – kilometros
[km²] – kilometros cuadrados
[mbnm] – metros bajo el nivel del mar
[Pa] – Pascales
[MPa] – Mega Pascales
[GPa] – Giga Pascales
[mV] – mili Volt
[V] – Volts
[mA] – mili Ampere
[A] – Ampere
[We] – Watts eléctricos
[kWe] – Kilo Watts eléctricos
[MWe] – Mega Watts eléctricos
[GWe] – Giga Watts eléctricos
[kW_h] – Kilo Watts eléctricos hora
[GWh] – Giga Watts eléctricos hora
 $\left[\frac{GWh}{año}\right]$ – Giga Watts eléctricos hora por año
[W_T] – Watts térmicos
[kW_T] – Kilo Whatts térmicos
[J] – Joule
[kJ] – kilo Joule
[EJ] – Exa Joule
[°C] – Grados Celcius
[K]. – Kelvin
[Gton] – Giga toneladas
[BTU] – British Thermal unit

Abreviaturas

ORC – Organic Rankine Cycle (Ciclo Rankine Orgánico)
IRENA - International Renewable Energy Agency (Agencia Internacional de las Energías Renovables)
IEA – International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)
SEN - Sistema Eléctrico Nacional
SENER - Secretaria de Energía
INEL - Inventario Nacional de Energías Limpias
AZEL - Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias
MAPC - Maritime Applied Physics Corporation (Corporación de física aplicada marítima)
FCIHS – Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea
FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
SNIIM – Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados
CFE – Comisión Federal de Electricidad
ISR- Impuesto Sobre la Renta
TIR- Tasa Interna de Retorno
VPN – Valor Presente Neto
ROI- Retorno Sobre la Inversión
CMIC – Cámara Nacional de la Industria de la Construcción
WHOI - Woods Hole Oceanographic institution (Institución Oceanográfica Woods Hole)
Segob – Secretaria de gobernación
SSN - Servicio Sismológico Nacional
Inapesca - Instituto Nacional de Pesca
CeMIEGeo - Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica
CFE – Comisión Federal de Electricidad
INEEL – Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
iiDEA – Desalación y Energías Alternas instituto de Ingeniería
WACC – Weighted Average Cost of Capital (Costo medio ponderado de capital)

Resumen

En el presente trabajo se analizará la viabilidad técnica y económica de la construcción de un sistema de captación de recursos geotérmicos submarinos. Estos recursos son emanados por manifestaciones geotérmicas submarinas conocidas como ventilas hidrotermales las cuales se encuentran en zonas cercanas a los dorsales oceánicos y cuencas tras-arco ubicadas alrededor del mundo producto del movimiento de las placas tectónicas y la propia dinámica térmica del planeta.

Las ventilas hidrotermales son fuentes de recursos convectivos que emanan de manera constante una mezcla de agua a altas temperaturas, gases y minerales que podrían ser aprovechados para la producción de energía eléctrica, sistemas de monitoreo marino o aplicaciones de usos directos. Estas ventilas albergan una gran diversidad de micro organismos los cuales son importantes en la cadena trófica del ecosistema presente en sus alrededores. Diversos países alrededor del mundo han puesto su mira en esa nueva fuente de energía diseñando dispositivos capaces de aprovechar el calor emanado por la ventila teniendo como objetivo principal el lograr producir energía eléctrica, algunos de los desarrollos a nivel mundial son: Thermoelectric cap, Thermoelectric converter, Proyecto Marsili, dispositivos basados en el efecto Seebeck, Ciclo Rankine Orgánico sumergible, Proyecto Mercury, Create inc., Marshall Hydrothermal, dispositivos basados en el efecto de óxido reducción y el proyecto Impulsa IV. Este último fue uno de los referentes a nivel mundial estimando una generación de 4 [MWe] mediante el uso de un Ciclo Rankine Orgánico (ORC) el cual se mantendría sumergido y colocado en una ventila de 1 [m] de largo por 10 [cm] de ancho con una velocidad promedio de 1 [m/s].

Los desarrollos antes mencionados son propuestas innovadoras que en el futuro podrían brindar una opción viable para la captación del recurso geotérmico, sin embargo, en la actualidad algunas de las desventajas que presentan son: difícil colocación en el ambiente marino, alta captación de incrustaciones marinas, materiales de construcción altamente costosos, dispositivos altamente invasivos en el ecosistema de la ventila. Pese a que la mayoría de las propuestas aún es teórica los dispositivos experimentales han reportado que debido a la alta concentración de la fauna microbiana esta forma una película aislante en las paredes del dispositivo lo que minimiza el efecto

de transferencia, también se menciona que debido a la batimetría del lugar la colocación del dispositivo es complicada y no puede mantenerse fijo durante tiempos prologados, por último, la mayoría de los diseños teóricos y experimentales hablan sobre la extracción directa del recurso implicando la destrucción de la fauna que vive gracias a las emanaciones de la ventila ya que requieren captar el flujo de agua caliente afectando así a la cadena trófica del lugar.

En este trabajo se propone el uso de estructuras termo-activas, conocidos como pilotes geotérmicos como una nueva propuesta de sistema de captación del recurso aprovechando la tecnología ya desarrollada para el campo de bombas de calor. El sistema funcionaria excavando pozos en zonas cercanas a las ventilas hidrotermales, donde se conoce la existencia de una fuente de calor, en estos pozos se instalarían los pilotes geotérmicos los cuales aprovecharían el calor almacenado en la zona y calentarían un fluido de trabajo que sería llevado hasta la zona donde se necesite ya sea para su aplicación en proyectos de usos directos o si se llegara a obtener altas temperaturas en sistemas de generación de energía eléctrica. El sistema obtendría el fluido de trabajo de tanques de almacenamiento localizados en las costas desde donde se bombearía el fluido por una tubería de HDPE, hasta llegar a la zona del recurso donde recibirá el calor emanado por el suelo circundante a las estructuras para su posterior regreso a la zona de aplicación ya sea en la costa o en el océano.

Con el uso de pilotes geotérmicos se pretende disminuir la invasión al ecosistema creado en la periferia de la ventila al no necesitar captar la emanación de agua sumado a esto el uso de estructuras termo-activas permite minimizar los costos de instalación, ya que no requiere de materiales especiales para su construcción. Estos pilotes tampoco dependen del tiempo de vida de la ventila hidrotermal, la cual puede desaparecer en cualquier momento, ya que aprovecha directamente el calor almacenado en las zonas cercanas a la ventila.

La investigación en el campo de las estructuras termo activas ha llevado a nuevos avances en el mejoramiento de los materiales de construcción, a partir de fibras poliméricas en el relleno de concreto y nano-partículas de metal en el fluido de trabajo, incrementado la transferencia de calor hasta en un 55 % comparado con los fluidos de trabajo tradicionales. (Kumar, et al., 2006)

Para analizar su desempeño en el ambiente marino se realizó un análisis térmico en el que se pudo observar que la temperatura de salida del fluido de trabajo depende del flujo másico, el fluido utilizado y de la separación que existe entre la tubería de entrada y la tubería de salida y su cercanía con la periferia de la estructura. Comparando el desempeño entre el agua y el refrigerante R134a se obtuvieron temperaturas mayores a los 30 [°C] y 1 [kW_T] y 60 [°C] con 1.2 [kW_T] respectivamente, ambos fueron analizados en una tubería de 0.254 [cm] de diámetro, 10 [m] de largo y con una estructura termo activa de 0.25 [m] de radio. El análisis llevó a la propuesta de utilizar varias estructuras conectados en serie para aumentar la temperatura de salida del fluido de trabajo, esta propuesta se realizó para evitar realizar perforaciones profundas utilizando solo el área cubierta por los sedimentos

Después de realizar el análisis térmico se pudo observar que por la temperatura de salida el recurso se encontraba en el área de baja entalpia lo que permitía su aplicación para proyectos de usos directos como lo son: deshidratación de alimentos, balneología, calefacción, invernaderos geotérmicos y acuicultura. Para dar un ejemplo de aplicación se optó por presentar un proyecto de acuicultura en el cual se alimentaban 27 tanques de geo membrana con el agua caliente obtenida de los pilotes geotérmicos. Esta propuesta se realizó con el fin de demostrar una de las múltiples utilidades que pueden ofrecer estos recursos en el campo de baja, mediana y alta entalpia. Para esta propuesta se necesita mantener un flujo constante de agua de 4.5 [kg/s] a 32 [°C] lo que llevé a utilizar 15 estructuras termo activas conectadas en serie considerando una pérdida de 5 [°C] en el transporte del recurso de la zona de las ventilas hasta la costa. Este recurso será suministrado por una bomba de flujo constante de 5 [HP].

Por último, se realizó el análisis financiero del proyecto mediante el uso del software **@RISK** en el cual se pudo observar que la propuesta es rentable con un periodo de recuperación, en las mejores condiciones del mercado, de 3.6 años y en el peor de los escenarios en 10 años. También se pudo observar que la TIR se mantendrá positiva en un 90 % de las ocasiones lo que garantiza obtener ganancias, aunque este valor se encuentre por debajo del WACC establecido por el inversionista.

Al finalizar este trabajo se llegó a la conclusión que el uso de las estructuras termo activas para la captación del recurso geotérmico emanado por las ventilas hidrotermales es factible y puede

dársele diversas aplicaciones en el campo de baja entalpia si se mantienen profundidades de pozos someras. Un aumento en la profundidad de los pozos llevaría a la diversificación de las aplicaciones dadas al recurso obtenido llegando incluso a la generación de energía eléctrica con el uso de ciclos Rankine Orgánicos y fluido de trabajo diferentes al gua como lo son los refrigerantes o nano- fluidos.

Este trabajo se enfocará en determinar las bases del tema y servirá para que, en un trabajo futuro se proponga la realización de una simulación numérica para verificar estos resultados analíticos. Las etapas que se deberán cubrir para una posterior simulación de nuestro sistema son las siguientes (Herrera & Becerra, 2014):

- a. **Definición del sistema:** se deben establecer los objetivos de la simulación y se deben identificar las variables del sistema las cuales pueden ser de tres tipos:
 - Variables decisión: Son las que describen el sistema en cualquier instante.
 - Variables de respuesta: son aquellas cuyo valor se trata de predecir a través del modelo.
 - Variables exógenas: Son las que afectan el comportamiento del sistema, pero estas no son afectadas por el sistema.
- b. **Plan general del proyecto:** se establece el programa que será utilizado acorde al fenómeno que se pretende simular, se considera el costo de utilización del software y si es necesario se consideran los salarios de personas especialistas en el manejo del software elegido, por último, se establecen tiempos para cada etapa de la simulación logrando así mantener un control del proceso de simulación.
- c. **Recolección de datos:** Esta etapa consiste en la obtención de datos referentes a las variables establecidas en la etapa 1, con la precaución de evitar alteraciones súbitas en la medición de dichas variables. Se establece el tiempo de simulación mediante la decisión de ciclos productivos y se analiza el número de ciclos necesarios para la obtención de mejores resultados. Se establecen las fuentes de información de donde serán recabadas las variables y se indicara la fecha de inicio para la recabación de datos.
- d. **Análisis de entrada:** En este punto se analizarán los datos recabados para asegurar que cumplen con los requisitos de la simulación estableciendo su comportamiento

estadístico el cual se definirá mediante pruebas de independencia, pruebas de homogeneidad, pruebas de bondad y ajuste y un análisis de regresión.

- e. **Construcción de modelo:** En esta etapa se diseñará un modelo capaz de ajustarse al sistema en estudio, se elegirá un lenguaje de simulación para establecer una sintaxis del proceso bien definida y se establecerán los elementos estáticos, elementos dinámicos, los arribos y la secuencia lógica.
- f. **Validación:** En esta etapa se recomienda realizar pruebas experimentales para cotejar que los datos de salida de la simulación corresponden a los datos experimentales, si se llegan a encontrar diferencias se realizan correcciones al modelo hasta que la exactitud del modelo sea aceptable. Los resultados deben ser evaluados por la opinión de un experto en el tema y un experto en simulaciones. Se realiza una evaluación estadística para determinar el nivel de error y se somete la simulación ante condiciones extremas para identificar las posibles fallas que se pueden presentar.
- g. **Experimentación:** En esta etapa se realiza un ensayo de sensibilidad en el cual el modelo es sometido a distintos escenarios para corregir las diversas fallas que este puede presentar logrando así ajustarlo al sistema con mayor exactitud.
- h. **Interpretación y presentación de resultados:** En esta etapa se analizan los resultados obtenidos y se realizan conclusiones y recomendaciones sobre el sistema que fue simulado.
- i. **Toma de decisiones:** Esta etapa se realiza si el modelo es utilizado con fines comerciales. En esta etapa la gerencia toma decisiones sobre la factibilidad del uso del modelo estableciendo los costos generados por la realización de la simulación y el tiempo de retorno de la inversión.
- j. **Monitoreo y control:** En esta última etapa se realiza un monitoreo constante del sistema, puesto que los sistemas son dinámicos y pueden llegar a presentar discrepancias con el sistema real, actualizando de manera periódica los datos de entrada del sistema permitiendo así que el modelo siga siendo una representación confiable del sistema.

Objetivos y Justificación

La presente investigación se enfocará en la propuesta de un sistema de captación de recursos geotérmicos submarinos. Esta investigación surge con base en la necesidad que se ha desarrollado a nivel mundial de buscar diversificar las fuentes de obtención de energía dependiendo en menor medida del uso de combustibles fósiles. Estas deben cumplir con las características de ser de bajo impacto ambiental y con factibilidad técnica y económica.

México es un país rico en energías limpias de las cuales la energía geotérmica aun muestra campos sin ser explotados como es el caso de los sistemas geotérmicos submarinos, es por ello que el objetivo de este trabajo es diseñar y analizar la factibilidad técnica y económica de la construcción de un sistema de captación de energía geotérmica submarina. Aunque este objetivo es general es necesario abordar objetivos particulares donde se estudiara con mayor profundidad las propiedades y características de este sistema térmico, estos son:

1. Recopilar información sobre las ventilas hidrotermales y dispositivos diseñados para la captación de la energía que estas emanan, sus características, ubicación y desempeño.
2. Proponer un diseño capaz de minimizar el impacto ambiental y soportar las condiciones ambientales del sitio utilizando una estructura termo-activa.
3. Analizar analíticamente su desempeño térmico y realizar un análisis preliminar sobre los costos de construcción y aplicación en un proyecto de acuicultura para verificar su factibilidad económica.
4. Analizar teóricamente el desempeño del dispositivo ante las condiciones ambientales de una zona elegida cercana a la península de Baja California o Nayarit.

Capítulo 1. Energía geotérmica y sus Usos Directos

En el presente capítulo se definirá la energía geotérmica, su clasificación, aplicación y situación en México. Este tipo de energía pertenece al grupo de energías limpias las cuales se caracterizan por presentar bajas emisiones de CO₂. La energía geotérmica es producto de interacciones entre un cuerpo caliente y un fluido el cual eleva su temperatura hasta temperaturas mayores a los 180 [°C]. Su extracción se realiza mediante la excavación de pozos los cuales atrapan este líquido o vapor y lo llevan a la superficie para ser utilizado en plantas de generación eléctrica o en aplicaciones de usos directos. Este tipo de energía puede clasificarse en convectiva o hidrotermal, conductiva o acuíferos profundos, aunque también se puede clasificar con base a la temperatura del recurso en baja, mediana y alta entalpía.

En México se ha planteado el crecimiento del uso de fuentes de energías limpias teniendo como objetivo el lograr obtener el 50 % de su producción de energía de estas nuevas fuentes para el año 2050 siendo la energía geotérmica una de las fuentes alternativas al uso de combustibles fósiles, aunque en México su desarrollo ha sido frenado en los últimos años en el país se cuenta con cinco plantas geotermoeléctricas y con zonas de alto potencial geotérmico aun no explotadas, como es el caso de Cerritos Colorados en Jalisco y las ventilas hidrotermales en el Océano Pacífico.

Pese a los diversos usos que tiene la energía geotérmica en el país su aplicación se limita, en el campo de usos directos, a balneología y tratamientos terapéuticos dejando un amplio rango de aplicación para ser explotado.

1.1. La energía geotérmica

Es la energía que se produce en el interior del planeta, tiene dos fuentes principales de producción una de ellas es el calor remanente de la formación de la tierra que se disipa desde el núcleo y la otra es producto del decaimiento radioactivo de minerales como el Uranio, Torio y Potasio contenidos en la litosfera. Se estima que en el interior de la tierra existen alrededor de

12×10^{12} [EJ] almacenados de los cuales al menos 5.4×10^9 [EJ] se encuentran en la litosfera a una profundidad promedio de 50 [km]. (CEMIEGEO, 2017)

Los yacimientos geotérmicos se componen por una fuente de calor local la cual es generalmente una cama magmática, un acuífero el cual está compuesto por roca porosa en la cual se almacena el agua producto de las infiltraciones de la superficie y una capa sello la cual se está compuesta por una roca de menor permeabilidad que la del acuífero y se interponen entre este y la superficie (Fig. 1). (CEMIEGEO, 2017)

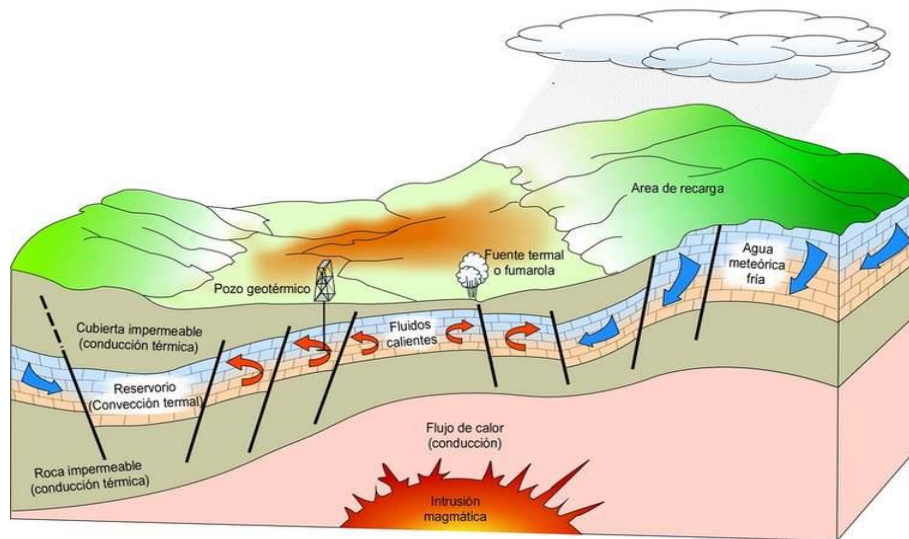


Fig. 1 " Energía geotérmica (Ministerio de energía, 2017) "

Los sistemas geotérmicos se clasifican de acuerdo a su temperatura en alta entalpia mayor a 180 [$^{\circ}\text{C}$], mediana entalpia de 180 a 100 [$^{\circ}\text{C}$] y en baja entalpia menor a 100 [$^{\circ}\text{C}$]. También pueden clasificarse en tres tipos de sistemas, los cuales son: Convectivos, Conductivos y acuíferos profundos (Fig. 2). (CEMIEGEO, 2017)

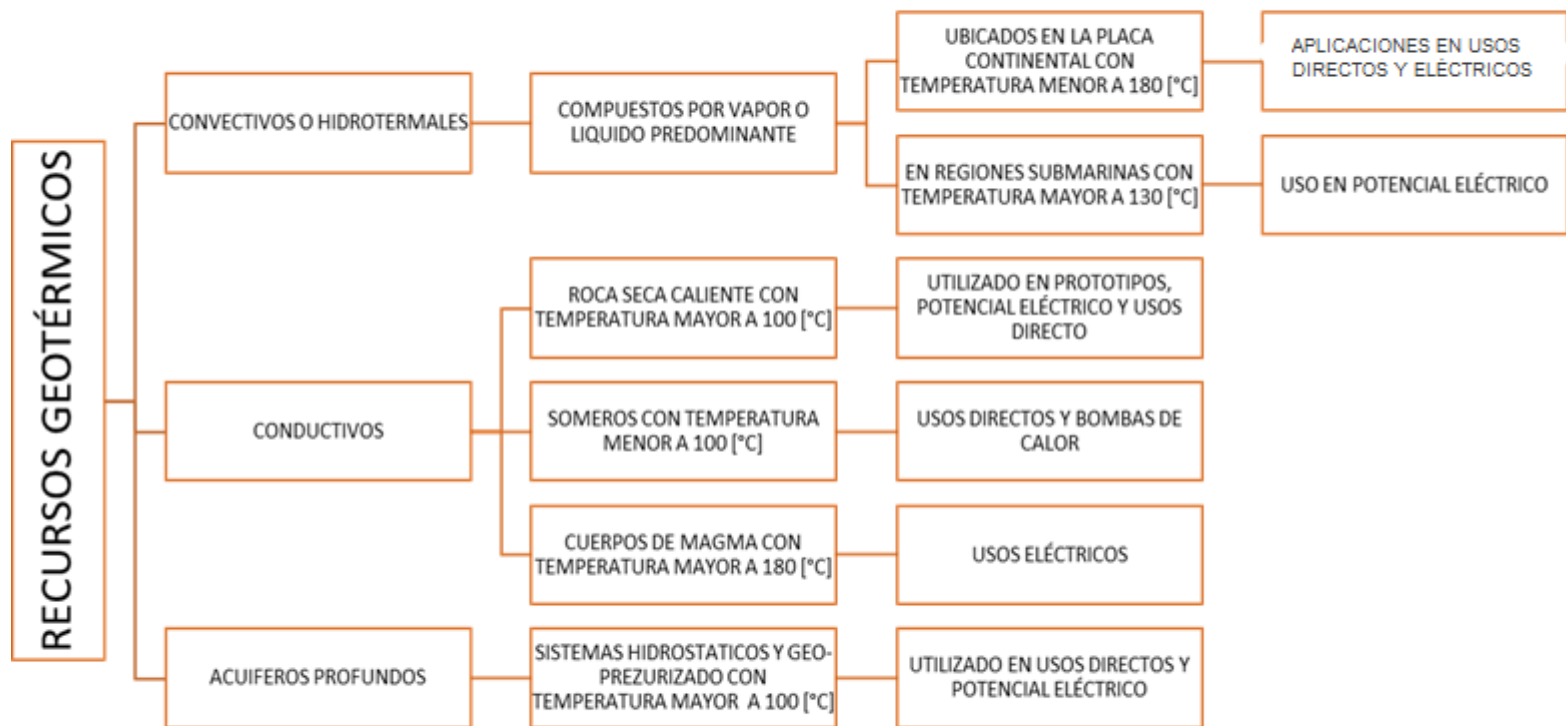


Fig. 2 " Clasificación de los recursos geotérmicos (CEMIEGEO, 2017) "

Este tipo de energía renovable puede ser utilizada para generar energía eléctrica, calefacción en invernaderos, deshidratación de alimentos, desalación de agua marina, calefacción de piscinas y en bombas de calor geotérmicas. También puede utilizarse en procesos combinados de generación de calor y energía eléctrica en plantas llamadas de cogeneración. (Hiriart, 2011)

Las plantas utilizadas en la generación eléctrica son de dos tipos: flasheo y de ciclo binario. Las plantas de flasheo¹ pueden tener uno, dos y hasta tres flasheos usando temperaturas mayores a los 180 [°C]. Las plantas de ciclo binario son utilizadas con recursos de mediana temperatura en la cual el calor extraído del subsuelo sirve para calentar un fluido de trabajo secundario el cual será dirigido a la turbina para generar energía eléctrica. (IRENA, 2018)

Esta energía se considera como una fuente de recursos prácticamente inagotable que presenta un bajo riesgo ambiental ya que sus emisiones se componen prácticamente de vapor de agua. Este tipo de energía es una de las pocas fuentes de energías limpias capaces de producir energía eléctrica las 24 [hrs], la desventaja que ofrece es la alta inversión que se realiza en las etapas de exploración y perforación, la cual oscila entre los 20 y 30 millones de dólares para la obtención de entre 3 y 5 pozos productores. (Banco Mundial, 2017)

Actualmente el Banco Mundial ha iniciado un programa enfocado en el desarrollo de la energía geotérmica buscando el apoyo de la inversión privada llegando a movilizar 235 millones de dólares. El potencial de energía geotérmica a nivel mundial es de 70 a 80 [GWe] de los cuales solo se generan 13 [GWe] explotando solo el 15 % de las reservas geotérmicas conocidas para la producción de energía eléctrica (Banco Mundial, 2017). En las cifras publicadas por el IRENA podemos observar que el crecimiento en la capacidad instalada del año 2010 al 2018 no ha sido tan alto como el de otras energías renovables pasando de 9 998 a 13 329 [MWe] (Fig. 3). En cuanto a la energía eléctrica generada se pasó de 68 441 [GWh] en el año 2010 a 82 654 [GWh] en el año 2016 registrando el primer gran aumento en el año 2014 ya que en años anteriores la cifra permanecía casi constante (Fig. 4). (IRENA, 2018)

¹ Flasheo: Procedimiento mediante el cual se busca la separación de la fase líquida y gaseosa del pozo mediante evaporación para ser introducida dentro del ciclo de generación eléctrica. (Calzada & Olivares, 2015)

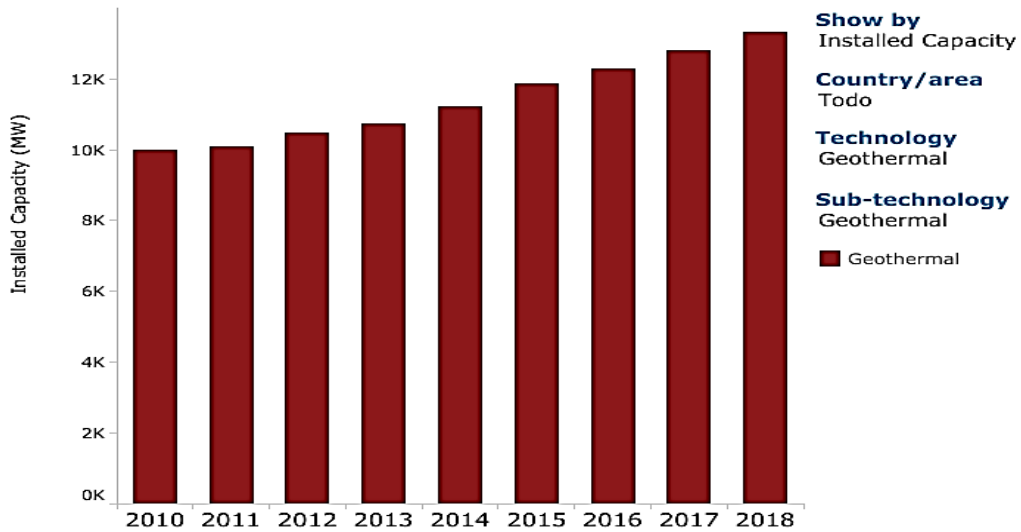


Fig. 3 " Capacidad instalada de energía geotérmica del año 2010 al año 2018 (IRENA, 2018) "

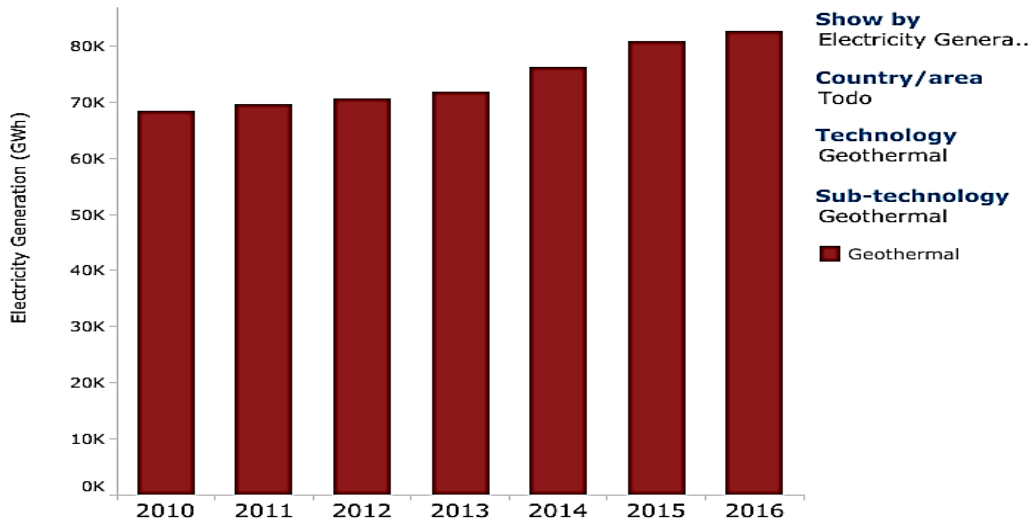


Fig. 4 " Energía eléctrica geotérmica generada del año 2010 al año 2016 (IRENA, 2018) "

1.2. Usos directos de la energía geotérmica

La energía geotérmica tiene más usos que el solo producir energía eléctrica, este tipo de usos aprovechan los recursos de mediana y baja entalpia y su aplicación depende de la temperatura del recurso, a esto se le conoce como usos directos de la geotermia y están agrupados en el diagrama de Lindal (Fig. 5).

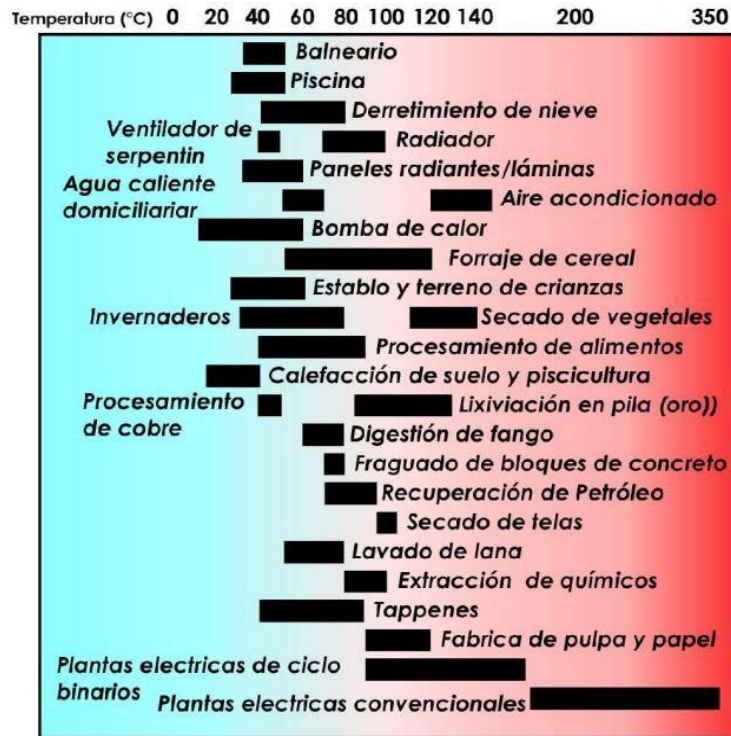


Fig. 5 " Usos directos de la geotermia (Salinas, 2016)"

En la imagen anterior se puede observar la clasificación oficial de las aplicaciones térmicas de la energía geotérmica. Los investigadores Lund y Boyd han hecho una clasificación de los usos actuales en el mundo distribuyéndolos en nueve categorías las cuales son: Bombas de calor geotérmicas, acondicionamiento de espacios, calefacción de invernaderos, acuicultura, usos industriales, balneología, calefacción de piscinas, derretimiento de nieve y otros (Fig. 6). Con esta distribución los usos directos representan una capacidad instalada de 70.33 [GWt] con un uso de energía térmica global de 587 786 [TJ /año] en 82 países. (Moya , et al., 2018)

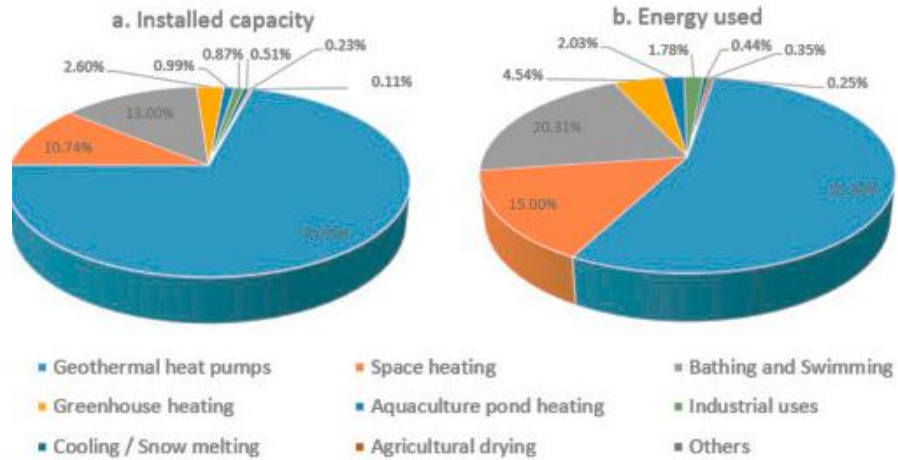


Fig. 6 " Capacidad instalada de usos directos en el mundo (lado izquierdo) y energía térmica utilizada (lado derecho) (Moya , et al., 2018) "

Debido a que la temperatura del fluido geotérmico sufre un progresivo decremento en su temperatura permite ampliar su utilización a más de un proceso conocidos como usos en cascada. Este procedimiento aprovecha cada uno de los diferentes niveles térmicos del fluido de manera secuencial, esto incrementa las posibilidades de uso de la energía geotérmica y puede dividirse en dos principales grupos, los cuales son: sistemas en cascada con producción de energía eléctrica y usos térmicos, y en sistemas solo de usos térmicos. (Rubio, et al., 2015)

En la siguiente imagen (Fig. 7) se observa un sistema en cascada con generación de energía eléctrica de tres niveles, el primer nivel corresponde al proceso de producción de energía eléctrica. Posteriormente, el fluido de trabajo es llevado a un segundo nivel a un proceso de enfriamiento. Finalmente se lleva al tercer nivel donde puede ser utilizado en procesos de acuicultura, secado de madera, deshidratación de alimentos o balneología.

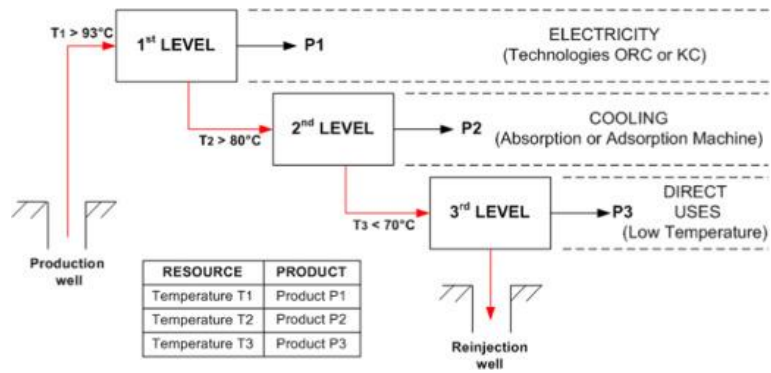


Fig. 7 " Usos en cascada (Moya , et al., 2018) "

El potencial de la energía geotérmica es enorme y permite ser aprovechado en diferentes aplicaciones que ayuden a minimizar el uso de combustibles fósiles en diferentes áreas industriales, residenciales y agrícolas.

1.3. Energía geotérmica en México

En México el uso de energías limpias como la energía geotérmica ha tomado relevancia en los últimos años llevando al país a establecer metas para el uso de estas fuentes (Fig. 8). Con estas metas planteadas México prevé cumplir con la demanda energética del país y lograr disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, depender menos de una sola fuente de generación y diversificar sus medios de producción. (Jensen, 2018)

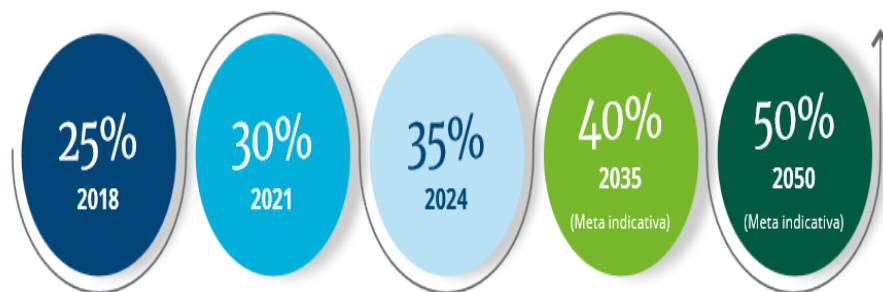


Fig. 8 " Metas de crecimiento de producción de energía eléctrica mediante fuentes de energías limpias (Jensen, 2018)"

El uso de la energía geotérmica toma parte de estas metas y cuenta con uno de los mayores potenciales posibles y probables de las diferentes energías limpias en el país según datos

establecidos por el Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL) y el Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL) (Tabla 1).

Tabla 1 " Potencial de generación eléctrica con energías limpias en México (SENER, 2018) "

[GWh/año]						
Recursos	Geotérmica	Hidráulica	Eólica	Solar	Biomasa	Oceánica
Probado²	2,610	4,920	25,104	25,052	3,326	-
Probable³	45,207	23,028	-	-	680	1,057
Posible⁴	52,013	44,180	87,600	6,500,000	11,485	-

México cuenta con cinco campos geotérmicos en operación cuatro de ellos pertenecientes a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), los cuales son: Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres en Michoacán, Los Humeros en Puebla y Las Tres Vírgenes en Baja California Sur, con una capacidad instalada de alrededor de 931 [MWe] suficientes para abastecer a cerca de dos millones de hogares y un campo manejado por el Grupo Dragon en Domo San Pedro, Nayarit, con una capacidad de 10 [MWe] (CEMIEGEO, 2015). Con la capacidad instalada total en el país la energía geotérmica representa el 4.8 % siendo la tercera energía limpia con mayor capacidad instalada y en cuanto a la generación eléctrica bruta en el año 2017 cerca de 50 000 [GWh] prevenían de fuentes de bajo impacto ambiental siendo la energía geotérmica la tercera fuente de generación con el 11.7 % (SENER, 2018). Estos campos posicionan al país en el 6° lugar a nivel mundial en capacidad instalada (Fig. 9).

² Es aquel que cuenta con estudios técnicos y económicos que comprueban la factibilidad de su aprovechamiento, esto corresponde a recursos solares y eólicos

³ Es aquel que cuenta con estudios de campos que comprueban la de presencia de recursos, pero no son suficientes para demostrar su factibilidad, corresponde a los recursos geotérmicos.

⁴ Esta clasificación se refiere a una al potencial teórico el cual carece de los estudios necesarios para evaluar su factibilidad técnica y los posibles impactos económicos, sociales y ambientales, este rubro abarca proyectos de energía solar y eólicos.

LA OPERACIÓN ACTUALMENTE LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS GENERAN UN TOTAL DE 6.041 GIGAWATTS (GWH).



Fig. 9 " Capacidad instalada a nivel mundial (El Heraldo de México, 2019) "

El crecimiento de la energía geotérmica ha sido bajo en los últimos años, pero a inicios del 2018 se cuentan con 25 permisos de explotación vigentes, dos nuevas concesiones otorgados para explotación que se sumaran a los cinco campos existentes sumando un total de 31 proyectos que podrían incrementar la matriz energética de capacidad instalada, en los próximos dos años, hasta los 50 [MWe] y hasta los 115 [MWe] para los próximos seis años (SENER, 2018)

Como se observó en el apartado anterior la energía geotérmica tiene diversos usos directos, sin embargo, en el país su uso se limita a la producción de energía eléctrica y a la aplicación en tratamientos terapéuticos y balneología. Estos usos directos cuentan con una capacidad instalada de alrededor de 164.7 [MWt] en unos 160 sitios en el país produciendo cerca de 12 500 Toneladas de agua caliente por hora, con temperaturas que alcanzan hasta los 50 [°C]. (Santoyo & Barragan, 2010).

En cuanto a usos en cascada la SENER se ha encargado de realizar una recopilación sobre los distintos proyectos que se han desarrollado en el país (Tabla 2), sin embargo, la mayoría de ellos se mantienen abandonados.

Tabla 2 "Proyecto de usos en cascada en el país (SENER, 2018) "

Tipo de proyecto	Ubicación	Inicio	Estado de desarrollo	Alcance	Participantes
Deshidratador de alimentos	Domo de San Pedro, Nayarit	2017	Operación	Comercial	Grupo iiDEA
Secado de madera	Los Azufres, Mich.	1998	Abandonado	Demostración	CFE
Climatización de oficinas	Los Azufres, Mich.	1998	Operación	Demostración	CFE
Deshidratador de frutas y verduras	Los Azufres, Mich.	1998	Abandonado	Demostración	CFE
Invernadero	Los Azufres, Mich.	1998	Abandonado	Demostración	CFE
Producción de hongos comestibles	Los Humeros, Pue.	1998	Abandonado	Demostración	CFE

Actualmente el país cuenta con proyectos en operación de usos directos como lo son: invernaderos en Jalisco, balnearios en Coahuila, Hidalgo y Puebla, desaladora de agua de mar en Baja California Sur, y deshidratación de alimentos en Michoacán. Sumados a estos proyectos se tiene aplicaciones en bombas de calor en los estados de Puebla, Michoacán y Baja California. (SENER, 2018)

Conclusión del capítulo

Como se puede observar la energía geotérmica tiene un alto potencial de aprovechamiento a nivel mundial y nacional, este tipo de energía tiene la ventaja de producir energía de manera constante ya que no depende directamente de las condiciones climatológicas del lugar. El país cuenta con un alto potencial energético el cual solo requiere el surgimiento de nuevos proyectos que ayuden a explotarlo. Esto permite explorar nuevos campos de obtención de energía geotérmica como es el

caso de las ventilas hidrotermales. Estas emanaciones pueden proveer una nueva fuente de energía geotérmica capaz de ser utilizada en distintos sectores, no solo para la generación eléctrica, sino también, para su implementación en proyectos de usos directos que ayuden a disminuir el impacto ambiental y amplíen la aplicación de estos usos a nivel nacional explorando nuevos campos como: acuicultura, bombas de calor, deshidratación de alimentos, calefacción de invernaderos y distrital, desalación de agua de mar entre otros.

Como se podrá observar en el siguiente capítulo diversas naciones han puesto su mira en las ventilas hidrotermales y México cuenta con un alto potencial para la obtención de estos recursos los cuales pueden ser encontrados en las costas del Océano Pacífico.

Capítulo 2. Estado del arte de las ventilas hidrotermales

Como se pudo observar en el capítulo 1 la situación actual brinda un escenario favorable para el desarrollo de nuevos proyectos que ayuden a minimizar el impacto ambiental y aprovechen el potencial geotérmico del país. Las ventilas hidrotermales pueden proveer una nueva fuente de obtención de recursos geotérmicos que ayuden a diversificar los usos directos en el país minimizando el consumo de combustibles fósiles.

En el presente capítulo se hablará sobre la formación de las ventilas hidrotermales que se da principalmente en zonas cercanas a los dorsales oceánicos y las cuencas de tras-arco al ser sitios de alta concentración de energía generada por el movimiento de las placas tectónicas. Este tipo de manifestaciones hidrotermales emanan diversos tipos de minerales como hierro, cobre, plata, zinc, manganeso y oro. Aunque su origen se remonta hasta los inicios de la vida misma su descubrimiento data del siglo pasado cuando en el año de 1965 se encontraron los primeros indicios de actividad termal en el fondo oceánico. Este nuevo campo de investigación ha motivado a la creación de nuevos desarrollos que plantean la utilización de estas manifestaciones como una nueva fuente de energía donde destaca el proyecto desarrollado por el programa IMPULSA IV de la Universidad Nacional Autónoma de México el cual ha servido de referencia a nivel mundial.

2.1. Ventilas hidrotermales: formación y distribución geográfica.

Las ventilas hidrotermales son manifestaciones geotérmicas ubicadas en zonas de fallas en la corteza producidas por el movimiento continuo de las placas tectónicas. Se originan debido a la interacción entre una fuente de calor, un cuerpo rocoso permeable y un fluido, en donde se establece una celda convectiva que consta de un sistema de recarga, circulación y descarga (Fig. 10). (Soto & Estradas, 2014)

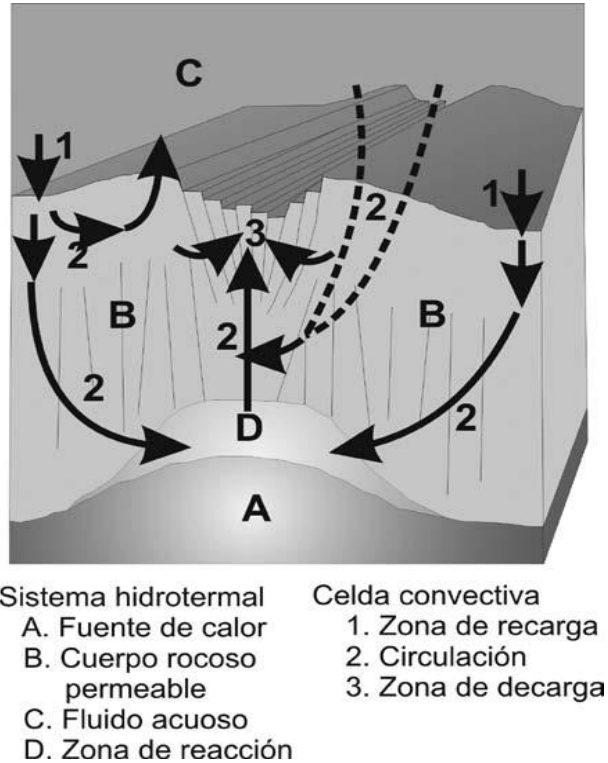


Fig. 10 " Sistema hidrotermal y celda convectiva (Soto & Estradas, 2014) "

Comúnmente el proceso de formación de una ventila hidrotermal submarina comienza cuando el agua fría de mar, con temperaturas promedio de 2 a 4 [°C], fluye por la zona de fracturas hasta la zona de reacción donde eleva su temperatura en un rango de 250 a 450 [°C] posterior a este calentamiento el agua fluye por la zona de circulación donde adquiere la composición química característica, que se observa en la descarga de la chimenea, por ultimo llega a la zona de descarga donde los fluidos son expulsados a través de las fallas o fracturas. (Soto & Estradas, 2014)

La chimenea se forma cuando los fluidos hidrotermales, que contienen concentraciones elevadas de metales, ricos en sulfuros de alta temperatura, se mezclan con el agua fría y alcalina que esta alrededor de la descarga de agua caliente causando la precipitación de los sulfuros de metal y oxidándolos rápidamente en forma de partículas (Soto & Estradas, 2014). En la emanación de precipitados podemos encontrar hierro, oro, plata, cobre, zinc, cadmio y manganeso (Marshall, 2011) (Fig. 11).

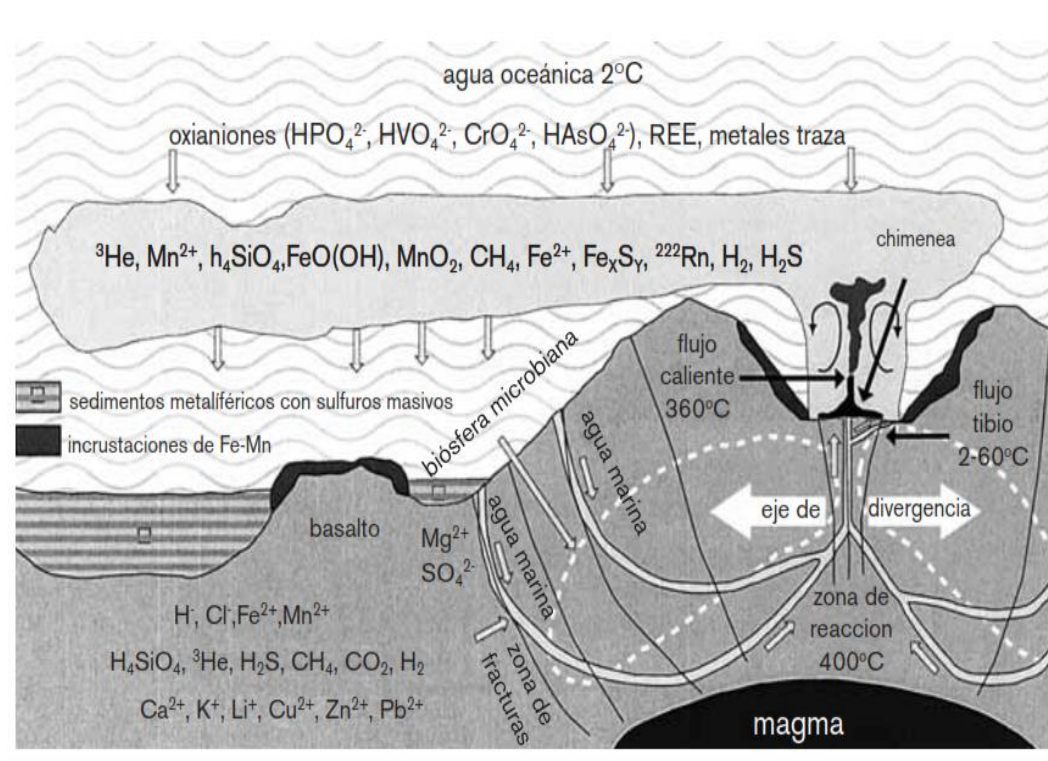


Fig. 11 " Ciclo de una ventila hidrotermal (Marshall, 2011) "

Este ciclo mantiene un flujo continuo, de recarga y descarga, de agua a altas temperaturas enriquecida con minerales que son traídos desde el manto inferior hasta la superficie del fondo marino, donde a sus alrededores se genera una gran biosfera microbiana que da inicio a la generación de una larga cadena trófica⁵. La formación y colapso de la ventila hidrotermal es aún desconocida, aun no se cuenta con un modelo predictivo que describa el tiempo de vida de la ventila hidrotermal.

La chimenea típica está formada por roca basáltica y ventila agua altamente acida con sulfuros de metal negros, sin embargo, existe un tipo inusual alojado en roca de serpentinita que forma chimeneas alcalinas, pobres en metales, compuestas de carbonato de calcio blanco que pueden llegar

⁵ Esta cadena es la encargada de describir la relación de transferencia de energía y masa de un ser vivo a otro. (Ibáñez, 2011)

a medir hasta 60 [m] de largo, emanando un flujo a temperaturas menores que en el caso de las ventilas típicas no mayor a los 100 [°C]. (Brazelton, 2017)

Las ventilas hidrotermales pueden ser clasificadas en diversas formas considerando los cambios en la comunidad ecológica que habita en sus alrededores, las condiciones ambientales, el color del humo que exhala o de acuerdo a la profundidad a la que se encuentra. Estas clasificaciones sirven para entender las propiedades físicas y químicas que se pueden encontrar en el sitio, algunos ejemplos de clasificación son:

Ventilas Black smokers y White smokers: Las ventilas *black smokers* son aquellas que se encuentran a altas temperaturas de hasta 400 [°C] enriquecidas con sulfuro de hidrógeno, metano, manganeso y otros metales como lo son hierro, zinc, cobre, plomo, cobalto y aluminio. Estos compuestos son lo que otorgan el característico color negro a la pluma que emana la ventila. (WHOI, 2012)

Las ventilas *white smokers* se caracterizan por tener una temperatura de fluido menor a la presente en las *black smokers* de 250 a 300 [°C], tienen una menor altura y una menor descarga de flujo. Estas ventilas están enriquecidas de sílice, anhídrita y barita. (Margaret, 2014)

Ventilas someras y profundas: Los sistemas profundos se encuentran desde los 500 [m] hasta los 4000 [m] de profundidad con temperaturas de 350 a 450 [°C] (Soto & Estradas, 2014). Mientras que los sistemas someros se pueden encontrar desde los 20 [m] de profundidad (Suárez, et al., 2005), sin embargo, la profundidad que se ha elegido para ser tomada como referencia, entre recursos someros y profundos, son los 200 [m] de profundidad ya que a esta profundidad se determina un cambio brusco en los parámetros ambientales y de estructura de las comunidades bióticas, y coincide con un aumento en la pendiente de la curva de ebullición respecto a la presión para el agua marina. (Canet & Prol Ledesma, 2006)

La generación de las ventilas hidrotermales se encuentra estrechamente relacionado con el sistema dorsal oceánico medio oceánico y con las cuencas tras arco (Prol & Canet, 2014) ya que en las zonas aledañas a estas manifestaciones geográficas se encuentran zonas sometidas a grandes esfuerzos de tensión donde se generan las grietas por donde se filtra el agua marina.

El origen de los sistemas dorsales oceánicos actuales se remonta hacia fines del Cretácico, alrededor de 65 millones de años, la apertura del Atlántico sur se había consolidado y en el Pacífico oriental se desarrollaban dorsales oceánicas precursoras de las actuales. (Frutos, et al., 2010)

El sistema dorsal oceánico es originado por el contacto de dos placas donde se tiene lugar la generación de corteza oceánica estas forman crestas que se elevan de 1000 a 3000 [m] por encima del fondo oceánico que las rodea. Estas dorsales se desarrollan en la parte media de las cuencas oceánicas mayores, con marcadas pendientes en ambos flancos y alcanzan longitudes que en total exceden los 60000 [km] (Fig. 12). De acuerdo a la teoría de las placas tectónicas los dorsales medio oceánicos, constituyen límites entre las placas en los que se genera litósfera oceánica. Las nuevas rocas generadas pasan a formar parte de la corteza oceánica, siendo entonces transportadas hacia ambos lados de la dorsal por un proceso continuo de expansión del fondo oceánico, que tiene velocidades entre 1 a 10 [cm/año]. Como el tamaño de la Tierra es constante, la nueva litósfera sólo es creada en la cantidad que puede ser consumida por las zonas de subducción. (Toselli, 2010)

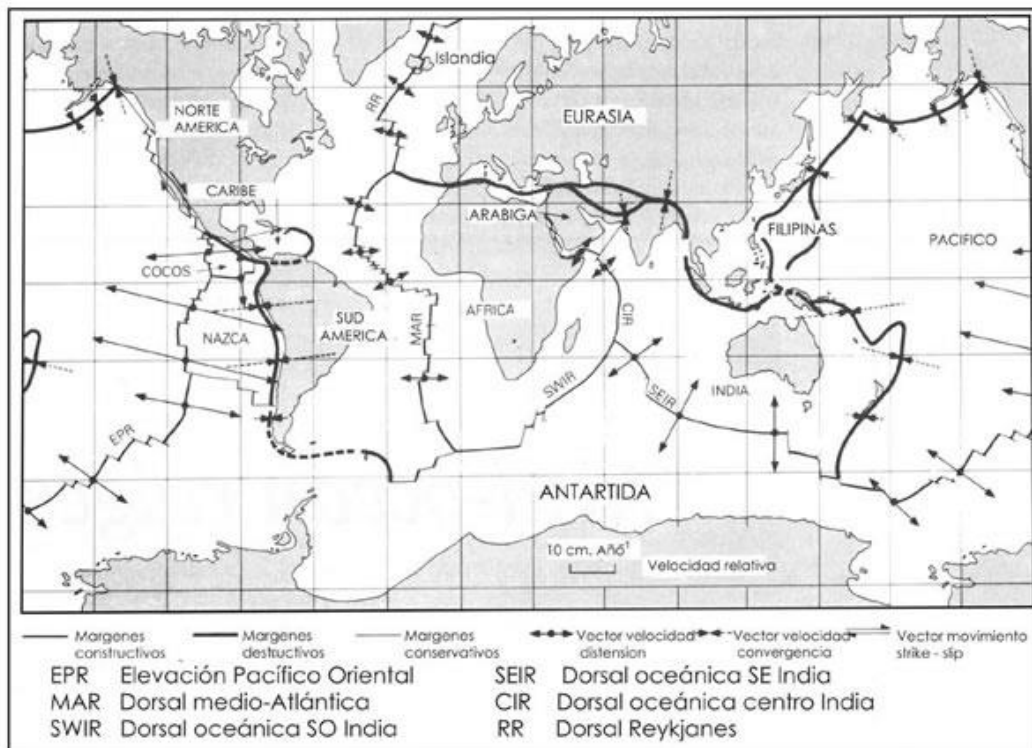


Fig. 12 " Sistema dorsal medio oceánico (Toselli, 2010) "

Las cuencas tras-arco son cuencas semi-aisladas o en serie ubicadas detrás de los arcos de islas (Fig. 13). Tienen características extensionales producidas de manera similar a las dorsales oceánicas. (Toselli, 2010)

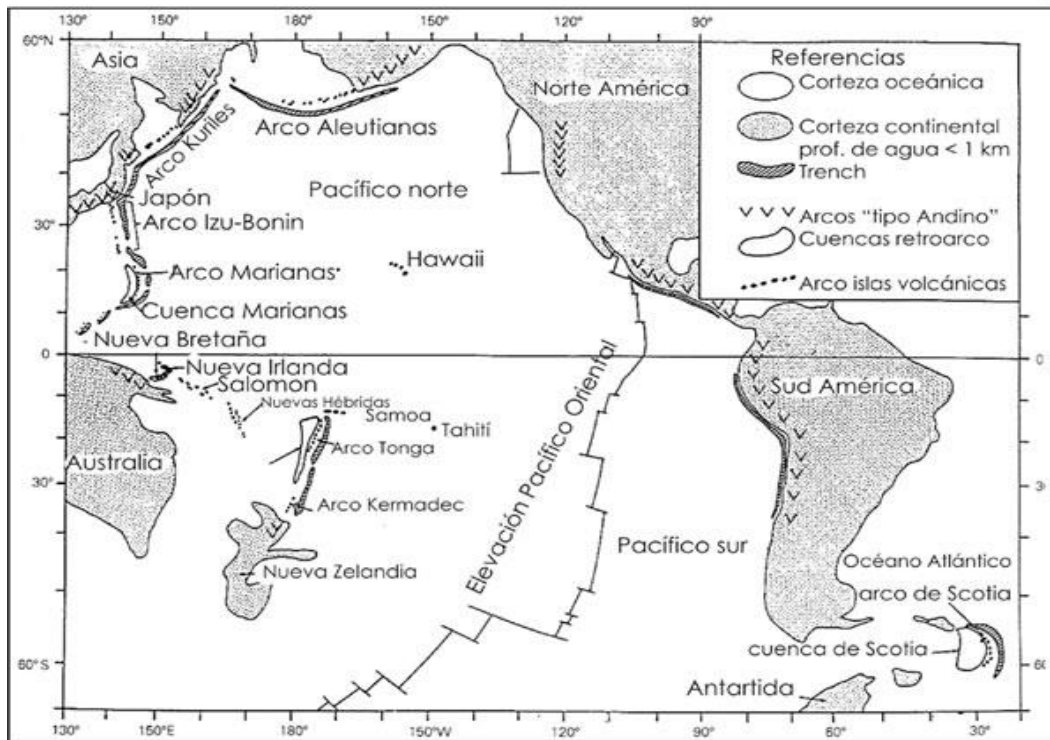


Fig. 13 " Cuenca tras-arco (Toselli, 2010) "

Las ventilas hidrotermales se distribuyen a lo largo de todo el sistema de dorsales oceánicas que circulan el globo con una longitud de 67 000 [km] (Fig. 14) de los cuales solo 13 000 [km] han sido explorados encontrando 280 sitios con ventilas hidrotermales. (Hiriart, et al., 2010)

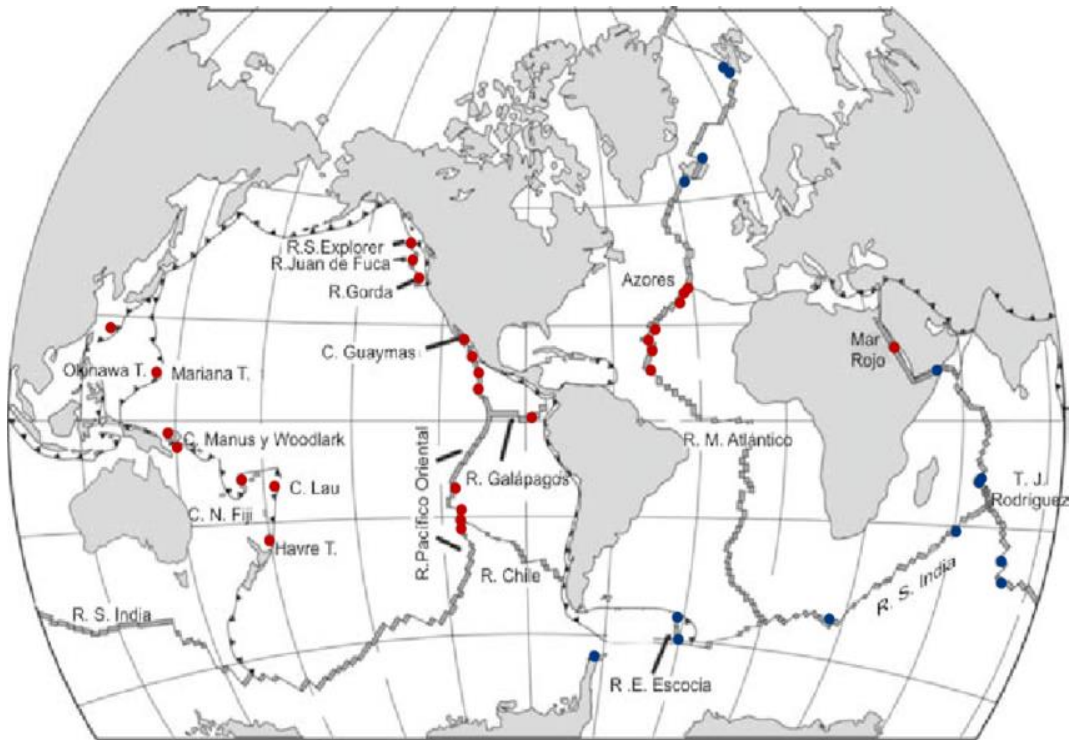


Fig. 14" Distribución de los sistemas hidrotermales submarinos alrededor del mundo (Prol & Canet, 2014)"

Si se compara los mapas de ubicación de cuencas de tras-arco y dorsales oceánicas podemos observar que la ubicación de las ventilas hidrotermales se encuentra cercana a estos sistemas.

2.2. Descubrimiento de una nueva fuente de energía.

El descubrimiento de las ventilas hidrotermales submarinas es relativamente joven, pese a que su origen se remonta a miles de años atrás, los indicios de su existencia comenzaron a ser descubiertos en la mitad del siglo XX cuando en el año de 1965, en la zona de expansión oceánica del Mar Rojo, se encontraron depósitos de lodos metalíferos y albercas de salmueras hidrotermales densas a este sitio se le conoció como *Atlantis Deep II*. Este sitio corresponde al mayor deposito metalífero conocido. (Prol & Canet, 2014)

Posteriormente en el año de 1976 se descubrió el dorsal de los Galápagos donde se encontraron sistemas hidrotermales de baja temperatura. En dicho sistema en 1977 se realizó un estudio de investigación efectuado por la *Woods Hole Oceanographic Institution* con el cual se descubrió a

330 [km] al noreste de las Islas Galápagos y a 1500 [m] de profundidad los primeros manantiales hidrotermales los cuales fueron nombrado *Rose Garden*. (Pantoja & Gomez, 2004)

En 1979 en el dorsal oceánico del Pacífico Este a una latitud de 21° N se describieron las primeras chimeneas *black smokers* con un flujo abundante de agua a 350 [°C] y una alta concentración de metales disueltos (Prol & Canet, 2014).

En 1980 *Scripps y Woods Hole Oceanographic Institution* organizaron una expedición en el golfo de California con ayuda del sumergible Alvin encontraron a 200 [km] del Cabo de San Lucas en las coordenadas (21° N, 109° O) y una profundidad de 2600 [m] chimeneas de hasta 6 [m] de altura nombrando al lugar *Hanging Gardens*. (Suárez, et al., 2005)

En 1982 el sumergible al Alvin realizó una inmersión a 2000 [m] de profundidad en la cuenca de Guaymas, Sonora encontrando un yacimiento de ventilas hidrotermales en el sitio. (Pantoja & Gomez, 2004)

En el año 2000 se encontró, en la dorsal medio oceánica Atlántica, un campo de ventilas inusuales compuestas por minerales de calcio, las cuales tienen una chimenea compuesta por roca de serpentinita formada por un conjunto de reacciones geoquímicas acuosas conocidas colectivamente como serpentización. Este fenómeno ocurre cuando las rocas del manto están expuestas al agua de mar, lo que resulta en la oxidación e hidratación de minerales ricos en hierro. Estas ventilas alcanzan hasta los 60 [m] de alto con una temperatura de flujo no mayor a los 100 [°C] el sitio fue nombrado *Lost City*. (Brazelton, 2017)

Desde esa época hasta el día de hoy se han descubierto más de 280 sistemas de manantiales hidrotermales submarinos con temperaturas de hasta 405 [°C] con una mayor concentración en profundidades que van de los 2000 a los 2500 [m]. La mayor parte de estos sistemas se encuentran en los océanos Pacífico y Atlántico, aunque también se tiene descubrimientos en el océano Índico y el Mar Rojo (Prol & Canet, 2014). Los descubrimientos recientes se resumen en la línea del tiempo siguiente (Fig. 15):

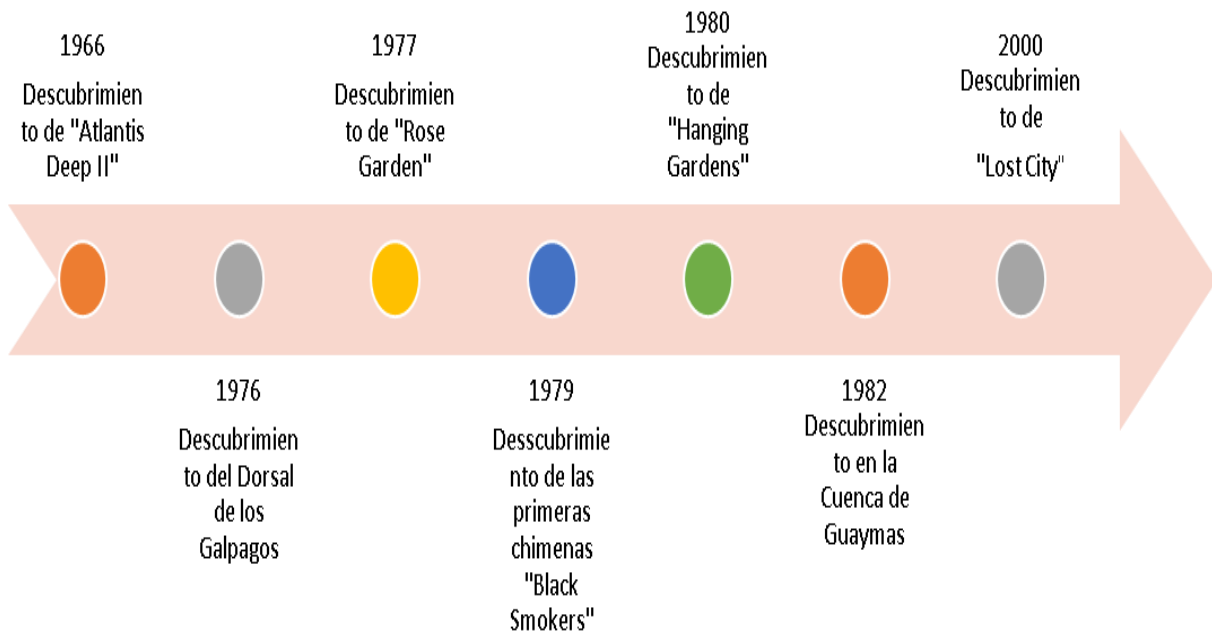


Fig. 15 " Descubrimiento de las ventilas hidrotermales (Autor) "

Las ventilas hidrotermales son consideradas una nueva fuente de energía ya que el gradiente térmico que se genera entre la emanación de la ventila y el fondo oceánico es de hasta 300 [°C] lo que genera un gran flujo de calor que podría ser aprovechado para la generación de energía eléctrica mediante un sistema de transformación. El sistema cuenta con la ventaja de tener una recarga de agua natural continua con lo cual no se tiene la preocupación de sobre explotar el pozo y ofrece un flujo continuo de agua a altas temperaturas por varios años.

Aunque es una fuente atractiva de recursos geotérmicos se estima que solo 1 [%] de los sitios ya conocidos podrían ser explotados, debido a los factores biológicos y ecológicos del sitio, generando hasta 130 000 [MWe]. Un resultado importante, obtenido en la investigación del proyecto IMPULSA IV, es que a partir de una ventila hidrotermal, se pueden producir hasta 20 [MWe] con un método simple de bajo impacto ambiental (Hiriart, et al., 2010).

2.3. Ventilas hidrotermales como fuente de vida.

Aunque en la ventilas hidrotermales submarinas se tiene un medio ambiente con condiciones extremas de temperatura y presión estas pueden albergar complejas comunidades de organismos. Estos organismos pueden existir gracias a que en la emanación de los fluidos hidrotermales la temperatura es elevada con una concentración de componentes inorgánicos que favorecen al desarrollo de comunidades de micro organismos quimiosintéticos⁶.

El gradiente térmico que proporcionan la ventilas hidrotermales provee un hábitat diverso de organismo quimiosintéticos como lo son: psicrófilos⁷, mesófilos⁸, termófilos⁹ e hipertermófilos¹⁰. Los organismos principalmente lograr sobrevivir gracias a que las exhalaciones de la ventila a menudo contienen elevadas cantidades de ácido sulfhídrico (H_2S), gas de hidrogeno y otros compuestos reducidos que sirven de fuente de energía para las bacterias (Brazelton, 2017). Estos organismos son la base de la cadena trófica y pueden aportar información sobre la biosfera primitiva y aportan nuevas teorías sobre el origen de la vida en el planeta tierra (Prol & Canet, 2014).

El ecosistema cercano a la ventila hidrotermal presenta una biodiversidad extremadamente alta, con muchos niveles tróficos, estos organismos son impulsados directamente o indirectamente por la quimiosíntesis (Brazelton, 2017). En este sitio aparentemente inhóspito la biomasa por unidad de área es comparable con la encontrada en selvas tropicales. (Girguis & Holden, 2012)

⁶ Los organismos quimiosintéticos son capaces de elaborar su alimento a través de sustancias que contienen hierro, azufre, hidrogeno y nitrógeno. elaboran sus compuestos orgánicos por medio de la descomposición u oxidación de compuestos inorgánicos y no requieren de la luz como fuente de energía para realizar sus reacciones. (Miguel, 2017)

⁷ Son organismos cuya temperatura óptima de crecimiento está por debajo de los 20 [°C]. Están presentes en suelos árticos, altas altitudes y aguas profundas. (IVAMI, 2018)

⁸ Son microorganismos que se desarrollan en presencia de oxígeno en temperaturas menores a 40 [°C]. (Biosait Europe, 2020)

⁹ Microorganismos resistentes a temperaturas mayores a los 40 [°C] alcanzando temperaturas de sobrevivencia de hasta 100 [°C]. (Suárez, et al., 2004)

¹⁰ Son capaces de sobrevivir en temperaturas mayores a los 100 [°C] teniendo su hábitat en zonas cercanas a la actividad volcánica. (Suárez, et al., 2004)

La característica principal de estos organismos es que pueden existir aun en la ausencia de luz solar y soportar altas temperaturas. En el sitio podemos encontrar poliquetos¹¹, mejillones, almejas, gusanos tubulares y langostinos (Fig. 16). (Brazelton, 2017)

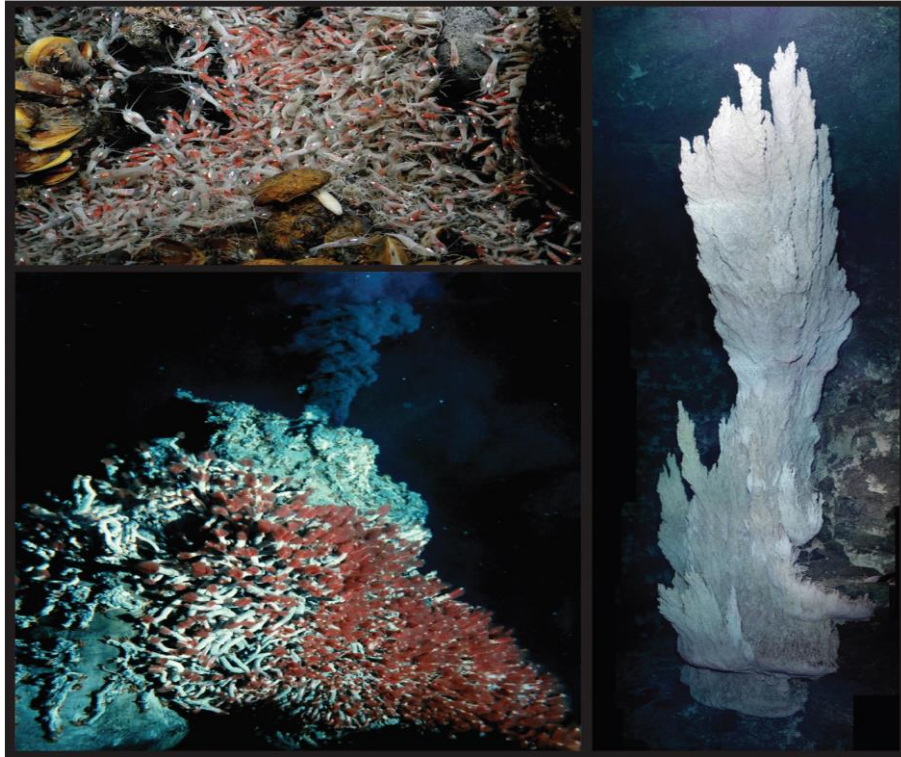


Fig. 16 " Biodiversidad en las ventilas hidrotermales (Brazelton, 2017) "

Como se puede observar las ventilas hidrotermales albergan un tipo de vida único en el mundo, es por este hecho que la explotación de los recursos emanados por las ventilas hidrotermales debe de realizarse con las consideraciones de minimizar el impacto ambiental al ecosistema que ahí vive. Estas restricciones han limitado su explotación a nivel mundial y presentan uno de los principales retos a vencer en el diseño de un dispositivo poco intrusivo para minimizar el impacto ambiental.

¹¹ Organismos marinos con forma de gusano que habitan dentro de tubos calcificados en las zonas sedimentarias encargados de reciclar la materia orgánica que llega al fondo marino. (Brunetti, 2014)

2.4. Investigaciones a nivel mundial

En el mundo la utilización de los recursos geotérmicos presentes en las ventilas hidrotermales es un campo aún poco explorado debido a los grandes retos que este representa. En los recursos profundos el ambiente es altamente hostil alcanzando presiones de hasta 20 [MPa], temperaturas cercanas a los 0 [°C] debido a la ausencia de luz solar y un alto ambiente corrosivo cercano a las ventilas. En profundidades someras el ambiente presenta temperaturas un poco menos altas y una menor presión, pero la presencia de agentes corrosivos y ácidos sigue presente. Por todos estos hechos la implementación de dispositivos para altas profundidades ha sido poco explorada, sin embargo, investigadores en todo el mundo han comenzado a mostrar interés en la captación de estos recursos países como China, Estados Unidos, Italia, Indonesia, India Japón y México son pioneros en el diseño de dispositivos capaces de captar el fluido hidrotermal y producir energía eléctrica.

2.4.1. China

En China investigadores de la Universidad de Zhejiang han desarrollado dos dispositivos capaces de obtener energía eléctrica a través del uso del efecto *Seebeck*, el cual será explicado posteriormente, estos dispositivos son: *Thermoelectric cap* y *Thermoelectric converter*.

2.4.2. Thermoelectric cap

El dispositivo *Thermoelectric cap* fue desarrollado por los investigadores Yu Xie, Shi-Jun Wu, Can-Jun Yang, tiene como objetivo principal el brindar una alternativa a las baterías convencionales utilizadas en sensores dedicados al monitoreo del fondo marino y planea ser una opción amigable con el medio ambiente, compacto y eficiente. Está diseñado para poder cubrir la demanda promedio de energía que tienen los sensores marinos la cual se encuentra entre 1 a 250 [mWe]. (Yu, et al., 2015)

El dispositivo consiste en 1 tubería de conducción, 1 coraza protectora, 2 disipadores de calor, 2 tapas finales, 2 cámaras eléctricas, 2 ventanas transparentes, 12 piezas conductivas, 12 generadores termoeléctricos (TEG) (Fig. 17). (Yu, et al., 2015)

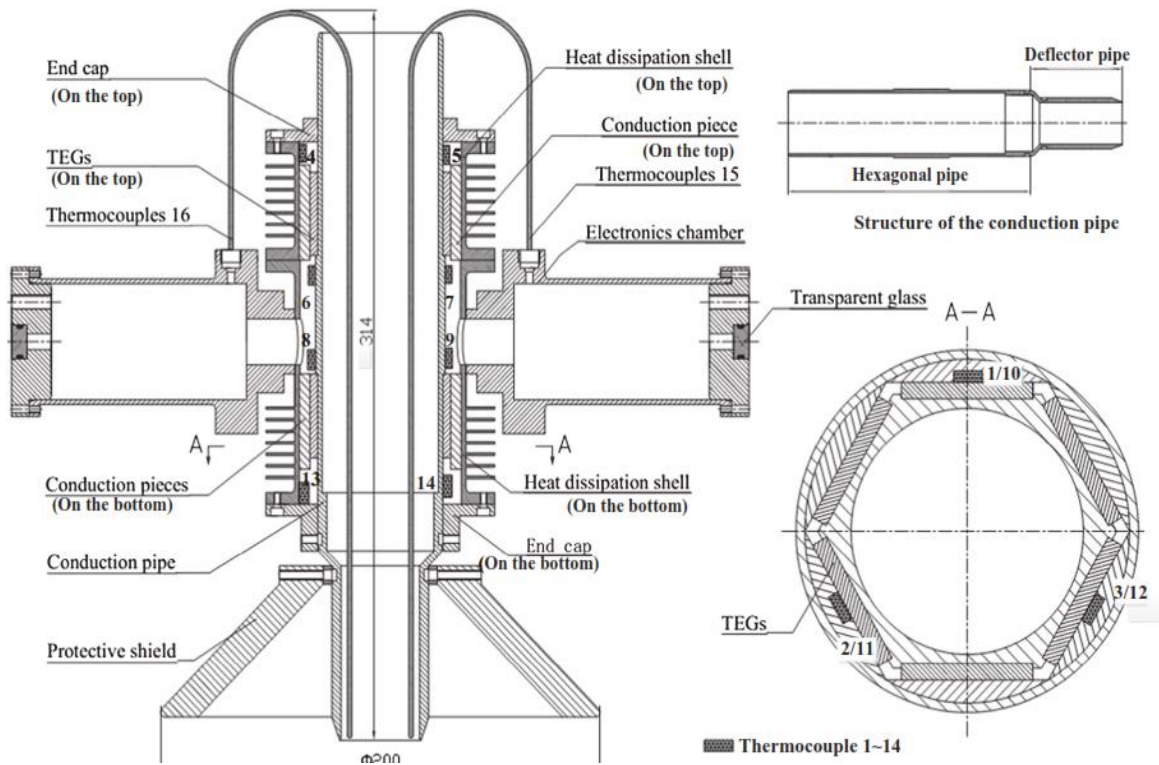


Fig. 17 " Thermoelectric cap (Yu, et al., 2015) "

La conversión del gradiente de temperatura en energía eléctrica se realiza mediante el uso del efecto *Seebeck* el cual crea un voltaje en presencia de una diferencia de temperatura entre dos metales o semiconductores homogéneos. La diferencia de temperaturas entre los metales crea un flujo de electrones entre ambos produciendo una diferencia de potencial (Fig. 18).

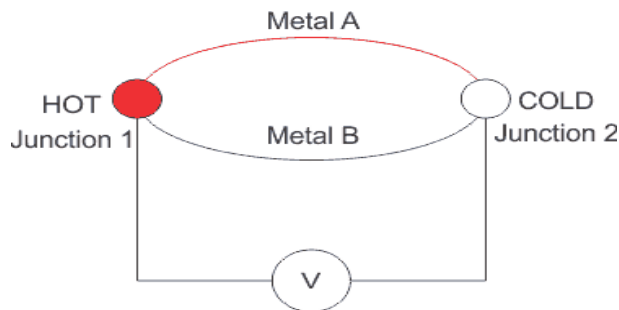


Fig. 18 " Efecto Seebeck (Electrical4U, 2018)"

El dispositivo de prueba fue colocado en las cercanías del islote Kueishantao en las coordenadas (24° 5'N, 121°55'E) obteniendo una generación de 0.2 a 0.5 [W] estos rangos de operación se obtuvieron con una ventila *white smoker* con una temperatura promedio de 70 [°C]. El dispositivo fue desplegado en un tiempo de 24 horas anclado mediante el uso de cables metálicos a una profundidad de 30 [m] (Fig. 19). (Yu, et al., 2015)

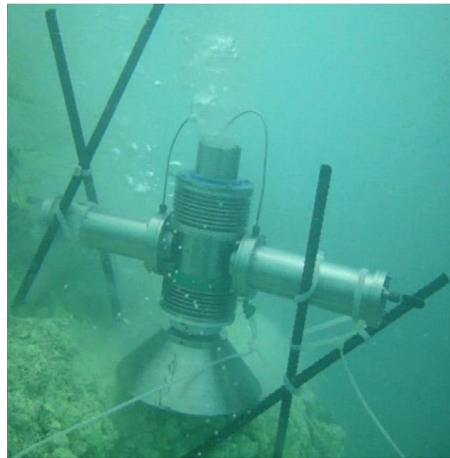


Fig. 19 " Colocación del dispositivo sobre una ventila hidrotermal (Yu, et al., 2015) "

Los termopares del dispositivo registraron una temperatura en el sitio caliente de 48.9 [°C] y en el sitio frío de 33.7 [°C] lo que generó una eficiencia de Carnot en los generadores termoeléctricos de 4.72 % mientras que en la parte inferior de la tubería de conducción se tomaron lecturas de 42.25 [°C] en la parte caliente y 31.6 [°C] en la parte fría obteniendo una eficiencia de 3.45 % De acuerdo a las medidas tomadas se estima que aproximadamente el 50 % de la energía captada se disipada al ambiente a través de la campana. (Yu, et al., 2015)

El potencial que se puede observar en la campana es alto y en futuras investigaciones se planea aumentar la eficiencia de conducción de la tubería mejorando así la captación de energía térmica e incrementando la cantidad de energía eléctrica generada.

2.4.3. Thermoelectric converter

El dispositivo *thermoelectric converter* fue desarrollado por los mismos investigadores responsables del proyecto *thermoelectric cap* brindando una segunda opción a los métodos de

captación de energía térmica en el fondo marino para su uso en aplicaciones de monitoreo y alimentación de vehículos marinos. Este dispositivo planea la captación del fluido hidrotermal antes de ser expulsado por la ventila ya que posteriormente el fluido disipa una gran cantidad de energía al medio ambiente.

Está constituido por 1 tubería de conducción de calor, 4 generadores termoeléctricos, 4 bloques de conducción, 1 cámara de aislamiento térmico, 1 disipador de calor, una carcasa protectora y una tapa final (Fig. 20). (Yu, et al., 2015)

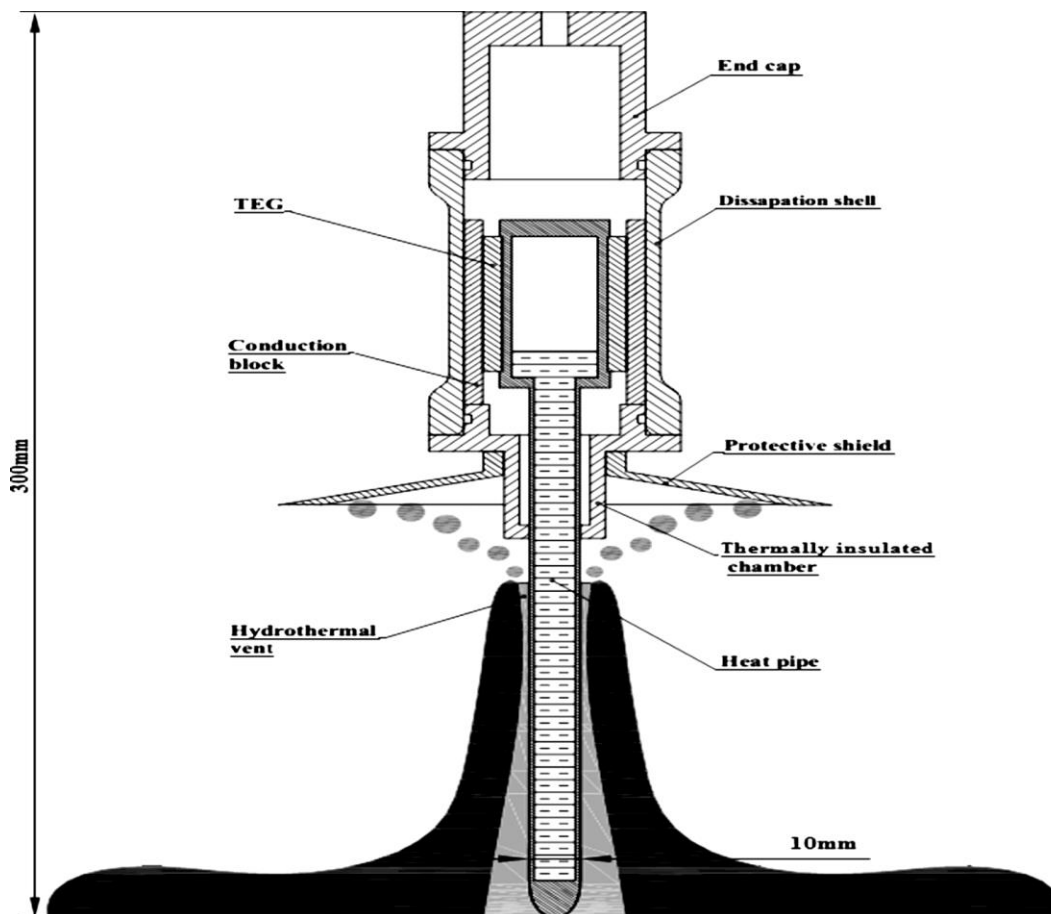


Fig. 20 " Componentes del dispositivo Termoelectric converter (Yu, et al., 2015) "

Los materiales de construcción son titanio y aluminio para mejorar la conducción de calor, la resistencia a la corrosión y la resistencia a la presión la cual llega hasta los 45 [MPa]. El equipo tiene

un peso total de 0.4 [kg] y funciona basado en el efecto *Seebeck* como medio de conversión del gradiente térmico en una diferencia de potencial.

El prototipo fue probado en campo durante diciembre de 2014 hasta enero de 2015 en el crucero DY35 (LegII), con ayuda del sumergible Jiaolong, a una profundidad de 2765 [m] en *Dragon Flag Field* en las coordenadas (37°47' S, 49°39' E) ubicado en el suroeste de la cresta India. Dada la profundidad a la cual se colocó el dispositivo este solo era desplegado durante 15 minutos donde se registró una temperatura cercana a los 379 [°C] (Fig. 21). (Yu, et al., 2015)



Fig. 21 " Dispositivo colocado en la cresta India (Yu, et al., 2015) "

El dispositivo cuenta con un *booster* DC/DC para incrementar el voltaje de salida y una eficiencia del 50 %. Registró una salida mayor de 10.8 [V] y 363 [mA]. La potencia de salida del impulso DC / DC fue de 2.6–3.9 [W] durante la prueba de campo con un gradiente de temperatura de 127 [°C]. El dispositivo registró una potencia de entrada de 245 [W] de los cuales las pérdidas principales se deben por efectos de convección y radiación. Este dispositivo puede ser utilizado como fuente de alimentación para aquellos sensores cuyo consumo sea del orden de mili Watts mientras que para dispositivos cuyo consumo es del orden de los Watts puede ser una alternativa para recargar las baterías que utilizan ya que brinda una potencia continua de 2.6 a 3.9 [W]. (Yu, et al., 2015)

2.4.4. Italia

En Italia investigadores de la empresa *EXERGY* y *Eurobuilding* han desarrollado dispositivos que permiten el aprovechamiento del gradiente geotérmico submarino, la empresa *EXERGY* diseñó y manufacturó una turbina multi etapa compacta la cual es utilizada en ciclos Rankine orgánicos y propuesta para su uso en ventilas hidrotermales por investigadores de indonesia. *Eurobuilding* tiene un proyecto basado en la utilización del vapor emanado por el volcán submarino Marsili. Aunque no se trata de una ventila hidrotermal el principio de funcionamiento es el mismo ya que el volcán es una manifestación geotérmica producto del movimiento de las placas tectónicas al igual que las ventilas, la diferencia radica en el hecho de que el agua es calentada en el volcán por la interacción con el magma emanado en el cráter y en un a ventila hidrotermal el proceso de calentamiento de agua es realizado por el contacto con roca caliente en la cercanía al manto inferior.

2.4.4.1. Proyecto Marsili

El proyecto Marsili está desarrollado por un equipo multidisciplinario donde participan investigadores del Instituto Nacional de Geofísica y Volcanología, Instituto de Geología Marina, de la CNR de Bolonia y de la Universidad de Chieti. (Eurobuilding, 2019)

El proyecto Marsili se creó con el objetivo de crear una central de energía geotérmica en el mar, explotando el enorme reservorio de fluidos geotérmicos del submarino volcán Marsili, en el medio del sur del mar Tirreno. Plantea la extracción de los recursos geotérmicos que emana el volcán Marsili revelando la presencia de decenas de millones de metros cúbicos de fluidos de alta energía. Estos pueden garantizar, para 2020, una producción anual de alrededor de 4 [TWh] de electricidad equivalente a la producción de una central nuclear de tamaño mediano. (Eurobuilding ;, 2019)

El proceso de extracción se realizará directamente en el sitio con el objetivo de disminuir las pérdidas energéticas que se puedan generar en el proceso de transportar los recursos energéticos. El dispositivo está basado en el funcionamiento de una planta convencional compuesta por: 1 turbina de vapor, 1 Generador, 1 Transformador y 1 Sistema de refrigeración y condensación de agua marina. El sistema de soporte para la maquinaria utilizada para la producción de electricidad se

inspirará en las plataformas utilizadas en la industria petrolera con modificaciones y adaptaciones sustanciales teniendo en cuenta el peso de las unidades de producción y la mejor estabilidad en relación con las condiciones del mar, para garantizar el mayor número de horas de producción de electricidad. (Eurobuilding, 2019)

La inversión total para obras e infraestructura se estima alrededor de 2000 millones de euros. El mayor impacto en los costos es el de las plataformas de soporte para las plantas de producción, representando el 41 %, que deben estar especialmente diseñadas. El transporte de energía eléctrica se realizará mediante el uso de cables submarinos habituales para el transporte de electricidad de alta tensión y tendrán un costo total de unos 300 millones de euros, para respaldar los 800 [MWe] del objetivo estratégico, para una conexión a tierra firme. aproximadamente a 150 [km]. El primer objetivo que se plantea el proyecto a corto/mediano plazo es la instalación de una primera unidad de producción para 2015, con una capacidad de al menos 200 [MWe]. En esta primera fase se prevé una inversión de 400 millones de euros, de los cuales 100 millones será destinados para los pozos geotérmicos y la planta de producción y 300 millones para la plataforma. (Eurobuilding, 2019)

El proyecto Marsili tiene un alto potencial, una gran organización y apoyo para ser realizado, sin embargo, actualmente no se encuentran datos sobre su planta de producción ya que su objetivo planteaba ponerla en operación en el año 2015 pero al día de hoy en el año 2020 no se pueden encontrar datos sobre dicha planta.

2.4.4.2. Turbina de salida radial

En Italia los investigadores Claudio Spadacini, Lorenzo Centemeri, Michele Danieli, Dario Rizzi, Luca Xodo de la empresa *EXERGY* han desarrollado y manufacturado una turbina multi etapa con el objetivo de ser utilizada en ciclos orgánicos.

Esta turbina fue desarrollada para su implementación en ciclos orgánicos desde el año 2013. *EXERGY* unificó en su diseño la simplicidad de la turbina axial con la eficiencia de la turbina de entrada radial. La turbina está compuesta por una serie de etapas radiales alternando un rotor y un

estator por etapa. El sistema logra acoplar el disco de la turbina con el generador mediante el uso de cojinetes y sellos que soportan el eje saliente (Fig. 22). (Spadacini, et al., 2015)

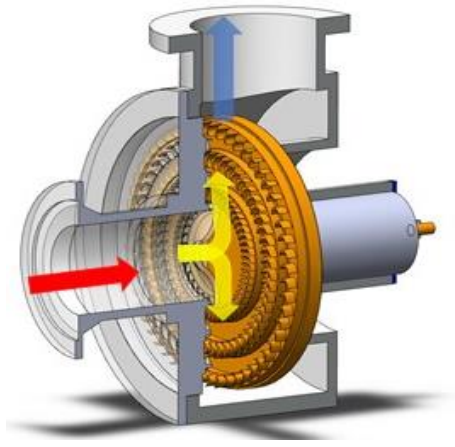


Fig. 22 " Turbina de salida radial (Spadacini, et al., 2015) "

Esta configuración en la turbina ofrece las siguientes ventajas (Spadacini, et al., 2015):

- Un solo disco multi etapa.
- Bajo perfil de vibración.
- La diferencia de presiones favorece la expansión del fluido de trabajo.
- La baja velocidad de rotación favorece el acoplamiento con el generador.

Como se puede observar el diseño de la turbina es óptimo para su implementación en sistemas de captación de recursos geotérmicos submarinos ya que ofrece una opción compacta y eficiente en el uso de un sistema sumergible.

2.4.5. India

Los investigadores Arundhuti Banerjee, Tanusree Chakraborty y Vasant Matsagar del *Indian Institute of Technology Delhi* han desarrollado un dispositivo capaz de aprovechar el gradiente geotérmico presente en las zonas de alta energía mediante el uso del efecto *Seebeck* combinado con el uso de generadores eólicos.

2.4.5.1. Dispositivo basado en Efecto *Seebeck*

Los investigadores proponen el uso de un sistema híbrido utilizando plataformas *off shore* y turbinas eólicas (Banerjee, et al., 2018). En esta investigación no hacen un uso directo de la ventila hidrotermal, pero plantean el uso de la fuente de calor que produce estas ventilas, su dispositivo está pensado para ser aplicado en las zonas cercanas a los dorsales oceánicos y el anillo de fuego ya que son zonas que pueden presentar un gradiente geotérmico aprovechable por la alta actividad tectónica que se presenta en el lugar.

El sistema está compuesto por un generador termoeléctrico y un condensador conectados a un transformador que llevará la energía eléctrica producida a la superficie mediante el uso de un cable submarino. (Banerjee, et al., 2018)

Se plantea la utilización de dos tubos de 2 [km] y 0.2 [m] de diámetro, parecidas a las utilizadas en la extracción de petróleo, para inyectar agua y extraer calor de la corteza oceánica. La primera tubería toma agua del fondo marino y la bombea a la corteza oceánica a una profundidad de 2000 [m] a partir del nivel del mar. Esta agua será calentada por la roca caliente que está cercana al manto inferior para después ser extraída por la segunda tubería y llevada al generador termoeléctrico donde entrará en contacto con agua fría para generar un gradiente térmico aprovechado por el efecto *Seebeck*. Por último el agua remanente del procesos será reinyectada al océano(Fig. 23). (Banerjee, et al., 2018)

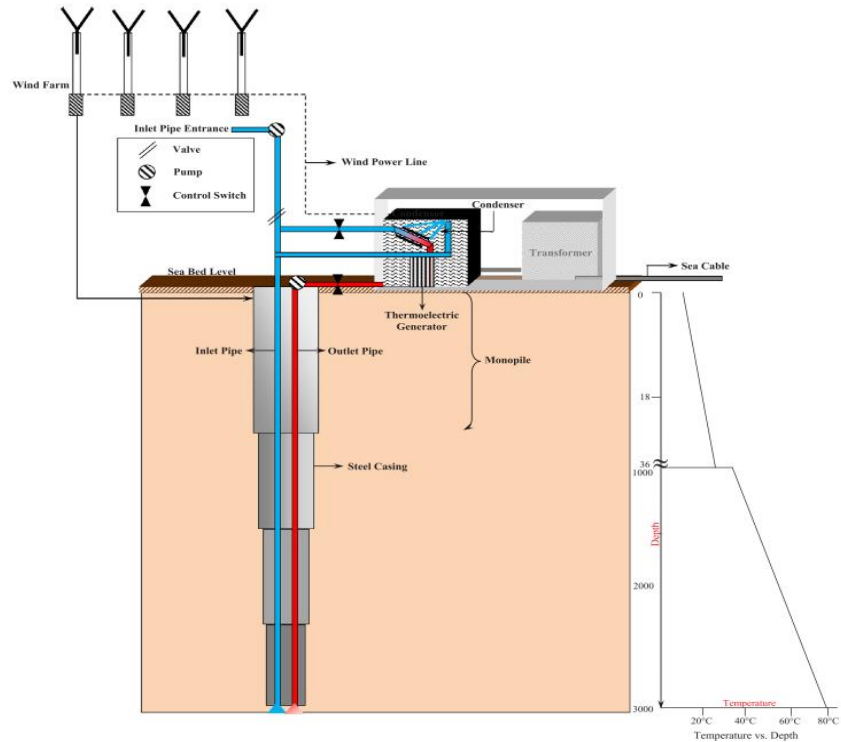


Fig. 23" Ciclo de funcionamiento del dispositivo basado en el efecto Seebeck (Banerjee, et al., 2018) "

Los investigadores reportaron que la máxima potencia registrada en la simulación fue de 242 [kW] cuando la temperatura de entrada y salida al generador termoelectrico era de 100 [°C] y 15 [°C] respectivamente. Estiman que la inversión necesaria para la construcción de la planta es de 51 a 135 millones de dolares en el año 2017. (Banerjee, et al., 2018)

2.4.6. Indonesia

Los investigadores Aryadi, Rizal y Fadhli del departamento de ingeniería mecánica en el *Institute Technology of Bangdun* han desarrollado una propuesta de la captación y uso del recurso geotérmico emanado por las ventilas hidrotermales. Este sistema basa su funcionamiento en el ciclo Rankine orgánico.

2.4.6.1. Dispositivo basado en Ciclo Rankine Orgánico

El sistema propuesto plantea la extracción del recurso en el sitio colocando un dispositivo sumergible basado en el funcionamiento de un Ciclo Rankine Orgánico. El objetivo del sistema es

garantizar la producción de energía eléctrica aprovechando el flujo de agua caliente emanado por la ventila hidrotermal. El dispositivo se compone de 1 bomba, 1 intercambiador de calor de forma cónica, 1 turbina multi etapa y un condensador (Fig. 24). (Y, et al., 2016)

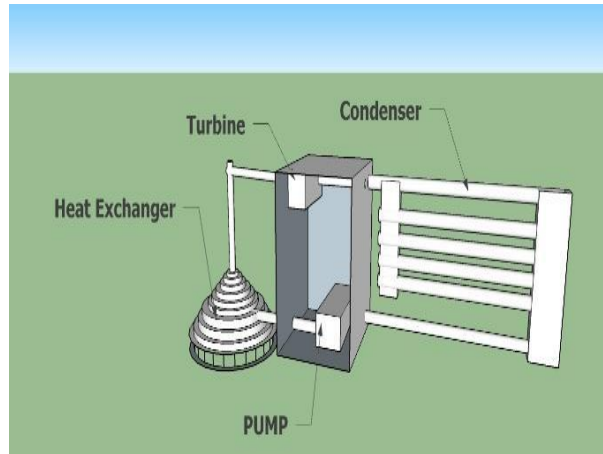


Fig. 24 "Ciclo Orgánico Rankine Sumergible (Y, et al., 2016) "

El diseño del sistema propone dos modificaciones al ciclo Rankine orgánico la primera es el uso de un intercambiador de calor de forma cónica colocado en la parte superior de la chimenea con el cual garantizan una mayor área de contacto y una mayor tasa de transferencia de calor y la segunda es el uso de una turbina multi etapa desarrollado por la empresa *EXERGY* la cual funciona mediante una entrada de agua axial y una doble salida de agua de forma radial. (Y, et al., 2016)

Mediante el uso de un cálculo conservativo considerando una eficiencia mecánica del 80 %, una eficiencia de recuperación de calor de 10 %, una velocidad de flujo de 1 [m/s], una profundidad de 200 [m] y un diámetro de ventila de 0.6858 [m] estiman una potencia de 15 [MWe]. (Y, et al., 2016)

2.4.7. Estados Unidos

En Estados Unidos se han desarrollado diversas investigaciones sobre el aprovechamiento de los recursos geotérmicos emanados por las ventilas hidrotermales. Por su ubicación geográfica el país tiene un alto potencial para la extracción de dichos recursos ya que gran parte de la costa oeste se encuentra cercana a un sistema dorsal. Los proyectos propuestos en este país se basan en la obtención de energía eléctrica, aunque también proponen diversas aplicaciones como lo son:

desalación de agua de mar, extracción de minerales del fondo oceánico y generación de biocombustible.

Estas investigaciones son realizadas por: *Marshall Hydrothermal*, *MARITIME APPLIED PHYSICS CORPORATION* (MAPC), *Creare Inc.*, *Department of Organismic and Evolutionary Biology of Harvard University* en colaboración con el *Department of Microbiology of University of Massachusetts*.

2.4.7.1. Universidad de Harvard y Universidad de Massachusetts

Los investigadores Peter R. Girguis y James F. Holden proponen en el año 2012 el uso de la basta fauna microbiana que se encuentra en las cercanías a las ventilas hidrotermales para producir un biocombustible que posteriormente sea utilizado para la producción de energía eléctrica. Esta nueva propuesta de biocombustible deja de lado la utilización del etanol de maíz como una opción con mayor sustentabilidad y comercialmente viable. La producción requiere del desarrollo de un nuevo sistema de obtención de biocombustible a partir de la biomasa encontrada en las ventilas hidrotermales (Girguis & Holden, 2012)

Para la producción de energía eléctrica los investigadores plantean el uso de organismos hipertermofílicos los cuales producen hidrógeno en temperaturas cercanas a los 80 [°C]. El objetivo es utilizar los lodos residuales anaeróbicos de plantas de tratamiento de agua para la generación de hidrogeno y posteriormente generar un biocombustible el cual produzca energía eléctrica en el sitio utilizando la red de distribución eléctrica ya establecida. Esta opción plantea la ventaja de que los organismos hipertermofílicos puedan extraer sustancias orgánicas del lodo residual y al mismo tiempo reducir la cantidad de materia orgánica eliminando así los patógenos que puedan estar presentes. Aunque teóricamente su opción es viable a nivel mundial su enfoque es poco estudiado ya que es difícil que la generación de energía a base de hidrógeno supla la generación a base de combustibles fósiles, sin embargo, en Reino Unido se tiene un antecedente ya que en 2005 la utilización de sólidos municipales se utilizó para la producción de biogás generando 2500 [GWh/año] representando aproximadamente el 15 % de todas las energías renovables usadas en el país. (Girguis & Holden, 2012)

2.4.7.2. Creare inc.

Creare Inc. es una empresa desarrolladora e innovadora de tecnología avanzada para sistemas de potencia compactos. Entre sus desarrollos está el sistema *Turbo –Rankine* el cual pretende ofrecer una potencia de 20 [KW]. En sus investigaciones estima que las ventilas hidrotermales pueden ofrecer una potencia de hasta 60 [MWt]. El principal objetivo de su sistema es el producir energía eléctrica para alimentar sensores marinos remotos y recargar vehículos submarinos autónomos. (Creare inc., 2017)

La empresa *Creare Inc.* recibe apoyo de *The Office of Naval Research (ONR)* logrando en su primera etapa optimizar las operaciones de diseño, completar un diseño preliminar y probar prototipos de intercambiadores de calor. Su objetivo para investigaciones futuras es probar un prototipo completo del sistema. (Creare inc., 2017)

2.4.7.3. MARITIME APPLIED PHYSICS CORPORATION (MAPC)

La empresa *MAPC* desarrolló en 2013 un generador hidrotermoeléctrico de estado sólido, modular y escalable, el cual es llamado *Project Mercury*, para extraer energía de las ventilas hidrotermales, donde las presiones ambientales pueden superar poco más de 15 [MPa] y las temperaturas varían de 0 a 325 [°C] o más. El sistema se instaló en *Axial Seamount*, un volcán submarino a dos kilómetros bajo la superficie del océano en el Pacífico Noroeste y tiene como objetivo alimentar sensores de investigación submarinos, vehículos submarinos no tripulados y otros sistemas submarinos autónomos en ubicaciones remotas o profundas. (MAPC, 2013)

Aunque la empresa *MAPC* reporto que su sistema ya fue desplegado no proporciona datos sobre la energía obtenida y la eficiencia de dicho dispositivo.

2.4.7.4. Marshall Hydrothermal

El proyecto *Marshall Hydrothermal Recovery System* fue desarrollado por el inventor Bruce C. Marshall. Este sistema propone el uso de las ventilas hidrotermales no solo como una posible fuente

de generación de energía eléctrica sino también como un medio de obtención de minerales provenientes del flujo de agua de la chimenea. (Marshall, 2011)

El Sistema Marshall se compone por una estructura de base cónica que es lo suficientemente grande para rodear la ventila hidrotermal, lo que permite que un tubo de recuperación pase por el centro del cono llegando tan profundo como sea posible para recuperar el fluido caliente (Fig. 25). (Marshall, 2011)

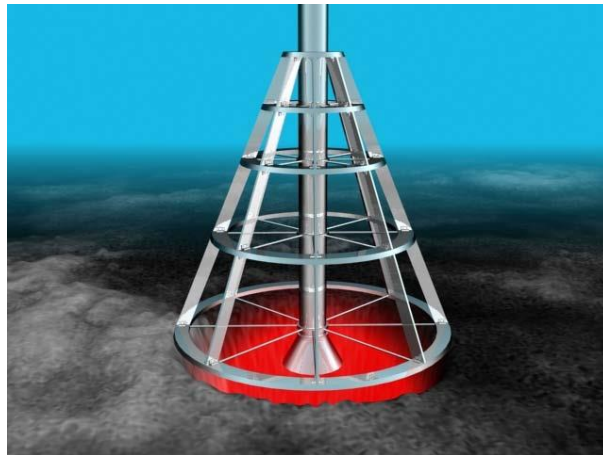


Fig. 25 " Estructura sistema Marshall (Marshall, 2011) "

Está propuesta es diseñada para súper ventilas hidrotermales con diámetros de varios metros, sin embargo, el sistema planea ser empleado para el aprovechamiento de múltiples ventilas hidrotermales, que, en su mayoría, tienen un diámetro promedio de 20 [cm] para lo cual se diseñó un sistema con varios tubos de recuperación (Fig. 26). (Marshall, 2011)

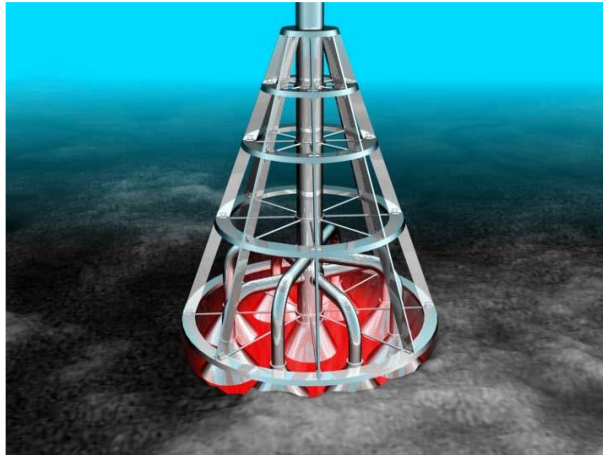


Fig. 26 " Sistema de múltiple obtención de flujo (Marshall, 2011) "

Además de la generación de energía eléctrica el sistema Marshall propone el aprovechamiento del agua marina para producir agua dulce y el uso de los minerales disueltos en el flujo de la chimenea como el primer sistema en el mundo de minería marina ofreciendo la ventaja de una mayor facilidad de extracción que la que se presenta en la minería terrestre (Fig. 27). Los minerales extraídos serán enviados en barco para su procesamiento en plantas terrestres y los residuos serán enviados mediante un tubo de retorno al fondo marino. (Marshall, 2011)

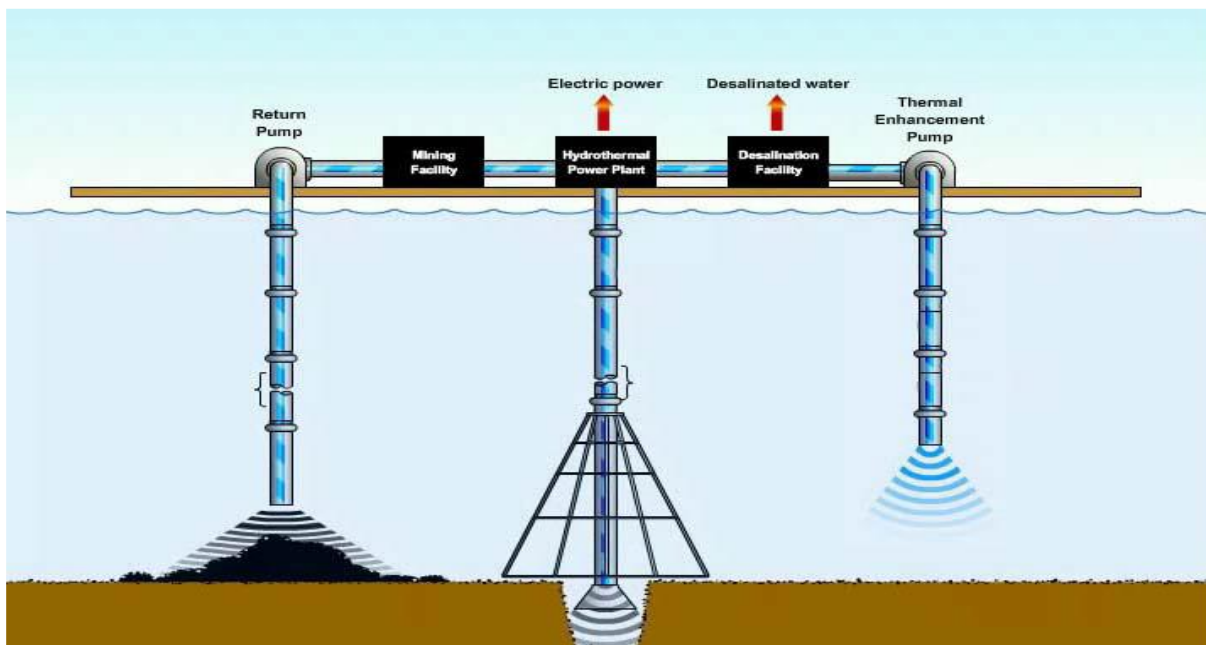


Fig. 27 " Minería marina (Marshall, 2011) "

Una segunda configuración opta por el uso de un ciclo cerrado en el cual el fluido de trabajo pasará por un intercambiador de calor colocado sobre la ventila para posteriormente ser llevado a la superficie donde se la extraerá la energía obtenida durante el proceso (Fig. 28). (Marshall, 2011)

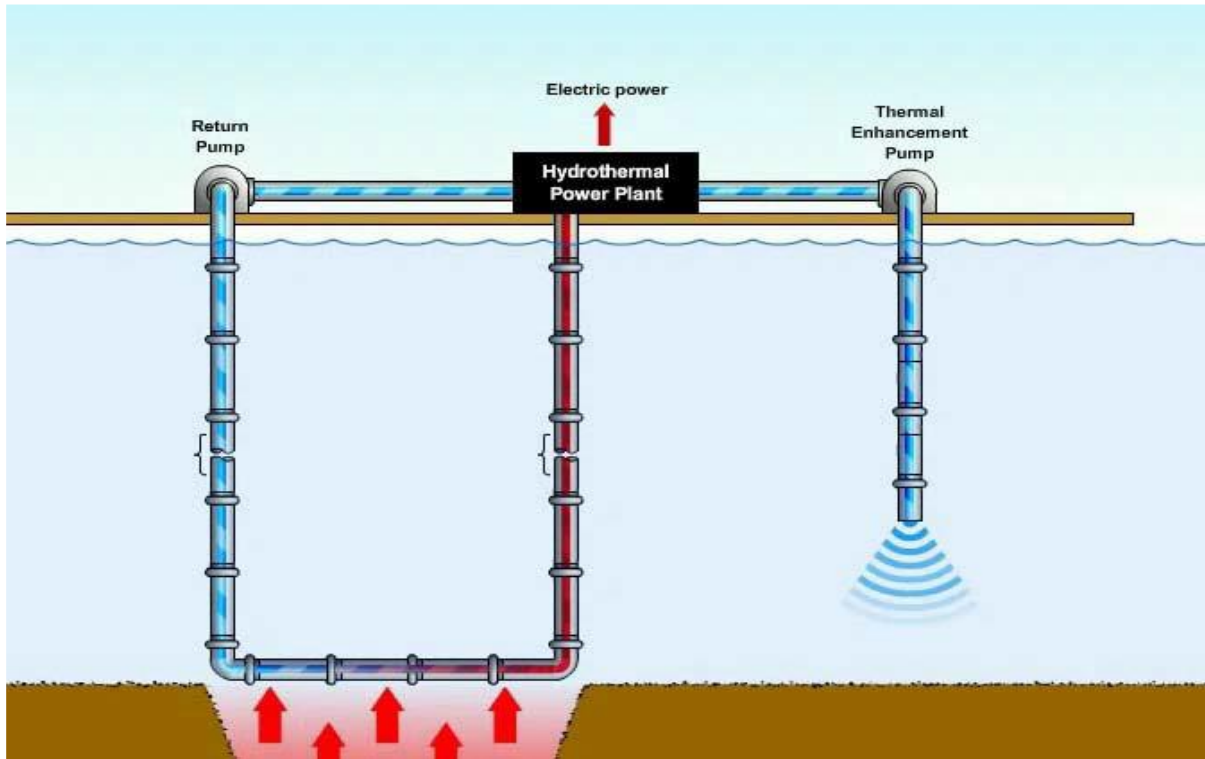


Fig. 28 " Segunda configuración del sistema Marshall (Marshall, 2011) "

Marshall prevé una generación de energía cercana a los 83 [MWe] considerando una ventila hidrotermal con un diámetro de 31 [cm], una temperatura de 340 [°C] y una eficiencia de turbina de 50 %. Pese a estos datos el sistema Marshall implica un grave impacto ambiental al ecosistema de la ventila ya que su colocación implica el perforar la zona donde habita este ecosistema para lograr anclar el cono, sin embargo, Marshall afirma que las ventilas colapsan y nacen todo el tiempo de manera aleatoria por lo tanto la solución sería el trasplante de la fauna a otra ventila cercana o el simple hecho de utilizar una de las cientos de ventilas existentes ya que el ecosistema puede ser regenerado en cualquier otra ventila que este por nacer.

2.4.8. Japón

Japón ha incursionado en el campo de las ventilas hidrotermales creando respiraderos artificiales durante el año 2010, uno de ellos es el C0014G el cual reporta un flujo vigoroso con una temperatura promedio de 309 [°C] a una profundidad de 1053 [m] en el campo hidrotermal Iheya North. (Yamamoto, et al., 2013)

Los investigadores Masahiro Yamamoto, Ryuhei Nakamura, Kazumasa Oguri, Shinsuke Kawagucci, Katsuhiko Suzuki, Kazuhito Hashimoto y Ken Takai han diseñado y construido un dispositivo basado en el efecto de óxido-reducción para evaluar el potencial energético de las ventilas hidrotermales para ser utilizadas como celdas de energía. (Yamamoto, et al., 2013)

2.4.8.1. Dispositivo basado en la oxidación-reducción

Mediante la realización de pruebas se midieron el potencial de óxido-reducción en el agua marina y en el flujo de las ventilas hidrotermales obteniendo una temperatura de 4 [°C] con 478 [mV] y 309 [°C] con 39 [mV] respectivamente. Observaron que entre la ventila hidrotermal y el agua marina existía una diferencia de potencial de 0.52 [V] lo que establecía la capacidad de generación de la ventila hidrotermal como celda de combustible. (Yamamoto, et al., 2013)

El sistema cuenta con un cátodo compuesto por un revestimiento de platino con una malla de titanio de 0.40 [m²], un ánodo compuesto por un tubo de titanio recubierto de iridio. El iridio y el platino son los encargados de catalizar el ácido sulfhídrico (H_2S) y el ánodo es insertado en el fluido de la ventila hidrotermal. Entre el cátodo y el ánodo se colocaron tres diodos emisores de luz para corroborar la generación de potencial (Fig. 29). (Yamamoto, et al., 2013)

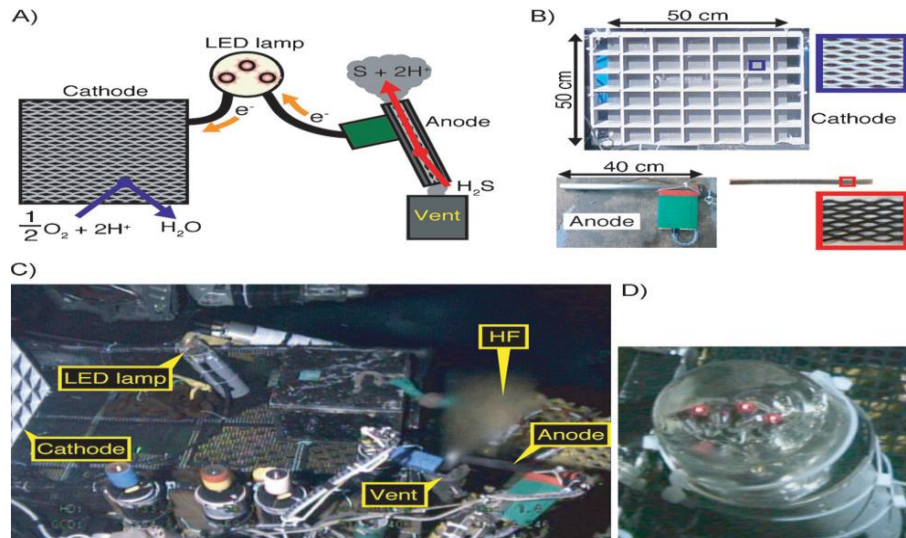


Fig. 29 " Configuración del dispositivo basado en la oxidación-reducción (Yamamoto, et al., 2013) "

La potencia estimada para el sistema era de 9.8 [mWe], sin embargo, se tomaron lecturas de hasta 21 [mWe]. Con la realización de la prueba de campo encontraron que la ventila hidrotermal es capaz de donar continuamente electrones provenientes del ácido sulfhídrico (H_2S) y del hidrogeno (H_2). Los investigadores estiman la ventila artificial C0014G mantiene un flujo de aproximadamente 3 [l/s] y puede ofrecer una potencia de hasta 2.6 [kWe]. Estos Resultados proporcionan la base para el desarrollo futuro de celdas de combustibles compuestas por agua marina y el fluido hidrotermal, las cuales puedan proporcionar un abasto continuo de energía eléctrica en aplicaciones a gran escala. (Yamamoto, et al., 2013)

2.4.9. México

México es uno de los países pioneros en el estudio del potencial energético de las ventilas hidrotermales. Por su ubicación geográfica cuenta con una zona rica en recursos hidrotermales submarinos localizada en la costa del Océano Pacífico mexicano y en el Golfo de California donde podemos encontrar recursos someros y profundos a más de 3000 [m] (Suárez, et al., 2005).

Desde finales del siglo XX hasta el día de hoy diversas universidades del país han tomado interés en el tema logrando así un mayor desarrollo en el estudio de ventilas hidrotermales. Dichas universidades han reportado sus hallazgos a lo largo de estos años. En este apartado veremos algunas de las investigaciones realizadas en México.

La Universidad Nacional Autónoma de México en la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovables fundó el proyecto IMPULSA IV el cual fue el uno de los pioneros en plantear la posibilidad de la extracción y conversión del recurso geotérmico submarino. Este proyecto desarrolló un sistema de captación sumergible (Fig. 30) el cual sirvió de referencia para múltiples investigaciones a nivel mundial. (Hiriart, et al., 2010)

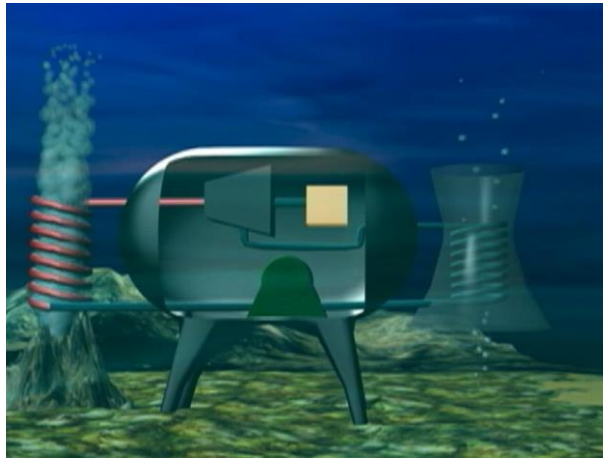


Fig. 30 " Proyecto IMPULSA IV (Hiriart, et al., 2010)"

El sistema funciona mediante el uso de un ciclo Rankine orgánico. Consta de una turbina, un generador, una bomba, un evaporador en forma de bobina cónica, un sistema de control y un condensador en forma de torre de enfriamiento hiperbólica. El evaporador se coloca directamente en el flujo de la chimenea y el condensador se coloca fuera del alcance del calor emanado por la ventila hidrotermal para aumentar el gradiente térmico entre estos y así poder aumentar la eficiencia de Carnot. (Hiriart, et al., 2010)

El Dr. Gerardo Hiriart, presentó una estimación sobre la energía térmica de las ventilas hidrotermales a nivel mundial y el aprovechamiento que tendría el dispositivo presentado por el proyecto IMPULSA IV. Reportó que la eficiencia de transformación sería del 40 %, partiendo de estas consideraciones se hizo el análisis para una ventila de 1 [m] de largo por 10 [cm] de ancho, una velocidad de flujo de 1 [m/s] y una temperatura de 250 [°C] obteniendo 100 [MWt/m] y hasta 4 [MWe/m]. (Hiriart, 2011)

Mediante un cálculo conservativo se estima una extensión preliminar de 10 [km] para la fosa Wagner ubicada en el Golfo de California. Si se aprovechará el 1 % de la energía térmica que fluye de la fosa se podría generar hasta 100 [MWe]. Para la Fosa de Guaymas en Sonora se estima una generación preliminar de 500 [MWe]. A estas cifras preliminares se le podría sumar las fuentes no cuantificadas como lo son: Canal de las ballenas, Punta Mita y La Bufadora. (Hiriart, 2011)

Los investigadores Nadia E. Suárez-Bosche, Mario Suárez, César Arriaga, Fernando Samaniego V. y Víctor Delgado reportan que la zona de la costa del Océano Pacífico cuenta con un potencial aproximado de $1123 \left[\frac{MWt}{km^3} \right]$ con una temperatura promedio de 350 [°C]. En punta Banda encontraron manifestaciones hidrotermales a tan solo 0.5 [km] de la costa a una profundidad de 30 [m] con una temperatura que va desde los 90 a los 140 [°C]. En estas zonas proponen instalar un sistema de plataformas, parecida a las utilizadas en las industrias petroleras, para colocar un sistema de inyección-extracción. En todo el Golfo de California estiman un potencial cercano a los 97 000 [MWt] por 30 años asumiendo una reserva de 5 [km] de ancho por 1600 [km] de longitud y 0.6 [km] de espesor a una temperatura promedio de 330 [°C]. (Suárez, et al., 2005).

La Dr. Rosa María Prol, ha dado grandes contribuciones al estudio del Golfo de California en el área de ventilas hidrotermales estimando el potencial energético y la composición física y química de algunas zonas de interés en el Golfo. Reportó que en Bahía Concepción los recursos hidrotermales se encuentran desde los 5 hasta los 15 [mbnm], con temperaturas que van desde los 50 hasta los 87 [°C] a una profundidad de 10 [cm] en los sedimentos, con una composición gaseosa de dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2) con 44 % y 54 % respectivamente. En esta bahía se pueden observar descargas a poca profundidad e incluso se presentan lugares donde el agua solo cubre la descarga durante la marea alta reportando valores de hasta 62 [°C] donde no se forma chimenea ya que los precipitados son arrastrados por la marea. (Prol, et al., 2004)

En sus investigaciones ha reportado la presencia de recursos someros en la zona de Punta Banda, Bahía Concepción y Punta Mita. Aunque la formación de ventilas hidrotermales se ve relacionado con efectos del vulcanismo en este caso se debe a efectos de la extensión tectónica.

En el área de Punta Mita se encuentran sistemas hidrotermales someros a 500 [m] de la costa con temperaturas de 85 [°C] a 10 [mbnm]. La emanación de estas ventilas se basa en una mezcla de gas principalmente por nitrógeno (N_2) con 88 % y metano (CH_4) con 12 % y agua con una composición enriquecida por *Si, Ca, Li, B, Ba, Rb, Fe, Mn y As* en roca basáltica y parcialmente cubierta por sedimentos sin consolidar. El sistema de recarga se realiza mediante agua meteórica obtenida de los montes adyacentes. (Canet & Prol Ledesma, 2006)

En Punta Banda se reporta una temperatura de descarga de 102 [°C] y se estima una temperatura de reservorio promedio de 19 hasta 213 [°C] la composición del gas se asemeja a la reportada en Punta Mita y el agua es una mezcla de agua meteórica y agua marina. (Canet & Prol Ledesma, 2006)

Como se puede observar en México la investigación sobre ventilas hidrotermales se ha enfocado al área de Baja California y Nayarit y se han hecho estimaciones de la potencia que se podría aprovechar de dicho sitio. Aunque los estudios realizados en el país sobre aprovechamiento de la energía emanada son varios solo el proyecto IMPULSA IV ha propuesto un diseño capaz de realizar la captación y generación de energía eléctrica a través de las ventilas hidrotermales.

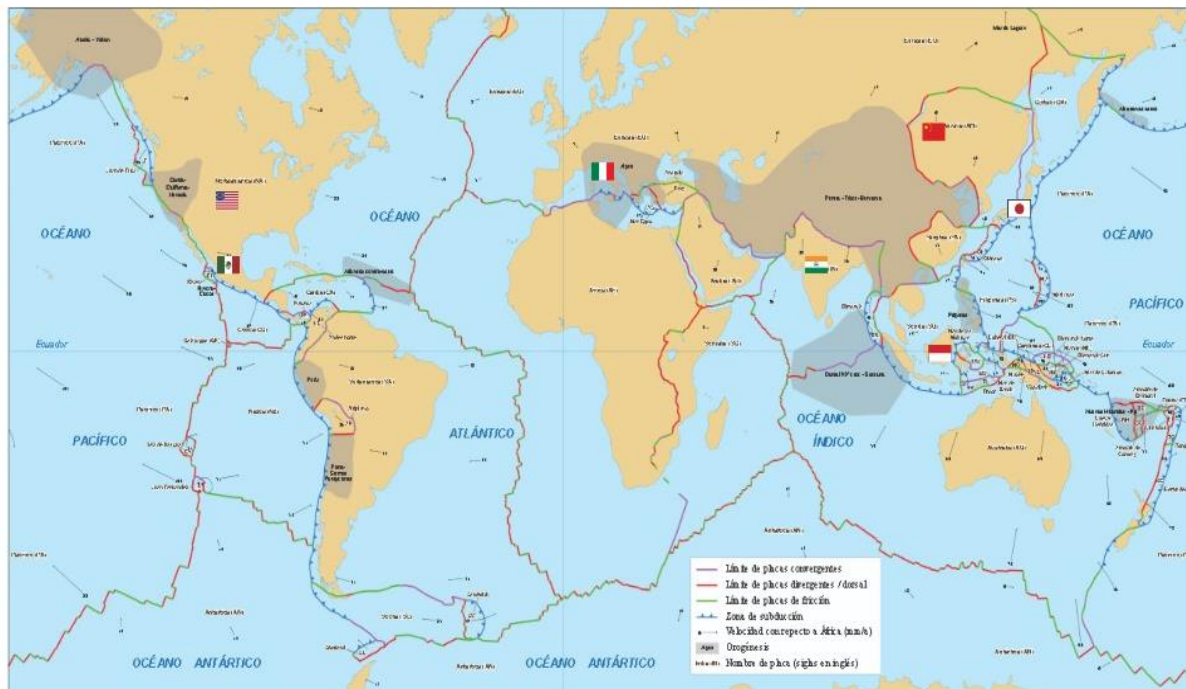
Conclusión del capítulo

El descubrimiento de las ventilas hidrotermales es relativamente joven y su formación es un proceso complejo que requiere de condiciones geográficas únicas. Cada ventila tiene un diámetro y configuración distinto lo que hace que el diseño de un dispositivo universal para la captación de los recursos geotérmicos sea difícil. México es uno de los países que cuenta con las características geográficas necesarias para albergar actividad hidrotermal. Este recurso podría ser explotado y aplicado en proyectos que van desde usos directos, para recursos someros, hasta generación de energía eléctrica en el caso de los recursos profundos.

El desarrollo de un dispositivo universal de captación del recurso directamente en la ventila con lleva múltiples adversidades debido a la espontaneidad con la que surge y desaparece, es por ello que el diseño del sistema debe de centrarse en captar directamente la fuente de calor que da vida

a la ventila hidrotermal y no en la emanación. Con este diseño se evitaría la intrusión del sistema dentro de la comunidad biológica que se forma alrededor. Otro punto que se debe considerar es el ambiente hostil, en el cual será instalado, sometido a altas presiones y temperaturas por lo cual el proceso de diseño debe ser meticuloso en la selección de materiales.

Aunque en México se ha hecho una amplia investigación sobre el potencial que se podría obtener de las ventilas hidrotermales solo el proyecto IMPULSA IV de la Universidad Nacional Autónoma de México ha planteado la captación de dicho recurso. El proyecto desarrollado ha servido de referencia nivel mundial para la búsqueda de la óptima captación y utilización de este recurso. En la siguiente imagen se puede observar el resumen de las investigaciones a nivel mundial y su ubicación (Fig. 31).



Investigaciones			
Simbología	País	Institución	Proyecto
	CHINA	-Universidad de Zhejiang	-Thermoelectric cap -Thermoelectric converter
	ITALIA	-Eurobuilding -Exergy	-Proyecto Marsili -Turbina de salida radial
	INDIA	-Indian Institute of Technology Delhi	-Dispositivo basado en el efecto Seebeck
	INDONESIA	-Institute of Technology of Bangdun	-Ciclo Rankine Organico Sumergible
	E.U.A	-Universidad de Harvard -Universidad de Massachusetts -Create inc. -MAPC -Marshall Hydrothermal	-Biocombustible -Sistema Turbo-Rankine -Proyecto Mercury -Marshall Hydrothermal Recovery System
	JAPÓN	-Japan Agency of Marine-Earth Science and Technology -Riken Center for Sustainable Resource Science -Universidad de Tokio	-Dispositivo basado en el efecto de oxido-reducción
	México	-Universidad Nacional Autónoma de México	-Proyecto IMPULSA IV -Investigaciones de la Dr. Rosa María Prol

Fig. 31 “ Investigaciones a nivel mundial (Autor) ”

Capítulo 3. Estructuras termo-activas como dispositivo de captación del recurso geotérmico submarino

Como se pudo observar en el capítulo anterior el diseño de un dispositivo universal para la captación del recurso emanado por la ventila hidrotermal es difícil ya que cada ventila presenta diferentes dimensiones y tiempos de vida. Es por ello que en este trabajo el diseño será enfocado a un dispositivo que capte directamente la fuente de calor que da vida a la ventila. Con este diseño se prevé poder evitar las desventajas que se presentan en los dispositivos analizados anteriormente como es el caso de intrusiones biológicas, difícil instalación y pérdidas masivas de energía al captar directamente la fuente de calor evitamos la perdida de energía que se da en la salida de la ventila cuando el agua caliente emanada tiene contacto con el agua fría del mar.

Para lograr cumplir estas metas se analizará el uso de estructuras termo activas, particularmente de pilotes geotérmicos, los cuales son utilizados en bombas de calor y brindan una excelente opción para captar el calor almacenado en el subsuelo. Este análisis se realiza para corroborar la factibilidad de utilizar este sistema como dispositivo de captación de la energía térmica emanada cerca de las ventilas hidrotermales. Las estructuras termo-activas pueden ser la solución a las adversidades que se presentan en el ambiente marino garantizando la resistencia a la corrosión y a la alta presión al ser construidos con materiales diseñados para soportar estas condiciones. Estas características se pueden garantizar al ser estructuras utilizadas en los cimientos de diferentes construcciones donde se ven sometidas a altas cargas y ambientes hostiles.

El diseño de los pilotes geotérmicos es un área relativamente nueva donde se han realizado diversas investigaciones para mejorar el fenómeno de transferencia de calor entre el suelo y el pilote. Nuevas investigaciones plantean el uso de nano-fluidos como fluido de trabajo para maximizar el efecto de transferencia de calor, la utilización de nuevos materiales de construcción para la tubería principal mezclados con nano-partículas metálicas, cerámicas y poliméricas y la utilización de nuevos aditivos para la mezcla de concreto utilizada en el pilote geotérmico.

3.1. Pilotes geotérmicos

Los pilotes geotérmicos son estructuras termo-activas diseñadas para su uso en bombas de calor geotérmicas. Estas estructuras disminuyen el impacto ambiental generado en los procesos de acondicionamiento de espacios y funciona mediante el intercambio de calor entre el suelo y la cimentación del lugar que se quiere acondicionar.

Los pilotes geotérmicos son parte de las estructuras termo-activas las cuales principalmente se constituyen por tuberías en forma de U incrustadas en el suelo conocidos como intercambiadores de calor de pozo. La ventaja de este sistema es la adición de concreto lo cual aumenta el intercambio de calor, entre el suelo y la estructura, y no necesita de costos extras ya que estos pasan a formar parte de la cimentación de la estructura. (Brandl, 2006)

Al convertir la estructura de cimentación en captadores de energía geotérmica se logra ahorrar trabajo y espacio ya que todo el sistema queda incluido debajo de la estructura. Este sistema presenta la ventaja de aprovechar la energía del ambiente como agua, tierra o aire y permite refrigerar o calentar la edificación con un pequeño consumo de energía eléctrica. (Cárcel & Martínez, 2015)

La utilización de concreto mejora la conductividad térmica del proceso, y crea un medio adecuado para absorber la energía térmica. El arreglo de la tubería, en la mayoría de los casos, se coloca fijado a la estructura de refuerzo del cimiento de manera vertical y generalmente se utiliza tubería delgada de plástico con un espesor de 2 a 3 [mm] y un diámetro de 20 a 25 [mm]. (Brandl, 2006)

3.2. Uso de pilotes geotérmicos en bombas de calor

La bomba de calor geotérmica es una máquina térmica capaz de utilizar la diferencia de temperaturas entre el suelo y el ambiente para el calentamiento o enfriamiento de edificios. Las estructuras termo activas surgen como una alternativa para reducir el costo de instalación de una bomba de calor geotérmica. Estas estructuras se instalan en los cimientos, losas o muros de las edificaciones y aunque presentan una ventaja, para las bombas de calor geotérmica, la comprensión

de su comportamiento termo-mecánico esta aun en desarrollo y se carece de una metodología de diseño y análisis que evalué los diferentes mecanismos presentes en su funcionamiento (López, et al., 2017). Pese a la carencia de una metodología diversos investigadores a nivel mundial han comenzado el desarrollo de modelos que permiten explicar su compartimiento termico haciendo analogias a circuitos electricos.

La bomba de calor geotérmica es una maquina térmica compuesta por un circuito de expansión–compresión que se encarga de transmitir calor de una zona de baja energía a una de alta energía y se componen por tres elementos básicos los cuales son: circuito primario, circuito secundario y bomba de calor (Fig. 32). (López, et al., 2017)

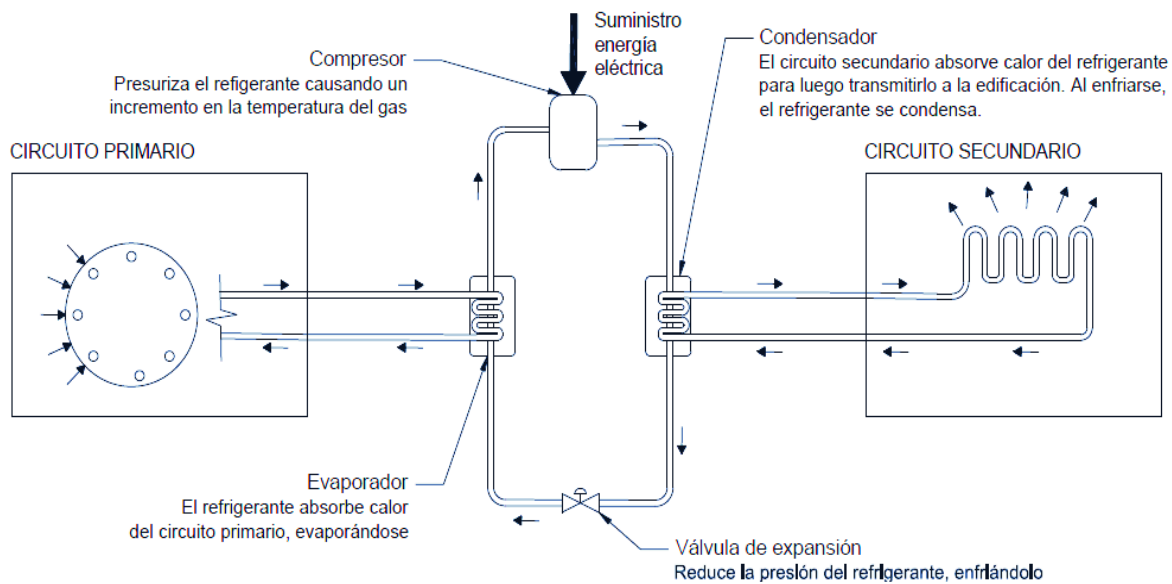


Fig. 32 " Elementos básicos de una bomba de calor geotérmica (López, et al., 2017) "

En este aparatado analizaremos el circuito primario que es donde se encuentran los pilotes geotérmicos y consisten en un sistema cerrado de tuberías instalado dentro de concreto el cual está en contacto con el terreno. Dentro de este circuito puede fluir agua, mezcla de agua con anticongelante, nano-fluidos o soluciones salinas. (López, et al., 2017)

El proceso de transferencia de calor en los pilotes geotérmicos se debe principalmente a los mecanismos de conducción y convección (Fig. 33) (López, et al., 2017). El mecanismo de

conducción se refiere a la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas. El fenómeno de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos, el primer mecanismo se refiere a la transferencia de energía debido al movimiento molecular aleatorio y el segundo involucra el movimiento la transferencia de energía debido al movimiento global o macroscópico del fluido. (Incropera & Dewiiit, 1999)

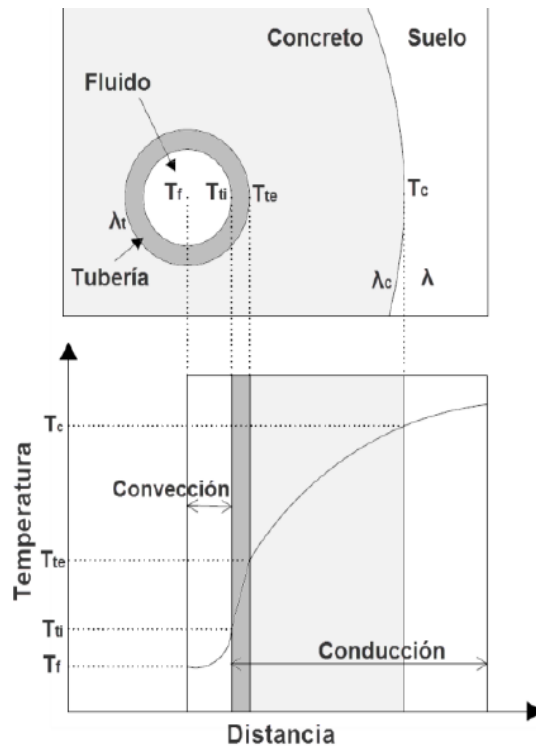


Fig. 33 " Mecanismos conductivos y convectivos en un pilote geotérmico (López, et al., 2017)"

Los efectos de conducción son usualmente los de mayor influencia en los suelos, sin embargo, estudios realizados sugieren que los efectos convectivos son significativos para velocidades de flujo mayores o iguales a $1 \times 10^{-3} \left[\frac{cm}{s} \right]$. (López, et al., 2017)

Estas estructuras termo-activas demuestran un alto rendimiento, sin embargo, el aumento en la transferencia de calor es un tema aún estudiado por diversos investigadores que plantean el uso de nuevos materiales compuestos por nano-partículas.

3.3. Construcción de los pilotes geotérmicos

La construcción de un pilote geotérmico se basa en la implementación de un intercambiador de calor dentro de una pila de cimentación. El termino pila de cimentación se refiere a un elemento estructural el cual cumple con la función de transmitir las cargas de la estructura hasta capas de suelo más profundas que tengan la capacidad de carga suficiente para soportarlas (Fig. 34). (Sánchez, 2014)



Fig. 34 " Pila de cimentación (Derco, 2016) "

Las tuberías de este intercambiador de calor pueden ser de polietileno de alta densidad (PEAD), policloruro de vinilo (PVC), propileno o incluso cobre, aunque este último material no es aconsejable ya que puede llegar a formar un par galvánico (Cárcel & Martínez, 2015), con un diámetro que va desde los 20 hasta los 25 [mm]. La configuración que puede llevar el intercambiador se basa en el tipo U y este puede ser de U simple, doble U, Triple U, en forma de W (Fig. 35), espiral (Fig. 36) y coaxial (Fig. 37). Investigaciones muestran que el tipo W es más eficiente desde el punto de vista energético y desde el punto de vista económico el de tipo U simple es preferible. (Galdámez, 2018)

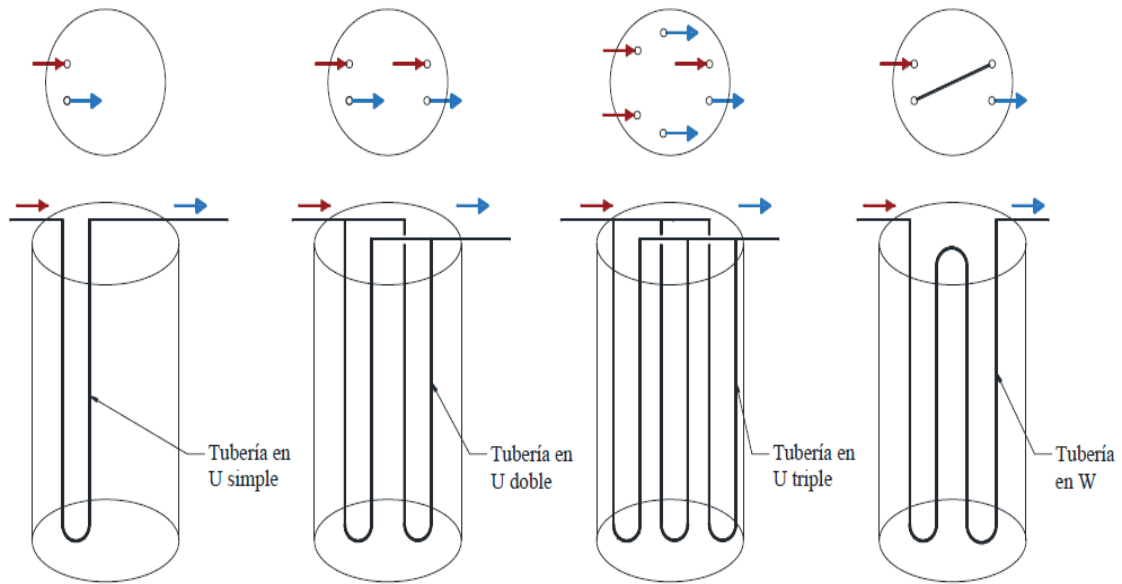


Fig. 35 " Configuración de la tubería de intercambio de calor tipo U simple, doble U, Triple U y Tipo W (Galdámez, 2018) "



Fig. 36 " Configuración de la tubería de intercambio de calor tipo espiral (Toledo, et al., 2002) "



Fig. 37 " Configuración de la Tubería de intercambio de calor tipo coaxial (Wieland, 2014) "

La colocación de la tubería dentro de la pila de cimentación depende del tipo de maquinaria que se utilice para perforar el pozo. El primer método consiste en el uso de una perforadora rotatoria (Fig. 38), en este caso, la tubería del circuito primario será colocada en la pared interna del acero de refuerzo (Fig. 39). Al finalizar la instalación se debe verificar que el circuito no presente fallas ni fugas para ello se coloca una válvula de bloqueo y un manómetro en la parte superior del circuito, una vez finalizada la revisión se agrega el concreto. (Galdámez, 2018)



Fig. 38 " Perforadora rotatoria (FDM, 2014) "



Fig. 39 "Instalación del circuito primario en la pared interna del pilote (groen energy, 2012) "

El segundo método consiste en el uso de una perforadora de hélice continua (Fig. 40). En este método primero se coloca el concreto y luego se instala el armado junto con la tubería del circuito primario instalándolo en el centro de la pila utilizando una varilla en el centro, como soporte, para facilitar la instalación (Fig. 41). (Galdámez, 2018)



Fig. 40 " Perforadora de hélice continua (LLamada-, 2012) "



Fig. 41 " Instalación del circuito primario en el centro de la pila de cimentación (Toledo, et al., 2002) "

En ambos métodos de construcción se recomienda presurizar la tubería antes del colado del concreto para evitar deformaciones de la tubería durante el proceso de endurecimiento del concreto. (Galdámez, 2018)

3.4. Tipos de configuración de la tubería en los pilotes geotérmicos

Como se mencionó anteriormente la configuración del pilote geotérmico puede variar entre distintas configuraciones, de acuerdo al modo en el cual se acomoda la tubería dentro del pilote, las cuales son: tipo U simple, doble U, triple U, tipo W, helicoidal y coaxial. La elección del sistema se realizará acorde a las especificaciones que se necesiten cubrir ya que cada uno ofrece diversas ventajas de operación en costos o eficiencia.

El tipo de arreglo U simple es el más utilizado ya que brinda mayor facilidad de instalación y un menor costo, sin embargo, estudios han demostrado que el tipo doble U es más eficiente que la tipo U simple e incluso ha superado el desempeño de un intercambiador de calor multi-tubo (Fig. 42).

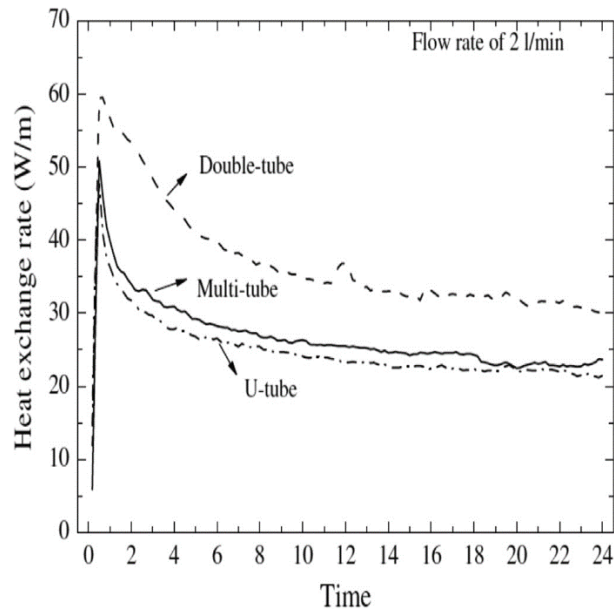


Fig. 42 "Comparación de desempeño de la configuración tipo U simple, doble U y multi-tubo (Faizal, et al., 2016) "

Si se compara el arreglo triple U con el tipo W el primero tiene una mayor transferencia de calor y energía de salida, pero si no se consideran los costos del tipo W este presenta una mayor eficiencia que cualquier otro tipo de arreglo en forma de U. (Faizal, et al., 2016)

El tipo de funcionamiento es otro factor que influye en la eficiencia de transferencia de calor de los pilotes geotérmicos, ya que mediante pruebas realizadas se ha demostrado que la tubería tipo triple U es más eficiente que el tipo W en condiciones de operación intermitentes y en condiciones de operación continua su funcionamiento fue similar (Fig. 43). (Faizal, et al., 2016)

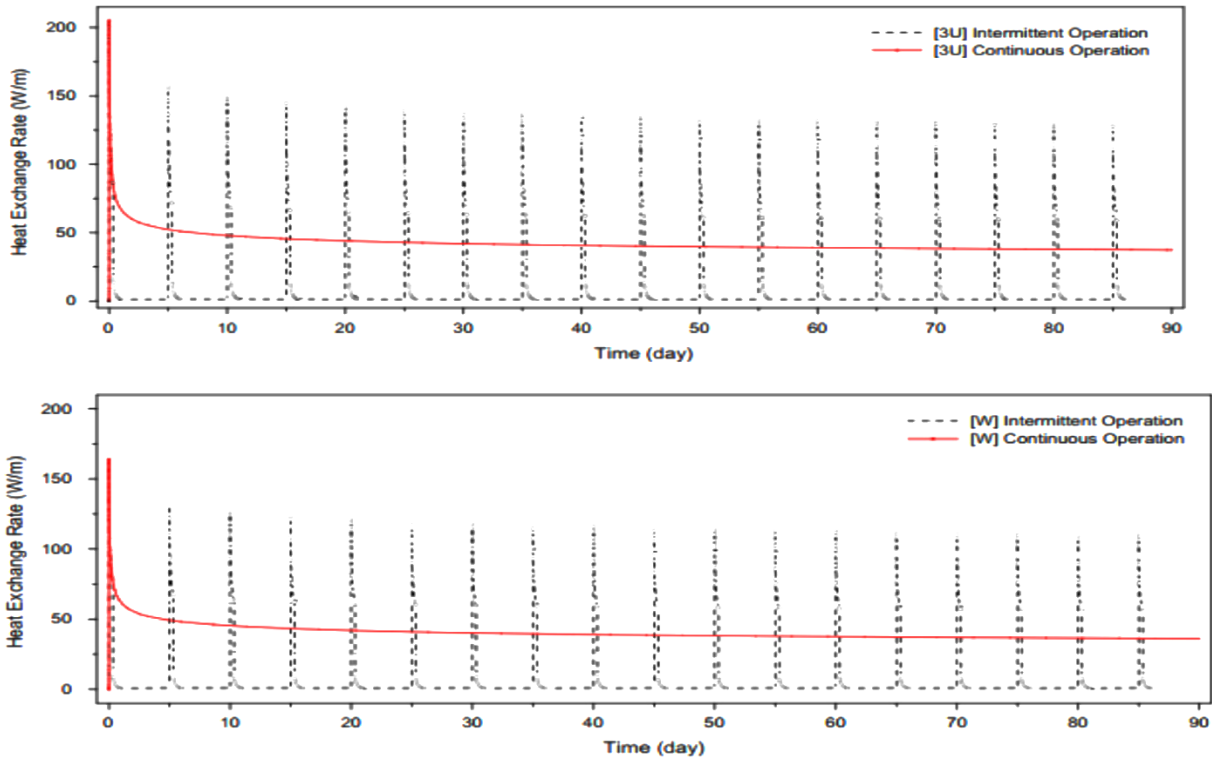


Fig. 43 " Comparación de funcionamiento continuo e intermitente de la tubería tipo triple U y la tipo W (Faizal, et al., 2016) "

El tipo coaxial presenta una menor eficiencia que los intercambiadores de calor de tipo U, aunque si se realiza una mejora de diseño añadiendo espirales metálicas al intercambiador coaxial, este presenta una mayor eficiencia de intercambio de calor comparado con el arreglo de tipo doble U ya que las espirales mejoran la transferencia de calor al crear mayor turbulencia en el flujo. (Faizal, et al., 2016)

El tipo de configuración en forma de espiral ha demostrado tener una mayor eficiencia que la configuración tipo doble U y triple U reduciendo en un 50 % la profundidad del pozo y aumentando en un 23 %, la cantidad de calor intercambiado, en comparación con la tubería triple U y en un 30 % comparado con la configuración doble U. Este aumento de eficiencia se debe al incremento del área de contacto lo que mejor la transferencia de calor (Faizal, et al., 2016)

Como se puede observar el incremento en el área de la tubería mejora el efecto de transferencia de calor. Cada una de las diferentes configuraciones ofrece diversas ventajas acordes a las

condiciones de trabajo que se requieran cubrir y en la mayoría de los casos se opta por una configuración tipo U simple por su bajo costo de construcción y eficiencia aceptable.

3.5. Mejoras en la transferencia de calor de pilotes geotérmicos

Aunque el diseño y análisis de los pilotes geotérmicos es un campo relativamente nuevo estudios multidisciplinarios han registrado que para lograr una mejora en la transferencia de calor en la estructura termo-activa se puede optimizar la geometría del pilote y la tubería, las propiedades del fluido de trabajo, el material de la tubería y la mezcla de concreto.

3.5.1. Optimización geométrica

La optimización geométrica mejora la transferencia de calor entre el fluido de trabajo y el suelo modificando el diámetro y longitud de la pila, el espesor de la cubierta de concreto y el tipo de configuración de la tubería. El objetivo principal es lograr aumentar el área de contacto y disminuir la resistencia térmica entre las superficies para lograr así incrementar la tasa de transferencia de calor.

Estudios realizados en tuberías de tipo U han demostrado que la transferencia de calor aumenta conforme aumenta la distancia de separación entre los tubos (Fig. 44) y la energía utilizada por la construcción para calefacción o refrigeración disminuye en función de la profundidad y distancia entre la tubería de acuerdo a un estudio realizado en Chicago (Fig. 45). (Faizal, et al., 2016)

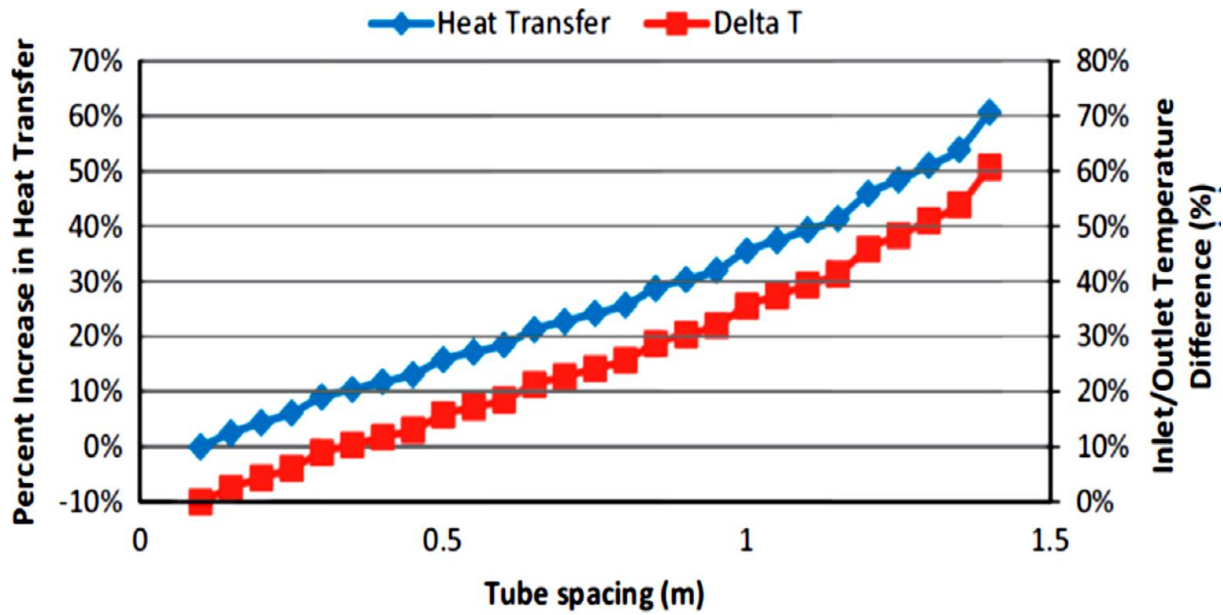


Fig. 44 " Incremento de la transferencia de calor en una tubería tipo U simple (Faizal, et al., 2016) "

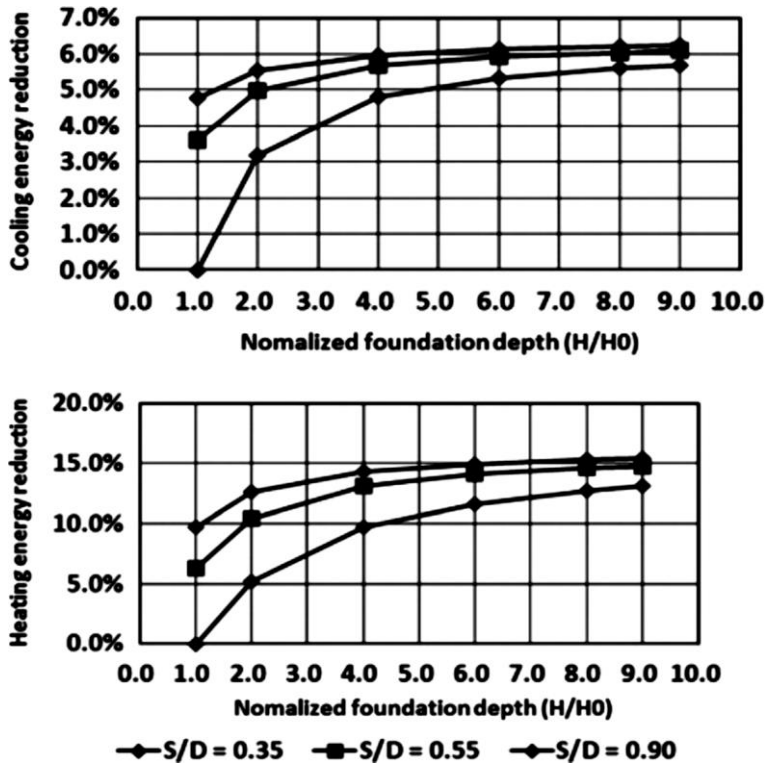


Fig. 45 " Disminución de la energía utilizada para refrigeración y calefacción en función de la profundidad (Faizal, et al., 2016) "

La ubicación y número de tubos es un factor importante ya que de ello depende la resistencia térmica generada en el fenómeno de transferencia de calor. Para aquellas tuberías que se encuentran montadas en el refuerzo de varilla la resistencia térmica disminuye al disminuir la cubierta de concreto que separa a la tubería del suelo, por el contrario, cuando la tubería es instalada en el centro de la pila la resistencia térmica aumenta disminuyendo el calor transferido del suelo a la pila. (Faizal, et al., 2016)

3.5.2. Utilización de nano-fluidos como fluido de trabajo

El uso de nano-fluidos en este siglo nace con la necesidad de crear un sistema eficiente de enfriamiento para las nuevas tecnologías que surgen ante el acelerado crecimiento de la industria actual. Esta nueva tecnología brinda una nueva opción de enfriamiento para los nuevos dispositivos que demandan una mayor potencia. Aplicaciones médicas, ópticas, en comunicación y computación son algunos de los sectores beneficiados con este nuevo concepto de enfriamiento. Esta tecnología ha sido llevada al campo de bombas de calor por diversos investigadores que plantean su uso como fluido de trabajo, utilizado en el intercambiador de calor, para brindar una mayor eficiencia de transferencia de calor ya que estos se caracterizan por mejorar las propiedades térmicas de un fluido base al agregar partículas nonométricas de diferentes materiales.

El aumento de transferencia de calor mejora en función de la concentración y tamaño de partícula agregado. Estas partículas generan efectos de micro-convección y dispersión del calor en el fluido mejorando así los coeficientes de convección y conducción. Los nano-fluidos presentan bajas posibilidades de sedimentación debido a su bajo peso, una baja erosión en las paredes debido al bajo *momentum* generado por el pequeño tamaño de partícula y presentan un flujo turbulento lo que mejora los efectos de transferencia de calor. (Faizal, et al., 2016)

Al trabajar con bajas concentraciones de nano-partículas los fluidos mantienen su comportamiento newtoniano con un pequeño aumento en su viscosidad (Faizal, et al., 2016), sin embargo, pruebas realizadas en intercambiadores de calor han demostrado que los cambios en la viscosidad del fluido y las caídas de presión toman un papel importante cuando se trabaja con bajas temperaturas al estar relacionadas con la conductividad térmica del fluido. (Huminic & Huminic, 2012).

Para utilizar nano-fluidos en pilotes geotérmicos se han realizado diversas investigaciones utilizando agua, etilenglicol, *transformer oil* y *engine oil* como fluidos base y como nano-partículas se ha probado con cerámicos, metales, polímeros y nano-tubos de carbón. Con estas pruebas se ha logrado caracterizar su comportamiento térmico mostrando las siguientes características:

Nano-fluidos de partículas cerámicas: Fueron los primeros nano-fluidos investigados utilizando nano-partículas de alúmina (Al_2O_3) y óxido de cobre (CuO) y como fluido base agua y etilenglicol. Las pruebas realizadas muestran que la conductividad térmica aumenta utilizando cualquiera de las dos bases y una fracción de volumen de nano-partículas de 1 a 5 %. El mayor aumento se presentó utilizando como fluido base etilenglicol y una fracción de volumen de óxido de cobre (CuO) de 4 % presentando un aumento en la conductividad térmica del 20 %. (Kumar, et al., 2006)

Cuando se utilizó agua como fluido base el aumento en la conductividad térmica fue menor con un aumento de 12 % utilizando 3.5 % de óxido de cobre y un 4 % de alúmina [Al_2O_3]. (Kumar, et al., 2006)

Nano-fluidos de partículas metálicas: Los investigadores Yimin Xuan y Qiang Li fueron los primeros en comenzar las pruebas con nano-partículas metálicas de cobre utilizando como fluido base *transformer oil*. El tamaño de partícula utilizado fue de aproximadamente 100 [nm], mayor al reportado en los nano-fluidos cerámicos, mejorando en un 55 % la conductividad térmica con una fracción de volumen del 5 %. El mayor avance se dio cuando el grupo ANL presentó un incremento del 40 % en la conductividad térmica utilizando una fracción de volumen de tan solo 0.3 % con un tamaño de partícula aproximado de 10 [nm] (Fig. 46), este avance demostró que el tamaño de partícula es un factor importante en el aumento de la conductividad térmica. (Kumar, et al., 2006)

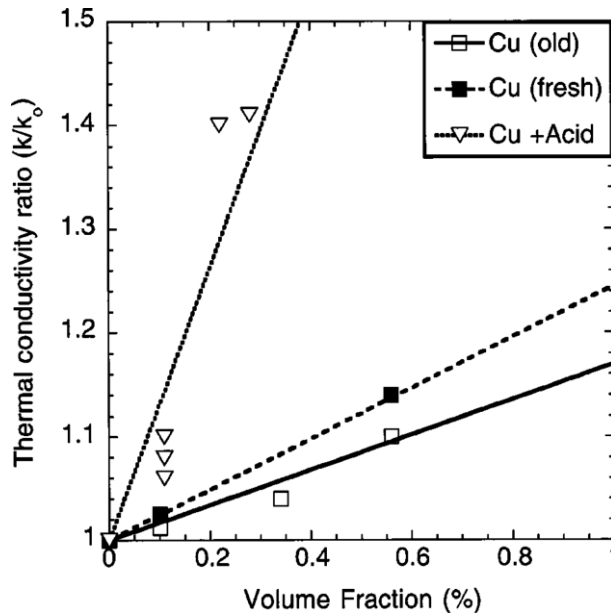


Fig. 46 " Relación de la fracción de volumen con el incremento en la conductividad térmica (Kumar, et al., 2006) "

Estudios realizados con nano-partículas de oro (*Au*) y hierro (*Fe*), con un tamaño de 10 a 20 [nm], han demostrado un incremento en la conductividad térmica de 3.2 a 5 % con una fracción de volumen de 0.0012 a 0.0026 % para el oro y de 18 % para el hierro con un fluido base de etilenglicol y una fracción de volumen de nano-partículas del 0.55 [%]. (Kumar, et al., 2006)

Nano-fluidos de partículas poliméricas y Nano-tubos de carbón: Los nano-tubos de carbón ha sido el mayor avance en el incremento de la conductividad térmica mostrando un incremento de hasta el 150 % utilizando como fluido base *engine oil* y una fracción de volumen del 1 % de nano-tubos de pared multiplex. Los nano-fluidos de partículas poliméricas presentan casi el mismo aumento en su conductividad térmica. El alto incremento en la conductividad térmica se debe a que los nano-tubos de carbón de pared múltiple presente una conductividad térmica de aproximadamente $3000 \left[\frac{W}{mK} \right]$. (Kumar, et al., 2006)

Estudios realizados utilizando agua y etilenglicol como fluido base y nano-tubos de carbón de pared múltiple y de doble pared, con un diámetro promedio de 130 [nm] y una longitud de 40 [μm], han dado un incremento del 34 % en la conductividad térmica con una fracción de volumen

del 0.6 %, mientras que para los nano-tubos de carbón de doble pared el incremento ha sido del 8 % para una fracción de volumen del 1 %. (Kumar, et al., 2006)

3.5.3. Mejoras en los materiales de construcción de la tubería

Para lograr aumentar las propiedades térmicas de los materiales de construcción del circuito primario la empresa *VERSAPROFILES* ha implementado el uso de nano-partículas combinadas con el polietileno de alta densidad para aumentar el efecto de conductividad térmica. *GEOPERFORM* es el nombre de la tubería que demostrado aumentar en un 75 % el efecto de conductividad térmica comparado con una tubería de polietileno de alta densidad simple, este aumento en la eficiencia de transferencia de calor ha llevado a la reducción de los materiales de construcción presentando así un ahorro económico. (Versaprofiles, 2013)

Esta nueva tecnología ha sido probada en intercambiadores de calor de pozo realizando simulaciones donde se ha encontrado hasta un 18 % en la reducción de la resistencia térmica y la práctica se ha logrado medir hasta un 17 % reduciendo en un 10 % la longitud del pozo. Simulaciones hechas considerando un estado estable y un modelo bidimensional han reportado una reducción en la resistencia térmica de 6 a 24 % y una reducción en la longitud del pozo del 9 % comparado con tuberías regulares. (Faizal, et al., 2016)

Los investigadores Dorrian D. y Mumm SM. han patentado el uso de nano-partículas de óxido metálico, cerámicos, grafito y otros materiales similares con alta conductividad térmica. Utilizando una mezcla de 20 % de poli estireno de alta densidad, 5 % de un termoplástico y 75 % de óxido de Zinc alcanzando una conductividad térmica de $0.85 \left[\frac{W}{mK} \right]$ comparado con el $0.36 \left[\frac{W}{mK} \right]$ del poliestireno de alta densidad estándar. (Faizal, et al., 2016)

El uso de grafito en polietileno de alta y baja densidad ha demostrado ser una opción de mejoramiento térmico aumentando el coeficiente de transferencia térmica y mostrando un comportamiento no lineal con el incremento del volumen de grafito en la mezcla (Fig. 47). El mayor incremento se observa en el uso de polietileno de alta densidad ya que presenta un mayor índice de cristalinidad en el material. (Faizal, et al., 2016)

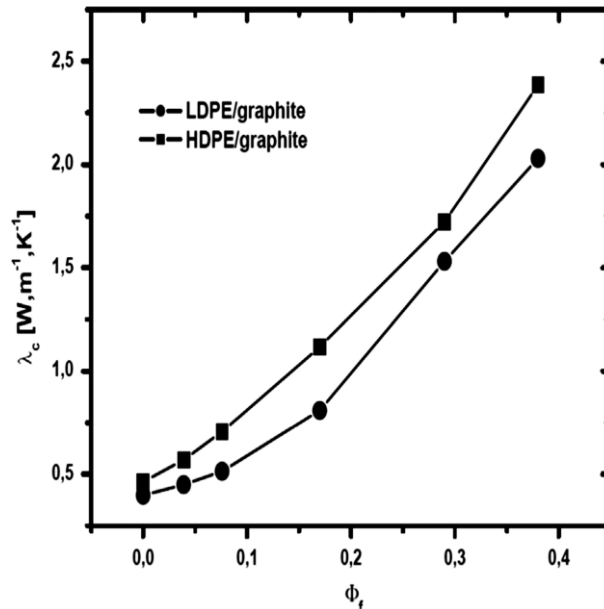


Fig. 47 "Volumen de grafito contra conductividad térmica (Huminic & Huminic, 2012) "

El uso de nano-tubos de carbón de pared simple y múltiple han demostrado un mejoramiento en el coeficiente de transferencia de calor, además, se han hecho pruebas con carbón negro, nano fibras de carbón y partículas de poliamidas. Con estas pruebas se ha demostrado que el aumento en la transferencia de calor incrementa con la cantidad de relleno agregado, sin embargo, se debe tener especial cuidado con el incremento de la cantidad de relleno ya que este puede generar esfuerzos no homogéneos dentro del material que puede llevar a la ruptura de las tuberías. La orientación de las fibras del polietileno de alta densidad es un factor importante ya que mientras mayor sea el grado de alineamiento de las fibras mayor será el aumento del coeficiente de transferencia de calor. (Faizal, et al., 2016)

La elección de un relleno adecuado para mezclar con el polietileno de alta densidad debe realizarse considerando dos principales factores: el primero es que ante una cantidad excesiva de relleno los esfuerzos internos pueden afectar el desempeño de la tubería y el segundo es considerar que la tubería trabajara ante cargas térmicas cíclicas lo que puede generar un deterioro en el material.

3.5.4. Mejoras en la mezcla de concreto

Para mejorar las propiedades térmicas de la mezcla de concreto se investigado el efecto de adición de humo de sílice y silano. Estas adiciones de material no deberían afectar la capacidad de

carga de los cimientos y reducen la resistencia térmica logrando una mejora en la transferencia de calor.

En la mayoría de los casos la baja conductividad del concreto es útil para asegurar el aislamiento de la construcción, aunque en otras aplicaciones, una buena conductividad térmica asegura la disminución de los gradientes térmicos que pueden generar la degradación de las propiedades mecánicas y la deformación de la estructura. Este tipo de mejoras es deseable en estructuras como puentes y similares que se ven afectadas por los gradientes de temperatura. (Yunsheng & Chung, 2000)

En la búsqueda del mejoramiento de la conductividad térmica del cemento se han realizado pruebas con fibras de carbono ya que estas son altas conductoras térmicas, sin embargo, se ha demostrado que estas no incrementan la conductividad térmica a menos de que se trate de una alta concentración. El uso de fibras y mallas de acero han demostrado un incremento en el contenido de humedad llevando a una degradación de las propiedades mecánicas (Yunsheng & Chung, 2000). Es por estas razones que la elección de un buen material de adición debe realizarse acorde a estas especificaciones.

El aumento en la conductividad térmica es producto de la variación de dos principales factores que son: difusividad térmica y calor específico. Al utilizar silano como aditivo agregado directamente en la mezcla de concreto y humo de sílice se ha reportado un incremento en la difusividad térmica del 27 %, en el calor específico del cemento arriba del 35 %, un 78 % la conductividad térmica y en la resistencia a la compresión 12 % sin modificar su densidad. Esto se obtiene como resultado del acoplamiento del silano con las partículas del humo de sílice. (Yunsheng & Chung, 2000)

Como se puede observar el uso de ambos compuestos, humo de sílice y silano, con lleva a una mejora en las propiedades térmicas del concreto con un costo de adición bajo. El uso de humo de sílice sin la adición de silano produce un incremento en el calor específico del cemento en un 7 %, pero disminuye la difusividad térmica y la conductividad térmica en un 38 %, comparado con la mezcla de cemento sin aditivos. Aunque la arena es un material común utilizado en la mezcla de concreto esta puede mejorar las propiedades térmicas que disminuyen con la adición del humo de

sílice. Al analizar su efecto en mezclas de cemento con humo de sílice se encuentra que la adición de arena disminuye el calor específico en 11 % e incrementa la conductividad térmica en un 64 %. Este aumento en la conductividad térmica se debe a la baja conductividad térmica que presenta el cemento cuando solo se adhiere humo de sílice. (Yunsheng & Chung, 2000)

La disminución que se observa con la adición de humo de sílice se debe a los efectos que se presentan en la interface entre el humo de sílice y la matriz de cemento ya que esta interface funciona como barrera térmica incrementando la resistencia térmica generada. Al adherir arena a la mezcla el área de esta barrera disminuye lo que genera una disminución en la resistencia térmica y un aumento en la conductividad térmica. (Yunsheng & Chung, 2000)

3.6. Aplicación: Propuesta del uso de pilotes geotérmicos en zonas cercanas a las ventilas hidrotermales

Como se mencionó anteriormente el diseño de un sistema térmico capaz de aprovechar el calor que emanan las ventilas hidrotermales presenta un gran reto para la ingeniería por la complejidad y desafíos que se presentan en el ambiente marino. Algunos de los desafíos de diseño que se presentan son:

1. Altas presiones
2. Alta corrosión
3. Difícil colocación del dispositivo
4. Incrustaciones minerales y biológicas

El primer desafío es la extrema presión a la que se somete el sistema ya que a 2000 [m]de profundidad la presión en el fondo marino puede alcanzar hasta los 20 [MPa]. esta condición obliga al diseñador a considerar materiales y geometrías capaces de soportar esta presión. El segundo reto que se presenta es la alta corrosión generada por la salinidad del agua y por la emanación de ácido de la ventila hidrotermal, esta consideración lleva al uso de materiales costosos como se puede observar en el caso de china que opto por utilizar titanio para soportar las presiones y la corrosión del lugar. El tercer desafío engloba la geografía del lugar y las leyes de conservación ecológicas. El cuarto desafío es la emanación continua de minerales y organismos biológicos que podrían

incrustarse en el sistema de captación generando una capa de materiales biológicos que aislarían el sistema minimizando el proceso de transferencia de calor.

En este capítulo se pudo corroborar que los pilotes geotérmicos pueden cubrir estos retos al ser estructuras que han sido diseñadas para soportar grandes cargas mecánicas y condiciones hostiles de funcionamiento. Este dispositivo está pensado para ser instalado en una zona alejada de la fauna de la ventila hidrotermal captando el calor emanado directamente del foco de alimentación de la ventila. El sistema funcionaria excavando pozos en zonas cercanas a las ventilas hidrotermales, donde se conoce la existencia de una fuente de calor, en estos pozos se instalarían los pilotes geotérmicos los cuales aprovecharían el calor almacenado en la zona, calentando un fluido de trabajo que será llevado hasta la zona donde se necesite (Fig. 48). Con este proceso de instalación se evitaría las incrustaciones biológicas y aumentaría el aprovechamiento de la energía presente en la zona.

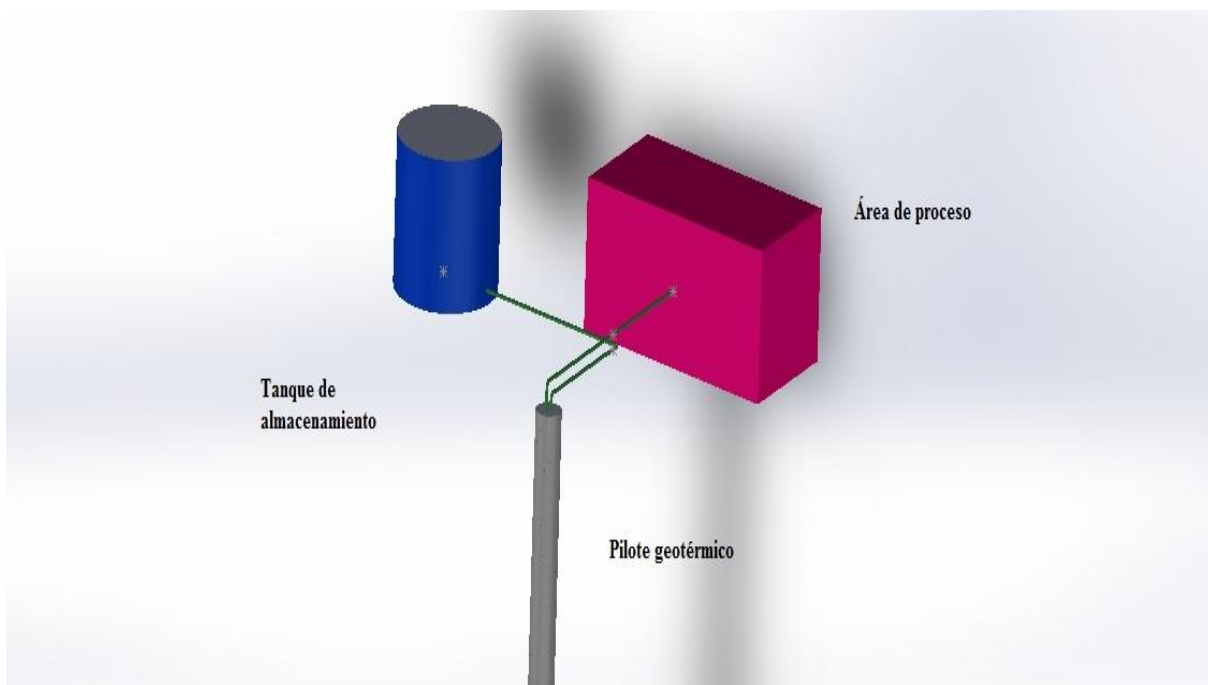


Fig. 48 " Esquema de la instalación del sistema (Autor) "

Para el diseño de este pilote geotérmico se procederá a realizar un cálculo de transferencia de calor analítico con la utilización de distintos fluidos de trabajo, diámetros de tubería y separación entre ellas para diseñar un sistema óptimo el cual nos garantice la mayor transferencia de calor posible. Este sistema se diseñará para ser colocado en alguna de las zonas con presencia de recursos

geotérmicos submarinos como lo son: Punta Mita en Nayarit, la cuenca Wagner, Bahía Concepción y Los Cabos en la península de Baja California.

Conclusión del capítulo

Como se puede observar los pilotes geotérmicos cumplen con las características buscadas para ser el medio de captación del recurso geotérmico emanado por la ventilas hidrotermal al ser diseñadas para soportar cargas mecánicas y térmicas sin sufrir deformaciones estructurales. Estas estructuras lograrán soportar las condiciones ambientales establecidas y minimizarán el impacto ambiental al no ser instaladas directamente en la ventila.

Como su desarrollo es relativamente nuevo las investigaciones realizadas a nivel mundial ayudarán a mejorar su eficiencia logrando obtener una mayor cantidad de energía. La ventaja de este sistema es que al ser un elemento estructural su adquisición es fácil ya que pueden ser obtenidos de manera prefabricada. Su instalación sería mediante el uso de máquinas perforadoras siguiendo un proceso similar al utilizado en la excavación de pozos petroleros y al ser construida con fines estructurales garantiza un tiempo de vida alto

Aunque el mayor potencial actual de los pilotes geotérmicos se observa con el uso de nanopartículas su desempeño no podrá ser analizado ya que el uso de este nuevo fluido aun no es comercial.

Capítulo 4. Diseño del pilote geotérmico para su aplicación en zonas aledañas a las ventilas hidrotermales.

Una vez que se logró corroborar el uso de estructuras termo-activas para la extracción del recurso geotérmico se analizará su comportamiento térmico y se realizara la elección de la zona de trabajo mediante el uso de una matriz de selección donde se buscará elegir aquella que se acerque a las condiciones ideales de funcionamiento. Estas condiciones deberán garantizar un sitio donde el recurso se encuentre de manera somera, con una temperatura cercana a los 100 [°C], esta temperatura será tomado en base a la registrada en las emanaciones considerando que la temperatura del subsuelo es igual o mayor a esta, y con una composición física del suelo que permita una fácil perforación buscando un área compuesta por sedimentos y no por roca volcánica.

Se desarrollará el modelo matemático que rige el comportamiento térmico de la estructura termo-activa haciendo una analogía del fenómeno de transferencia de calor a un circuito eléctrico conformado por resistencias térmicas. Una vez obtenido el modelo matemático y la zona de aplicación se propondrán materiales de fabricación que garanticen un mejor desempeño de la estructura y se probara su desempeño antes distintos escenarios.

4.1. Zona de estudio: Península de Baja California y Nayarit

La zona de la península de Baja California y Nayarit son regiones que cuentan con un alto potencial de energía geotérmica. En estas zonas se encuentran tres de los campos geotérmicos del país, Cerro Prieto, Las Tres Vírgenes y Domo San Pedro (CeMIEGeo, 2014). La capacidad instalada de estos campos geotérmicos es de 570 [MWe], 10 [MWe] y 35.5 [MWe] respectivamente. (CEMIEGEO, 2015)

Estas regiones cuentan con recursos geotérmicos convencionales y submarinos los cuales podrían brindar, en el futuro, una nueva fuente de energía geotérmica. Estos recursos los podemos encontrar en las zonas de Punta Banda, Bahía Concepción, Los Cabos, la cuenca Wagner, Consag y Punta Mita (Fig. 49). Se realizara una comparativa entre las zonas antes mencionadas para elegir la

que brinde las mejores condiciones para el desempeño óptimo de la estructura termo-activa. Para realizar esta comparativa analizaremos las condiciones geográficas que presentan estas zonas y posteriormente plantearemos un modelo matemática analítico para evaluar el desempeño del pilote geotérmico.



Fig. 49 "Zonas de estudio: Cuenca Wagner; Bahía Concepción y Los Cabos (Autor)"

4.1.1. Cuenca Wagner

La cuenca Wagner se encuentra localizada en la parte norte del golfo de California junto a la cuenca Consag con un área aproximada de 700 [km²] y 750 [km²] respectivamente. Esta cuenca fue generada por el fracturamiento de la Península de Baja California formada por fuerzas extensionales que ocasionan el resquebrajamiento y adelgazamiento de la corteza lo que genera altos gradientes geotérmicos. Es una de las cuencas que actualmente se encuentran activas junto con las cuencas de Laguna Salada, Cerro Prieto, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón. (Prol & Arango, 2017)

Esta cuenca es del tipo somera y una de las más pequeñas del Golfo de California con 210 [m] de tirante aproximadamente. La cuenca es del tipo *pull-apart* con una geometría no bien definida, limita al norte con la falla de Cerro Prieto y al sur con un sistema de fallas que atraviesan la cuenca Consag. Esta cuenca no presenta actividad volcánica reciente, pero si presenta alto flujo de calor y actividad sísmica. (Prol & Arango, 2017)

En las cuencas Wagner y Consag se han encontrado cerca de 300 ventilas de gas, a profundidades de entre 65 y 105 [m], en un área de 240 [km²] compuestas por 78 % de dióxido de carbono (CO_2) y 22 % de metano (CH_4).

La zona cuenta con una columna de sedimentos mayor a 5 [km] de espesor mostrando gradientes térmicos que van desde los 0.01 a los 12 [°C] con una conductividad térmica promedio en los sedimentos de 1.2 [W/m°C] y con un flujo de calor cercano a los 16 [mW/m²] de acuerdo a las mediciones tomadas por 22 estaciones (Prol & Arango, 2017). La actividad hidrotermal indica un flujo de calor promedio de descarga de al menos 4000 [MWt]. (Arango, et al., 2015)

La presencia de fallas que penetran en los sedimentos de la cuenca a más de 2000 [m] permiten el transporte de calor a través de estos sedimentos hasta el fondo marino. Estas fallas están presentes con gran abundancia aproximadamente de 1 y 1.3 fallas por kilómetro para la cuenca Wagner y Consag respectivamente. (Prol & Arango, 2017)

4.1.2. Los Cabos

Se localiza en el extremo sur de la Península de baja California, en esta zona el descubrimiento de la actividad geotérmica se realizó por la perforación de pozos para la desalinizadora de agua donde se registraron temperaturas mayores a 80 [°C]. (Prol & Arango, 2017)

Recientes investigaciones en el área de los cabos indican la presencia de actividad hidrotermal en la zona. La litología de la zona muestra rocas volcánicas cuaternarias, vulcano- sedimentarias y granito (Fig. 50). Estudios de la zona han demostrado que debido a las intensas fracturas en la parte sur se encuentra la presencia de manifestaciones geotérmicas, el análisis químico e isotópico de los manantiales termales muestran una mezcla de agua de mar con agua del tipo sodio-cloruro un

enriquecido de mercurio (Hg), Bario (Ba), manganeso (Mn), yodo (I), bromo (B), litio (Li), arsénico (As) y cesio (Cs). Mediciones realizadas con geotermómetro de Na/K muestran una temperatura de reservorio aproximadamente de 168 a 245 [°C]. (Arango, et al., 2015)

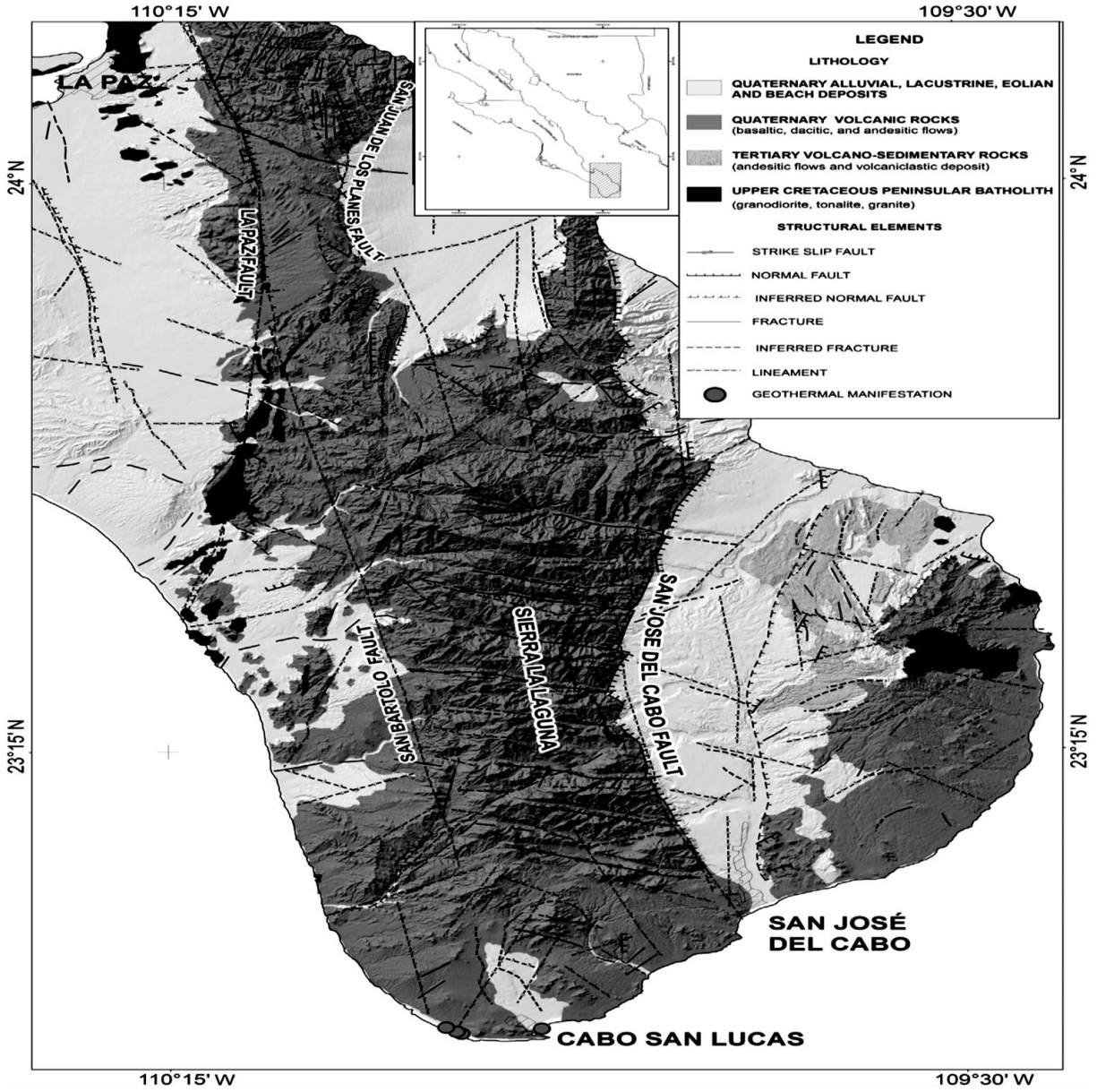


Fig. 50 " Mapa litológico de la zona de Los Cabos (Arango, et al., 2015) "

4.1.3. Bahía Concepción

Está localizada al noreste de Baja California Sur, formada por el resultado de las características estructurales y volcánicas de la zona asociadas con una configuración de subducción. Presenta manifestaciones hidrotermales a lo largo de su bahía occidental en la playa de Santispac y Concepción Posadas (Prol, et al., 2004), con descargas difusas y enfocadas de fluidos hidrotermales y descargas intermitentes de gas (Arango, et al., 2015).

Geológicamente la zona está constituida por un basamento granítico compuesto de granodioritas, cuarzo monzonitas, cuarzo dioritas y granitos. Sobreyaciendo a este basamento tenemos al Grupo Comondú el cual se compone por rocas volcánicas y volcanoclásticas. Este grupo está en contacto con rocas sedimentarias marinas, con un espesor aproximado de 50 [m], del tipo no consolidado, los cuales son: lodo verde, arena volcanoclástica y arena carbonatada (Fig. 51). (Prol & Arango, 2017)

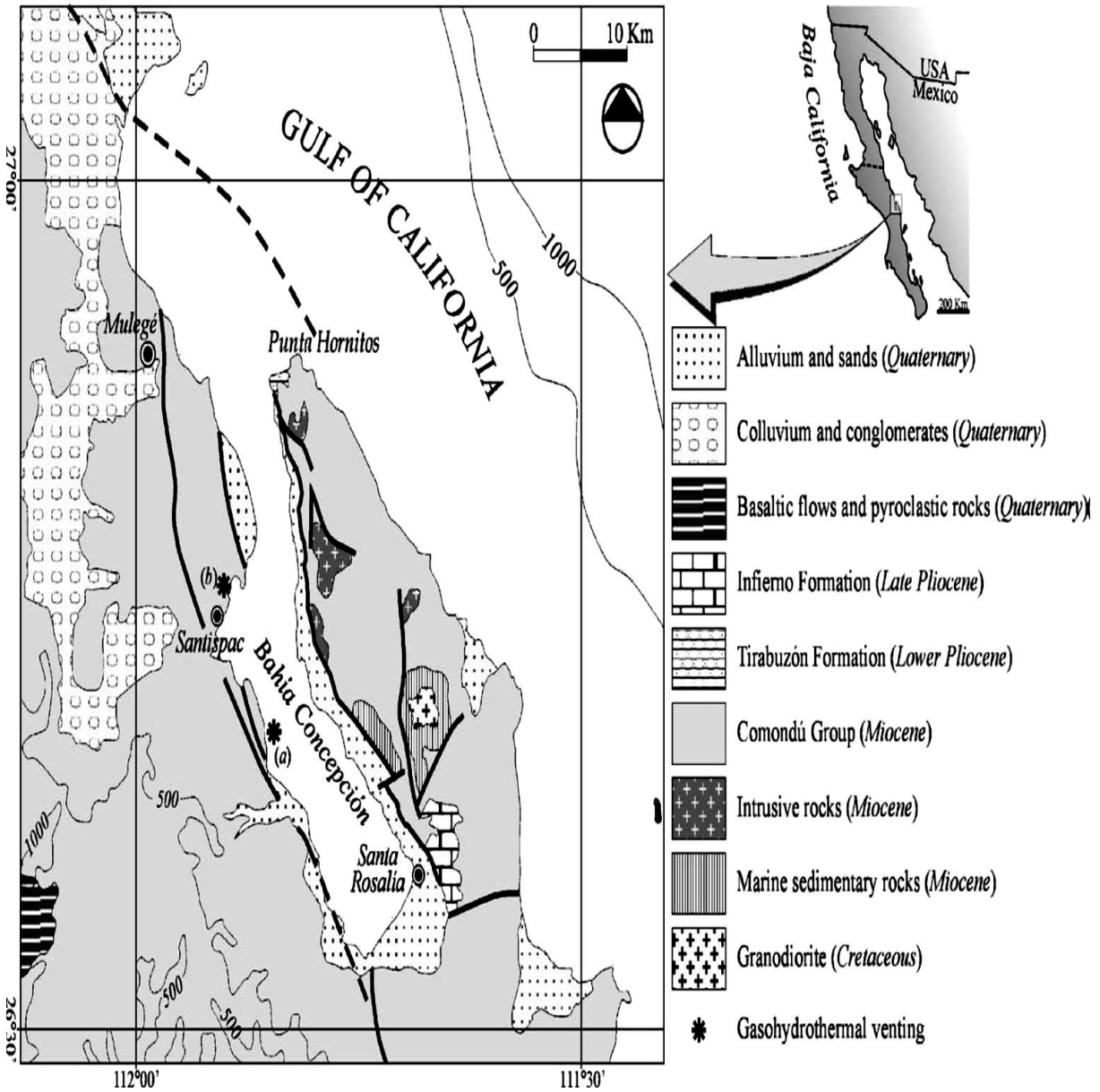


Fig. 51 " Composición geológica de Bahía Concepción (Prol, et al., 2004) "

En esta región se encuentran ventilas de 5 a 15 [m] de profundidad en un área menor a 1 [km²], las temperaturas van desde los 50 [°C] en el fondo del océano hasta los 87 [°C] a 10 [cm] de profundidad en los sedimentos, además se encuentran manifestaciones de aguas termales en la playa de Santispac la cal carece de formaciones de chimenea debido a que la ventila solo es cubierta por agua durante la marea alta. (Arango, et al., 2015)

El agua que podemos encontrar en la descarga esta enriquecida por calcio (*Ca*), magnesio (*Mn*), silicio (*Si*), bario (*Ba*), bromo (*B*), arsénico (*As*), mercurio (*Hg*), yodo (*I*), hierro (*Fe*), litio (*Li*), bicarbonato (HCO_3) y estroncio (*Sr*). Los datos isotópicos sugieren una mezcla de agua meteórica y agua de mar 1:1, con abundantes cantidades de pirita y yesos los cuales son derivados de la ventila (Prol, et al., 2004). Al medir la temperatura en la zona de los manantiales inter mareas, utilizando un geotermómetro de Na/K, se obtiene valores que van desde los 166 a los 223 [°C] de temperatura en el reservorio. (Arango, et al., 2015)

4.1.4. Punta Mita

Está localizada en el estado de Nayarit en la costa del Pacifico central (Fig. 52), muestra manifestaciones hidrotermales a 400 [m] de la costa, al norte de Bahía Banderas, compuestas por una mezcla de agua y gas con una temperatura de 85 [°C], descargas enfocadas, distribuidas en dirección NW-SE y alojadas dentro de una fisura de aproximadamente 100 [m] de largo en rocas basálticas a 10 [m] de profundidad con sedimentos de origen Vulcanosedimentario. El análisis químico muestra que la composición del agua de descarga es una mezcla de agua meteórica y agua marina, predominando el agua meteórica. (Fernandez & Prol, 2011)

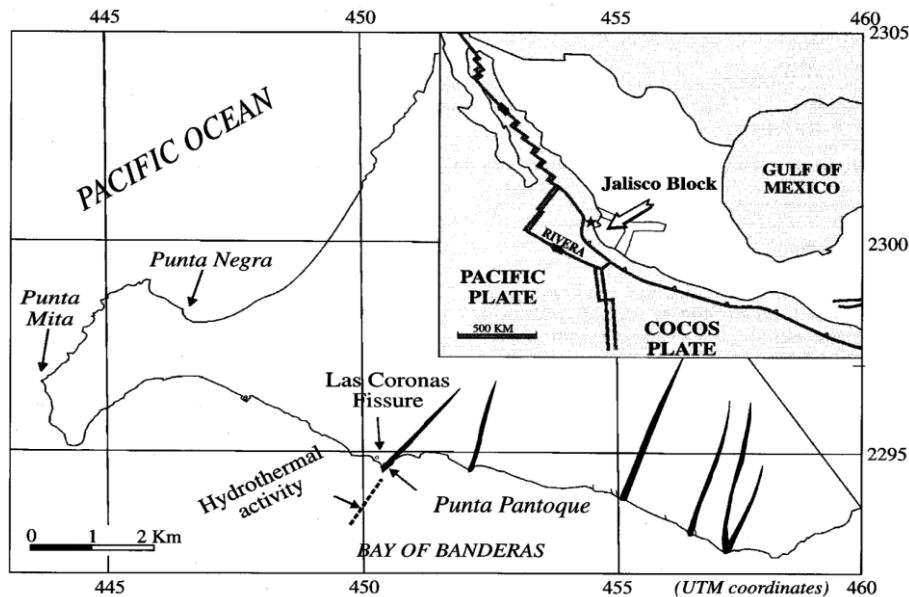


Fig. 52 "Localización de Punta Mita (Pura, et al., 2003)"

Gracias a la poca profundidad a la cual se encuentran los recursos geotérmicos el análisis físico y químico de la zona se puede realizar con gran facilidad permitiendo una mejor caracterización. Estas ventilas producen montículos de toba calcárea de hasta 2 [m] de diámetro y 0.5 [m] de alto, el escaso desarrollo vertical de las chimeneas formadas en la zona se debe al fuerte oleaje (Canet, et al., 2000). La descarga de gas está compuesta principalmente por nitrógeno (N_2) y metano (CH_4), con pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico (H_2S), argón (Ar) y helio (He). (Pura, et al., 2003)

La zona está compuesta por unidades basálticas y sedimentarias sobre rocas cretácicas, estas rocas basálticas pueden ser el producto de la reciente actividad extensional (Pura, et al., 2003). Las rocas encontradas costa adentro muestran edades que van desde el Paleozoico hasta el cuaternario. Las rocas Paleozoicas están representadas por fuertes deformaciones de cuarzo feldespático y esquistos calcáreos cubiertos de caliza, arenas y limos. Las unidades Terciarias encontradas consisten en arenas y conglomerados. Los depósitos cuaternarios consisten principalmente de granos medios, estratificados y no consolidados de arenisca (Fig. 53). (Pura, et al., 2005)

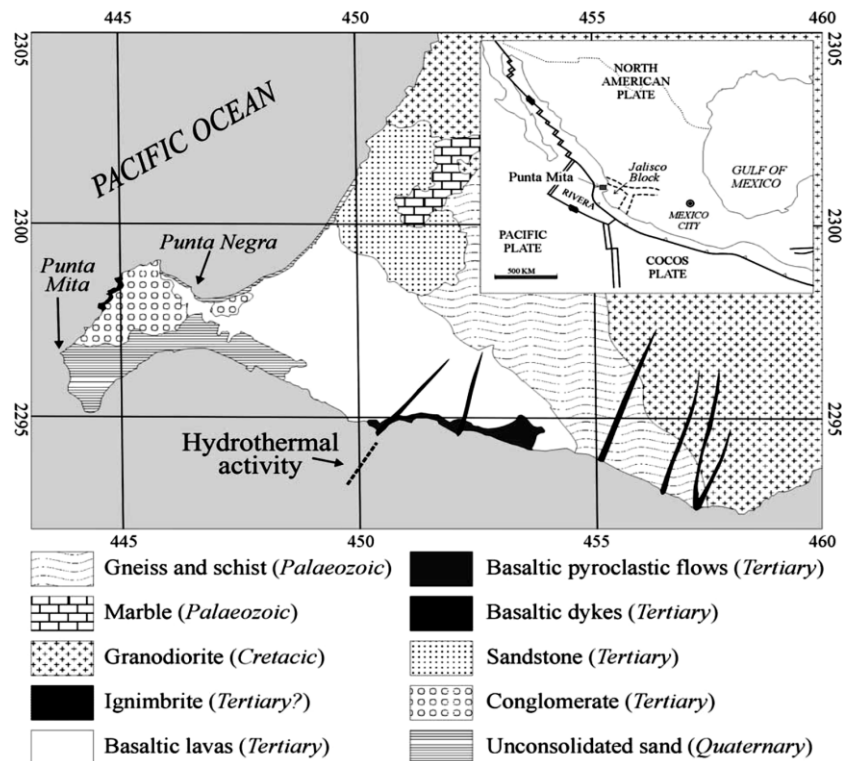


Fig. 53 " Mapa geológico de Punta Mita, México (Pura, et al., 2005)"

4.2. Elección de la zona de aplicación

La zona donde se analizará el desempeño se elegirá mediante una matriz de selección de la cual se obtendrá la zona con mayor factibilidad técnica para la implementación de la estructura. En esta matriz se compararán tres criterios fundamentales para el desempeño, los cuales son:

- Temperatura del subsuelo
- Espesor de capa de sedimentos
- Profundidad del recurso

Estos criterios son elegidos asimilando una condición ideal de funcionamiento en la cual la estructura será colocada en una zona que cuenta con recursos a poca profundidad, disminuyendo el efecto de la presión sobre la estructura, con una temperatura cercana a los 100 [°C] y con una composición del suelo que permita una fácil perforación evitando así complicaciones al tratar de perforar rocas con alta dureza.

La asignación del valor será acorde a cuál de las zonas se acerca más a la condición ideal de funcionamiento siendo 1= aceptable y 0= no aceptable. Posteriormente se realizará la suma de los puntos obtenidos de cada zona y se elegirá la que tenga mayor puntuación.

Las zonas elegidas cuentan con las siguientes características (Tabla 3):

Tabla 3 “ Características de las posibles zonas de aplicación (Autor) ”

Características	Cuenca Wagn er	Los Cabos	Bahía Concepción	Punta Mita
Temperatura del subsuelo [°C]	12	80	62	85
Espesor de la capa de sedimentos [m]	5000	10	50	10
Profundidad del recurso [m]	100	-	15	10

Para la zona de los Cabos no se tiene el dato aproximado a la cual se encuentra la presencia del fluido caliente es por ello que en la matriz de selección su valor se considera nulo.

Zonas propuestas	
A	Cuenca Wagner
B	Los Cabos
C	Bahía Concepción
D	Punta Mita

Criterio de diseño	A	B	C	D
Temperatura del subsuelo	0	1	1	1
Espesor de capa de sedimentos	0	1	0	1
Profundidad del recurso	0	0	1	1
Suma general	0	2	2	3

Tabla 4 " Matriz de selección (Autor) "

De acuerdo con la matriz de selección (Tabla 4) Punta Mita es la zona con mayor factibilidad para colocar la estructura termo-activa. La zona cuenta con una temperatura cercana a los 85 [°C], recursos someros lo que facilita la instalación de la estructura y una capa de sedimentos aceptable para la instalación de las estructuras.

4.3. Consideraciones de diseño

Para iniciar el diseño de la estructura termo-activas es necesario hacer un análisis detallado de la zona de implementación definiendo características físicas del suelo y del medio ambiente donde la estructura será colocada, las cuales influirán en el desempeño de la estructura. Las características que se deberán considerar en el diseño son: tipo de roca, conductividad térmica del suelo, difusividad térmica del suelo, temperatura ambiente promedio y temperatura del agua subterránea.

Estas características físicas son importantes para poder así determinar una velocidad de flujo promedio y un valor de calor transferido del suelo a la estructura. La velocidad del flujo servirá en apartados posteriores para ver la influencia que tiene este fenómeno de transferencia de calor, si las velocidades superan valores de $1 \times 10^{-3} \left[\frac{cm}{dia} \right]$ se requiere considerar los efectos convectivos en el proceso de transferencia de calor del suelo al pilote geotérmico y se deberá considerar la instalación

de una pantalla de protección hidráulica para minimizar las pérdidas de calor la cual consiste en un anillo aislante en la parte superior de la estructura que minimice las pérdidas de energía. (Hellstrom, 1991)

Mediante un análisis geohidráulico se calcula la velocidad de flujo utilizando la Ley de Darcy para llegar a un valor estimado considerando el suelo como un medio poroso. Posteriormente se obtendrá el modelo analítico del fenómeno de transferencia de calor dentro del pozo considerando una temperatura del medio circundante y de la pared del pozo constante. Se elegirán los materiales adecuados para la construcción del sistema que logren soportar las condiciones ambientales a las cuales será sometida la estructura.

Se determinó el uso de una configuración de tubería tipo U por su fácil instalación y un desempeño óptimo. El diagrama que seguirá el proceso es el siguiente (Fig. 54):

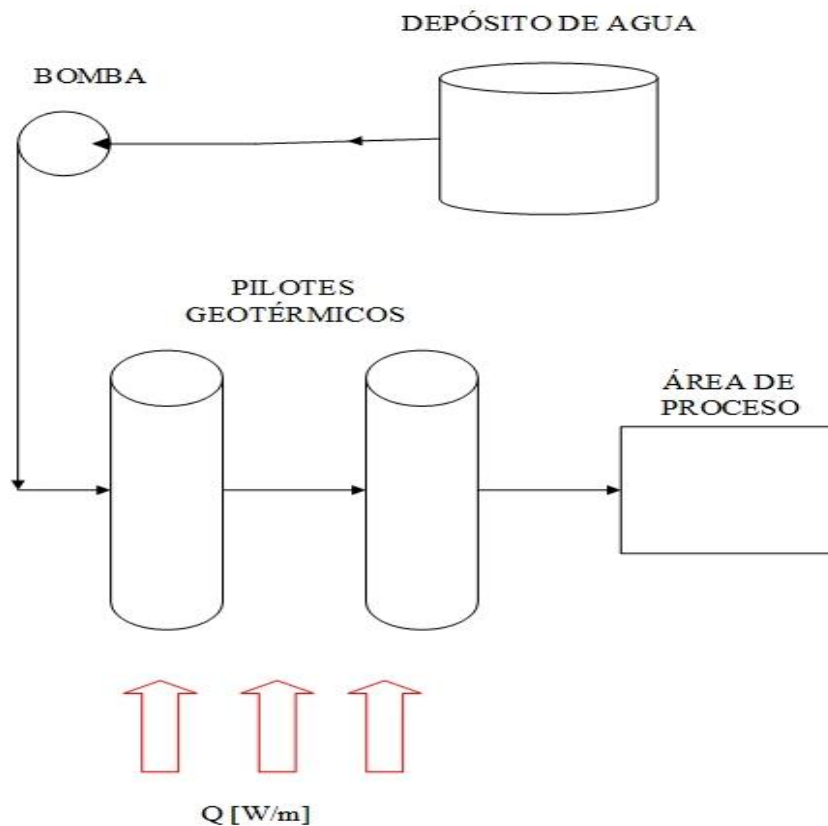


Fig. 54 "Diagrama de instalación (Autor)"

4.3.1. Análisis geohidráulico

Este análisis se realizará con las características físicas de la zona de elección, es necesario realizar una caracterización obteniendo datos relevantes como lo son: tipo de roca, porosidad, coeficiente de conductividad hidráulica, diámetro de grano y porosidad efectiva las cuales servirán para realizar el cálculo de la velocidad media buscada mediante el uso de la Ley de Darcy.

4.3.1.1. Ley de Darcy

La Ley de Darcy fue creada por el ingeniero francés Henry Darcy en el año de 1856 para el estudio de la red de abastecimiento de la ciudad (Sanchez, 2011). Esta establece que la velocidad de Darcy es proporcional al gradiente hidráulico multiplicado por un coeficiente de proporcionalidad llamado conductividad hidráulica del terreno (FCIHS, 2013).

$$V_D = K_H * i$$

Donde:

V_D – Velocidad de Darcy $\left[\frac{m}{s}\right]$

K_H – Conductividad hidráulica $\left[\frac{m}{s}\right]$

i – Gradiente hidráulico

La diferencia de altura entre los dos depósitos (Fig. 55) propicia el origen de un caudal que atraviesa el área de un medio poroso circulando de la zona de mayor a menor potencial o altura (FCIHS, 2013).

$$Q = -K_H * A_T * i$$

Donde:

Q – Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

A_T – Área transversal del medio poroso $[m^2]$

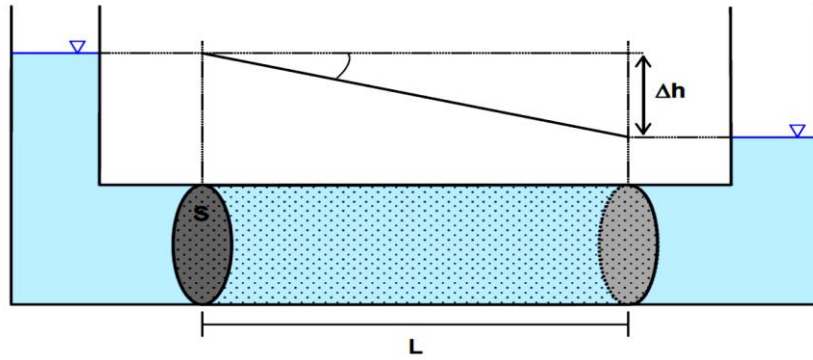


Fig. 55 “ Ley de Darcy (FCIHS, 2013) ”

De esta diferencia de alturas se deriva el termino de gradiente hidráulico el cual se describe como la pendiente del potencial hidráulico:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Donde:

Δh . - Diferencia de altura entre depósitos [m].

L.- Longitud del depósito [m].

La conductividad hidráulica sirve de medida para conocer la resistencia que tiene el terreno al flujo de agua. Este factor es un tensor que varía según la dirección del flujo de agua, en general es ligado a la porosidad efectiva del terreno, y depende de las características físicas del fluido como lo son: temperatura, densidad y viscosidad, estas características físicas son de suma importancia cuando se trabaja con fluidos geotérmicos (FCIHS, 2013).

La Conductividad hidráulica se define como:

$$K_H = K_0 \frac{\rho \cdot g}{\mu} = K_0 \frac{\gamma}{\mu}$$

Donde:

K_0 – Permeabilidad intrínseca [m²]

ρ – Densidad $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

g – gravedad $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$

γ – Peso específico $\left[\frac{N}{m^3}\right]$
 μ – Viscosidad $\left[\frac{kgm^2}{s}\right]$

La Ley de Darcy tiene límites de aplicación ya que solo es válida en flujo laminar cuando el número de Reynolds es menor o igual a diez, sobrepasando este valor la relación entre el gradiente hidráulico y el caudal deja de ser lineal (FCIHS, 2013).

$$Re = \frac{\rho * V * d}{\mu}$$

Donde:

ρ – Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
 V – Velocidad del flujo $\left[\frac{m}{s}\right]$
 μ – Viscosidad dinámica $\left[\frac{Kg m^2}{s}\right]$
 d – Tamaño medio del diámetro de las partículas [m]

La velocidad obtenida no es una velocidad real puesto que el agua no circula por toda la sección del cilindro poroso sino por una pequeña parte de esta que depende de la porosidad eficaz de la roca por la cual se hace circular el fluido (Sanchez, 2011).

$$V.L.M = \frac{V_D}{m_e} \left[\frac{m}{s}\right]$$

Donde:

$V.L.M$ – Velocidad lineal media $\left[\frac{m}{s}\right]$
 m_e – Porosidad eficaz

Esta velocidad lineal media puede considerarse como la velocidad real a la cual circula el fluido, sin embargo, tiene un rango de error ya que si se utiliza para estimar el tiempo de recorrido que tarda en llegar el fluido de un extremo al otro del medio poroso esta será menor al tiempo real si se mide de forma experimental ya que la rugosidad del camino aumenta el tiempo de recorrido (Sanchez, 2011).

4.3.1.1.1. Cálculo de velocidad lineal media

Para realizar el cálculo de Velocidad lineal media se realizaron consideraciones que facilitan la obtención del modelo analítico. Las consideraciones que se realizaron son las siguientes:

Estado permanente: Este estado se consideró ya que la recarga de nuestro sistema es constante por su cercanía al océano y depende poco de las condiciones atmosféricas.

Isotrópico: Se considera isotrópico a la conductividad hidráulica de la roca ya que en dirección X, Y y Z es prácticamente igual solo se reportan ligeras variaciones en dirección Z por efectos de la presión atmosférica, pero es tan pequeña que se puede despreciar.

Flujo unidireccional: Esta consideración se deriva de la consideración anterior ya que al tener isotropía en el sistema el cálculo de la velocidad en X, Y y Z será la misma.

Medio Homogéneo: Esta consideración se realizó para tomar las diversas capas de estratos presentes en la zona como un solo componente con el cual se pueda obtener una conductividad hidráulica promedio.

Existencia de un gradiente hidráulico: Se supondrá la existencia de un gradiente hidráulico en las zonas someras y profundas la cual propicia el movimiento del flujo de agua en las zonas cercanas a las ventilas hidrotermales.

Se inicia el análisis partiendo de la Ley de Darcy expresada en términos del caudal

$$Q = -K * A * i$$

$$Q = -[k][A] \left[\frac{dh}{dx} \right]$$

$$A = (h)(a)$$

$$Q = -[k][h * a] \left[\frac{dh}{dx} \right]$$

Donde:

$A.$ –área [m^2]

$a.$ –ancho [m]

$h.$ –altura [m]

Por separación de variables obtenemos:

$$Q \cdot dx = -K \cdot h \cdot a \cdot dh$$

$$Q \cdot \int dx = -K \cdot a \cdot \int h dh$$

$$Q \cdot x = -K \cdot a \cdot \frac{h^2}{2} + C$$

Partiendo de las condiciones iniciales de $x=0$ y $h=h_i$ obtenemos:

$$0 = -K \cdot a \cdot \frac{h_i^2}{2} + C$$

Despejando la constante de integración C

$$C = K \cdot a \cdot \frac{h_i^2}{2}$$

Sustituyendo

$$Q \cdot x = -K \cdot a \cdot \frac{h^2}{2} + K \cdot a \cdot \frac{h_i^2}{2}$$

$$Q \cdot x = K \cdot a \cdot \left(\frac{h_i^2}{2} - \frac{h^2}{2} \right)$$

$$\therefore Q = \frac{K \cdot a}{2x} \cdot (h_i^2 - h^2)$$

Esta última expresión nos servirá para calcular el caudal en un área delimitada de la zona de estudio.

4.3.1.1.2. Resultados del cálculo de la velocidad lineal media para Punta Mita

Para iniciar el cálculo de la velocidad lineal media se caracterizará la zona tomando valores promedio de porosidad, diámetro de grano y conductividad hidráulica para arenas sin consolidar. Estos valores se elegirán ya que la zona carece una caracterización geológica detallada que pueda brindar estos datos con mayor exactitud (Tabla 5).

Tabla 5 "Propiedades físicas promedio de la zona (González, 2009)"

Tipo de sedimento	Arena sin consolidar	
Conductividad hidráulica intrínseca k	0.55	[Darcy]
Conversión de Darcy a m2	5.4281E-13	[m ²]
Diámetro de grano	0.001	[m]
Porosidad eficaz	0.19	
Conductividad hidráulica corregida para temperaturas mayores a 20 [°C]	1.5486E-11	[m/s]

Como se observó en el apartado “ 4.1.4 Punta Mita ” el fluido circulante en la zona esta predominantemente compuesto por agua meteórica, por lo tanto, las propiedades físicas serán definidas para este fluido (Tabla 6):

Tabla 6 " propiedades físicas del fluido de trabajo (Cengel & Ghajar, 2011) "

Tipo de fluido	Agua meteórica	
Temperatura del fluido	85	[°C]
Profundidad de pozo	10	[m]
Viscosidad dinámica	333.063691	[kg/ms]
Gravedad del sitio	9.81	[kg m ² /s]
Densidad del fluido	968.591758	[kg/m ³]
Peso específico	9501.88515	[N/m ³]

Con los datos tomados y las suposiciones mencionadas en el apartado anterior tenemos que la velocidad lineal media para Punta Mita es (Tabla 7):

Tabla 7 “ Velocidad lineal media del fluido geotérmico en Punata Mita (Autor) ”

Resultados		
Dirección X		
Caudal Q	2.78741E-11	[m ³ /s]
Velocidad de Darcy	2.78741E-12	[m/s]
Velocidad lineal media	0.00000000000146706	[m/s]
Número de Reynolds	4.26639E-14	Cumple

Como se puede observar el valor de la velocidad lineal media es demasiado pequeño y por lo tanto los efectos convectivos en el fenómeno de transferencia de calor en el suelo pueden ser despreciable para el análisis térmico de la estructura.

4.3.2. Análisis de transferencia de calor del suelo circundante al pozo

Para poder calcular el calor que será transmitido desde el suelo hacia la estructura termo-activa es necesario realizar el análisis considerando las propiedades físicas del suelo circundante constantes y el fenómeno de transferencia de calor del suelo al pilote geotérmico se realizara solo por mecanismos conductivos despreciando las aportaciones dados por la radiación y convección. (Hellstrom, 1991)

El análisis comenzará con la obtención del modelo analítico que nos permita conocer las características del fenómeno de transferencia de calor dentro del pozo, para esto es necesario realizar la suposición que el suelo circundante a la zona donde colocara el pozo mantendrá sus propiedades físicas constantes

4.3.2.1. Modelo de transferencia de calor dentro del intercambiador de calor: modelo analítico

Para calcular el calor transferido del suelo circundante al fluido se establecerán las siguientes consideraciones:

1. Temperatura constante en el suelo circundante a la estructura termo-activa: Esta temperatura asume de manera idealizada que la temperatura circundante a la estructura será igual que la registrada en la pluma de la ventila hidrotermal y se mantendrá constante en toda la pared del pozo.

2. Solo se consideran los efectos de transferencia de calor por conducción y convección.
3. Flujo turbulento completamente desarrollado $Re > 10\ 000$: Se establece un régimen turbulento que garantice la mayor tasa de transferencia de calor posible.
4. Régimen estacionario
5. Tubo liso
6. Se asume una condición de simetría geométrica y térmica
7. Resistencia de contacto entre los materiales despreciable: Se consideran superficies completamente lisas en la cual la unión entre materiales es perfecta evitando la aparición de una resistencia de contacto.

Para comenzar el análisis se calculará la velocidad de entrada del fluido proponiendo un flujo másico que garantice un régimen turbulento, Reynolds $> 10\ 000$, este valor se establece ya que a partir de este punto comienzan la aparición de vórtices que propician un aumento en la tasa de transferencia de calor: (Cengel & Ghajar, 2011)

$$\dot{m}_f = V * A_T * \rho$$

$$V = \frac{\dot{m}_f}{A_T * \rho}$$

Donde:

\dot{m}_f – Flujo másico $\left[\frac{kg}{s}\right]$

A_T – Área interna de la tubería $[m^2]$

V – Velocidad de entrada $[m/s]$

Conociendo la velocidad del fluido calcularemos el número de Reynolds para corroborar que se encuentra dentro del régimen turbulento:

$$Re = \frac{\rho_f V D_H}{\mu_f}$$

Donde:

Re – Número de Reynolds

ρ – Densidad del fluido de trabajo $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

D_H – Diámetro hidráulico $[m]$

μ_f – viscosidad dinámica del fluido $[Pa \cdot s]$

Posteriormente se obtendrá el factor de fricción del tubo utilizando la ley de potencia, esta ley puede ser utilizada por la consideración de flujo completamente desarrollado: (Cengel & Ghajar, 2011)

$$f = 0.184Re^{-0.2}$$

Donde:

f – factor de fricción de tubo liso

Posteriormente se calculará el número de Prandtl: (Cengel & Ghajar, 2011)

$$Pr = \frac{\mu_f Cp_f}{k_f}$$

Donde:

μ_f – Viscosidad dinámica del fluido [$Pa \cdot s$]

Cp_f – Calor específico del fluido $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$

k_f – Conductividad térmica $\left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$

Para calcular el coeficiente convectivo se calculará el número de Nusselt mediante la corrección de Gnielinsk a la ecuación de Petukhov para garantizar una mayor exactitud: (Cengel & Ghajar, 2011)

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000)(Pr)}{1 + (12.7) \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)}$$

Válida para:

$$0.5 \leq Pr \leq 2000$$

$$3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6$$

Conociendo el número de Nusselt se podrá obtener el coeficiente convectivo de la siguiente forma:

$$h_{\infty} = \frac{Nu \cdot K_f}{L}$$

Donde:

h_{∞} – Coeficiente de transferencia de calor convectivo del fluido $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$

n – factor para calefacción $n = 0.4$

L – Longitud del tubo [m]

Para obtener la temperatura de salida del intercambiador tipo U se analizará el modelo mediante una analogía a un circuito eléctrico compuesto por tres resistencias térmicas (Fig. 56), esta analogía se hace utilizando el procedimiento establecido por los investigadores Javed y Splitter con el cual se podrá obtener el calor por metro que recibe el fluido de trabajo.

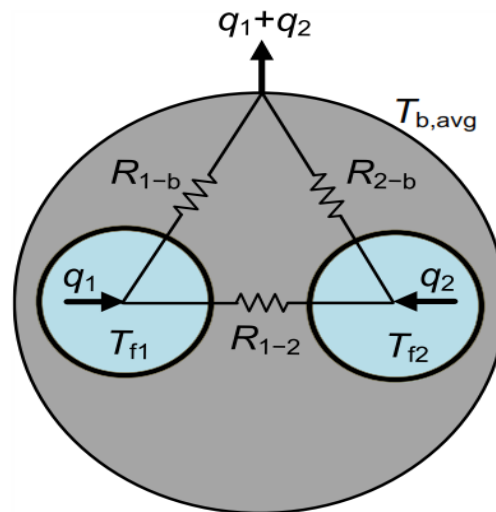


Fig. 56 "Resistencias térmicas en circuito delta (Javed & Spitler, 2016) "

La resistencia térmica R_{1-b} y R_{2-b} comprende la resistencia térmica convectiva y conductiva del tubo más los efectos de la resistencia térmica del relleno R_g . La resistencia térmica R_{1-2} comprende los efectos de la resistencia térmica conductiva y convectiva de la tubería y la resistencia térmica entre la tuberías.

Los modelos matemáticos de las resistencias térmicas quedan expresados de la siguiente forma:

$$R_{2-b} = R_{1-b} = R_{wi} + R_g$$

La resistencia térmica de la tubería se comprende de dos resistencias térmicas una ocasionada por la parte convectiva del fenómeno y la otra por la parte conductiva.

$$R_{wi} = R_{wic} + R_{wiv}$$

$$R_{wic} = \frac{1}{2\pi k_f} \ln\left(\frac{r_{po}}{r_{pi}}\right)$$

$$R_{wiv} = \frac{1}{2\pi h_{\infty} r_{pi}}$$

Donde:

R_g – Resistencia termica del relleno $\left[\frac{m K}{W}\right]$

R_{wi} – Resistencia termica de la tubería $\left[\frac{m K}{W}\right]$

R_{wic} – Resistencia termica conductiva de la tubería $\left[\frac{m K}{W}\right]$

R_{wiv} – Resistencia termica convectiva de la tubería $\left[\frac{m K}{W}\right]$

r_{po} – Radio exterior de la tubería [m]

r_{pi} – Radio interno de la tubería [m]

La resistencia térmica del relleno se obtendrá mediante la consideración de la existencia de un radio equivalente el cual se verá afectado por el espaciamiento entre las tuberías (Fig. 57).

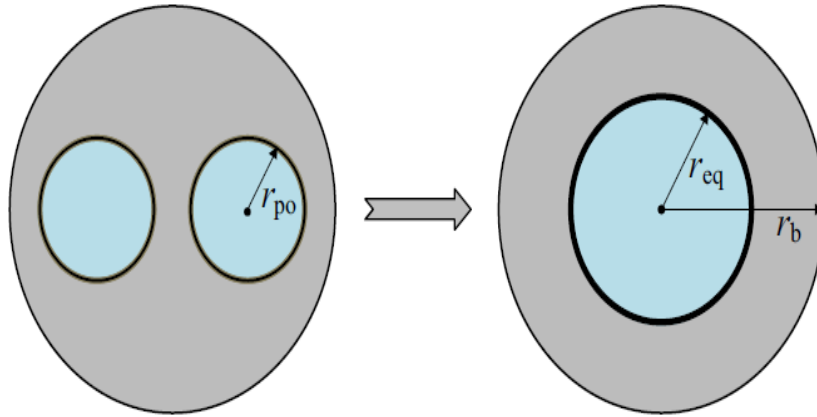


Fig. 57 " Radio equivalente (Javed & Spitler, 2017)"

$$R_g = \frac{1}{2\pi k_g} \ln \left(\frac{r_b}{r_{eq}} \right)$$

$$r_{eq} = 0.414r_{po} + 0.5S$$

Donde:

r_{eq} – Radio equivalente de la tubería [m]

r_b – Radio del pozo [m]

S – Espacio entre los centros de las tuberías [m]

En el cálculo de la resistencia térmica de la tubería se realizará una modificación al modelo considerando solo π para considerar solo la mitad de la resistencia térmica. La resistencia térmica entre tuberías queda expresada de la siguiente forma:

$$R_{1-2} = 2R_{wi} + R_{ww}$$

$$R_{ww} = \frac{\cosh^{-1} \left(\left(\frac{S^2}{r_{po}^2} \right) - 1 \right)}{(2\pi)(k_g)}$$

Donde:

R_{ww} – Resistencia del relleno entre tuberías $\left[\frac{m K}{W} \right]$

k_g – Conductividad termica del relleno

Conociendo el valor de la resistencia térmica R_{1-b} y R_{2-b} se podrá calcular el flujo de calor por metro en el tubo de entrada y salida. Para realizar este cálculo se hace la consideración que el efecto *short-circuiting* es despreciable: (Javed & Spitler, 2017)

$$q = \frac{T_{b,avg} - T_e}{2R_{1-b}}$$

Donde:

T_e – Temperatura de entrada del fluido de trabajo [°C]

$T_{b,avg}$ – Temperatura promedio del pozo [°C]

q – calor proporcionado por el relleno al fluido $\left[\frac{W}{m}\right]$

Aplicando un balance de masa y energía, sin considerar los efectos de la entropía en el sistema, se puede conocer la temperatura de salida del intercambiador de calor:

Balance de masa

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_w$$

Balance de energía

$$\dot{E}_e = \dot{E}_s$$

$$(q)(L) - (\dot{m}_w)(Cp_f)(T_s - T_e) = 0$$

$$T_s = T_e + \frac{(q)(L)}{(\dot{m}_w)(Cp_f)}$$

Donde:

\dot{m}_w – Flujo masico $\left[\frac{kg}{s}\right]$

L – Longitud total del tubo [m]

Por último, se calculará el calor de salida de la estructura mediante la siguiente expresión:

$$Q = \dot{m}_f Cp_f (T_s - T_e)$$

Donde:

Q – Calor de salida [W]

Utilizando un flujo másico de 1 [kg/s] obtenemos los siguientes resultados (Tabla 8):

Tabla 8 " Resultados con un flujo másico de 1 [kg/s] (Autor) "

mf [kg/s]	1
Re	50046.1331
V [m/s]	1.97715965
Prandtl	6.98801533
f	0.02113215
Nusselt	831.295869
h [W/m² K]	19636.9103

4.3.3. Materiales de fabricación

Como se observó en los capítulos anteriores la correcta selección de materiales garantizará el funcionamiento óptimo del pilote. En este apartado se elegirán los materiales de construcción de la tubería y el concreto del relleno acorde a las condiciones ambientales del sitio de instalación. Estos materiales deberán de satisfacer la condición de aumentar la tasa de transferencia de calor del subsuelo a la estructura termo-activa soportando la corrosión y la presión generada en el fondo marino.

4.3.3.1. Tubería

La tubería elegida es **GEOPERFORMX-V2** de la empresa **VERSAPROFILES** ya que brinda una mayor conductividad térmica que el resto de las tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE). Esta tubería es ofrecida en diversos diámetros con una conductividad térmica de 0.7 [W/mK] como se puede observar en la siguiente tabla (Tabla 9):

Tabla 9 "Dimensiones estándares de tubería GEOPERFORMX-V2 (VERSAPROFILES, 2020)"

Dimensiones estándares			
Diámetro nominal [in]	Diámetro exterior [mm]	Tolerancia [mm]	Espesor mínimo de pared [mm]
3/4	1,050	0,004	0,078
	(26,67)	(0,10)	(1,98)
1	1,315	0,005	0,097
	(33,40)	(0,13)	(2,46)
1 1/4	1,660	0,005	0,123
	(42,16)	(0,13)	(3,12)
1 1/2	1,900	0,006	0,141
	(48,26)	(0,15)	(3,58)
4	4,500	0,009	0,333
	(114,30)	(0,23)	(8,46)
6	6,625	0,011	0,491
	(168,28)	(0,28)	(12,47)

4.3.3.2. Relleno

Para el material de relleno en el apartado 3.5 se mencionaron diversas mejoras realizadas al concreto para mejorar el efecto de transferencia de calor al adherir fibras poliméricas o metálicas. Pese a que estos avances han sido reportados, la mayoría se encuentran en fases experimentales es por ello que se optó por elegir el hormigón de alta conductividad térmica **POWERCRETE** ya que este es comercializado y pueden obtenerse sus propiedades físicas con mayor facilidad. Cuenta con una resistencia inferior a 20 [MPa] el cual es un valor suficiente al tratarse de un material de relleno. Presenta una alta viscosidad lo que facilita su colocación y se puede adquirir en una mezcla seca POWER PREMIX y en su forma fresca POWERCRETE. Los valores de conductividad térmica promedio del hormigón están descritos en la siguiente tabla (Tabla 10):

Tabla 10 “ Tipos y características del hormigón POWERCRETE (Cruz, et al., 2018) ”

Característica	Power Premix	Powercrete en RMX		
		baja	media	alta
k_ humedo [W/m K]	≥ 4	≥ 3.0	≥ 3.4	≥ 4.5
k_seco [W/m K]	≈3	≈2.6	≈3	≈4

4.4. Resultados del análisis de transferencia de calor

Una vez concluido el modelo analítico del fenómeno de transferencia de calor y tomando los valores de conductividad térmica de los materiales elegidos en el apartado interior se optó por probar el desempeño teórico de dos diámetros el primero será de 1 [in] ya que este es el diámetro estándar utilizado en pilotes geotérmicos y el segundo será una tubería de 4 [in] para analizar el efecto que tiene el incrementar el área de contacto.

En el primer análisis se variará el flujo másico y el fluido de trabajo el cual ira de 0.25 hasta 2 [kg/s] utilizando agua y refrigerante R134a. La temperatura del terreno circundante, conductividad térmica del relleno, longitud y conductividad térmica de la tubería permanecerán constantes (Tabla 11):

Tabla 11 " Propiedades constantes en el diseño (Autor) "

Características de la tubería	
Longitud de tubería	20 [m]
Conductividad térmica	0.7 [W/m K]
Propiedades del relleno	
Conductividad térmica	4.5 [W/m K]
Diámetro del relleno	0.25 [m]
Propiedades del terreno circundante	
Temperatura	86 [°C]

La segunda prueba se realizará variando el diámetro del relleno y la distancia entre tuberías utilizando como fluido de trabajo agua para analizar los efectos que tienen sobre la temperatura del

relleno y sobre la temperatura de salida del fluido. En este análisis se utilizará solo la tubería de 1 [in] manteniendo el flujo másico constante en 0.25 [kg/s].

Pese a que el mayor potencial de las estructuras termo activas se nota ante el uso de fluidos cargados con nano partículas su uso en este apartado no podrá ser analizado ya que estos aún se encuentran en etapa experimental.

4.4.1. Variación del flujo másico

Para los dos tipos de fluido de trabajo probados sus propiedades físicas se mantendrán constantes a la entrada del pilote geotérmico. El radio del relleno de la estructura se mantendrá para todas las variaciones de diámetro de tubería igual a 0.25 [m] considerando un espaciamiento entre los centros de las tuberías extenso de 0.21 [m] para 1 [in] y de 0.13 [m] para 4 [in] (Fig. 58).

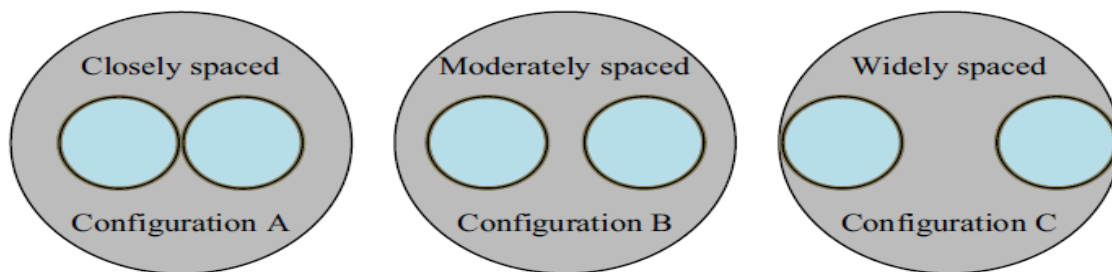


Fig. 58 " Tipos de espaciamiento en la tubería (Javed & Spitler, 2016) "

4.4.1.1. Fluido de trabajo: agua

Para el fluido de trabajo agua las propiedades a la entrada son las siguientes (Tabla 12):

Tabla 12 " Propiedades del fluido de trabajo agua (Cengel & Ghajar, 2011) "

Propiedades del fluido de trabajo		
Temperatura de entrada	20	[°C]
Densidad	1000	[kg/m ³]
Viscosidad	0.001	[N s/m ²]
Calos específico	4186	[J/kg °C]
Conductividad térmica	0.5	[W/mK]

Una vez establecidas las propiedades físicas se realizó la variación del flujo másico en los distintos diámetros arrojando los siguientes resultados (Fig. 59).

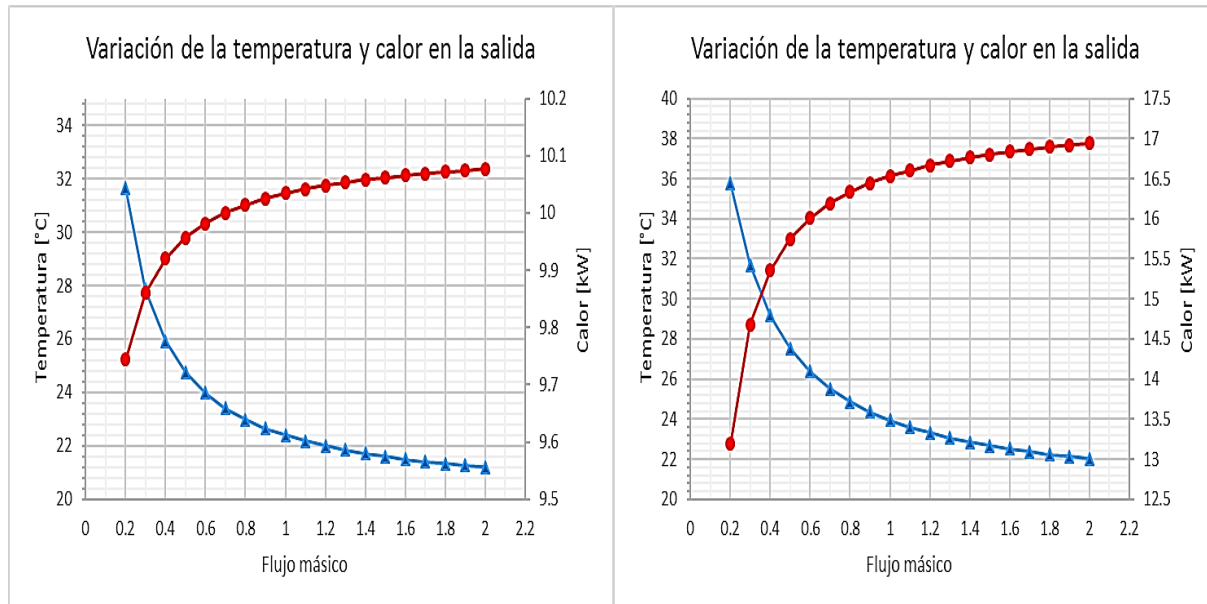


Fig. 59 " Variación de la temperatura de salida y calor en la tubería de 1 [in] (lado izquierdo) y 4 [in] (lado derecho) con agua como fluido de trabajo (Autor) "

Como se puede observar el diámetro de la tubería influye en la temperatura de salida del fluido presentando mayores temperaturas en la tubería de 4 [in]. Debido a que la longitud del tubo es de 20 [m] el intercambio de energía entre el suelo y el fluido de trabajo es poco presentando un pequeño aumento de temperatura de poco más de 10 [°C] a la salida del intercambiador.

4.4.1.2. Fluido de trabajo: refrigerante

Para el fluido de trabajo Refrigerante R134a las propiedades a la entrada son las siguientes (Tabla 13)

Tabla 13 " Propiedades del fluido de trabajo Refrigerante (Cengel & Ghajar, 2011) "

Propiedades del fluido de trabajo		
Temperatura de entrada	20	[°C]
Densidad	1225.33	[kg/m ³]
Viscosidad	0.000207	[N s/m ²]
Calos específico	1404.855	[J/kg °C]
Conductividad térmica	0.0833	[W/mK]

Una vez establecidas las propiedades físicas se realizó la variación del flujo másico en los distintos diámetros arrojando los siguientes resultados (Fig. 60).

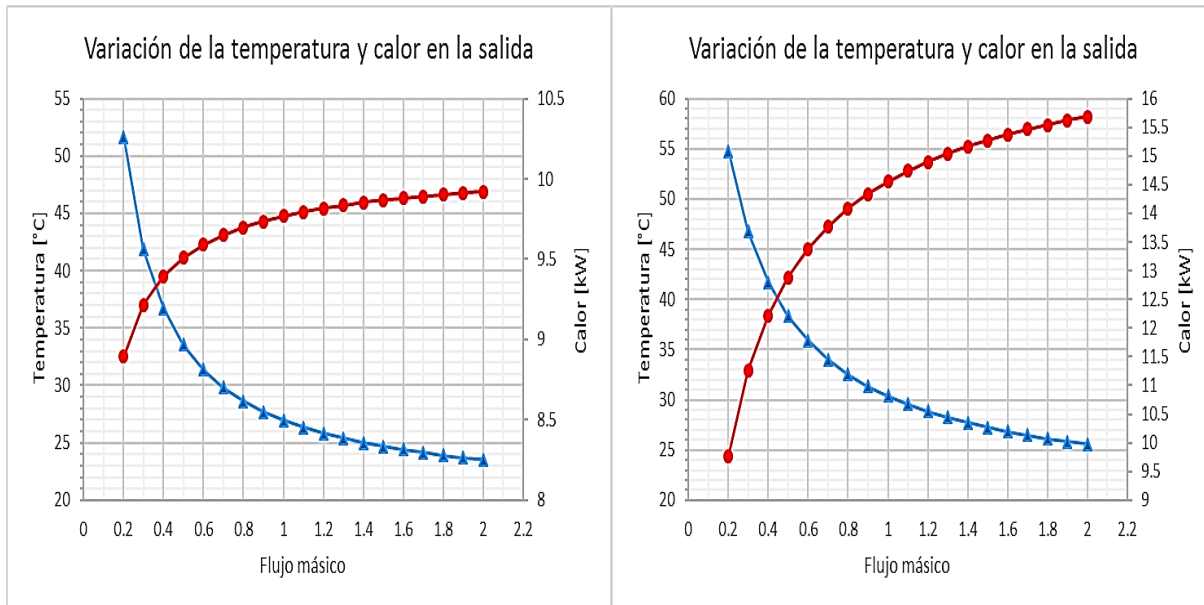


Fig. 60 " Variación de la temperatura de salida y calor en la tubería de 1 [in] (lado izquierdo) y 4 [in] (lado derecho) con R134a como fluido de trabajo (Autor) "

Después de analizar el resultado se puede observar que al utilizar refrigerante la temperatura de salida aumenta en poco más de 20 [°C] comparado con los resultados obtenidos para el agua. Si bien este fluido de trabajo presenta una mayor eficiencia de captación del calor de la energía almacenado en el subsuelo este podría significar un riesgo en la fauna marina si se llegara a presentar una fuga.

4.4.2. Variación de los parámetros de diseño del relleno

En el segundo análisis se utilizó como fluido de trabajo agua manteniendo la tubería del intercambiador de calor en el centro del pilote y un flujo másico constante de 0.2 [kg/s]. Mediante la variación del radio del relleno se puede observar que la temperatura del relleno comienza a disminuir conforme aumenta el radio (Fig. 61) y como consecuencia la temperatura de salida del intercambiador disminuye. Esto se debe a que al realizar la analogía de la existencia de un radio equivalente al aumentar el radio del relleno la resistencia de este aumenta disminuyendo el flujo de calor que llega hasta el fluido de trabajo.

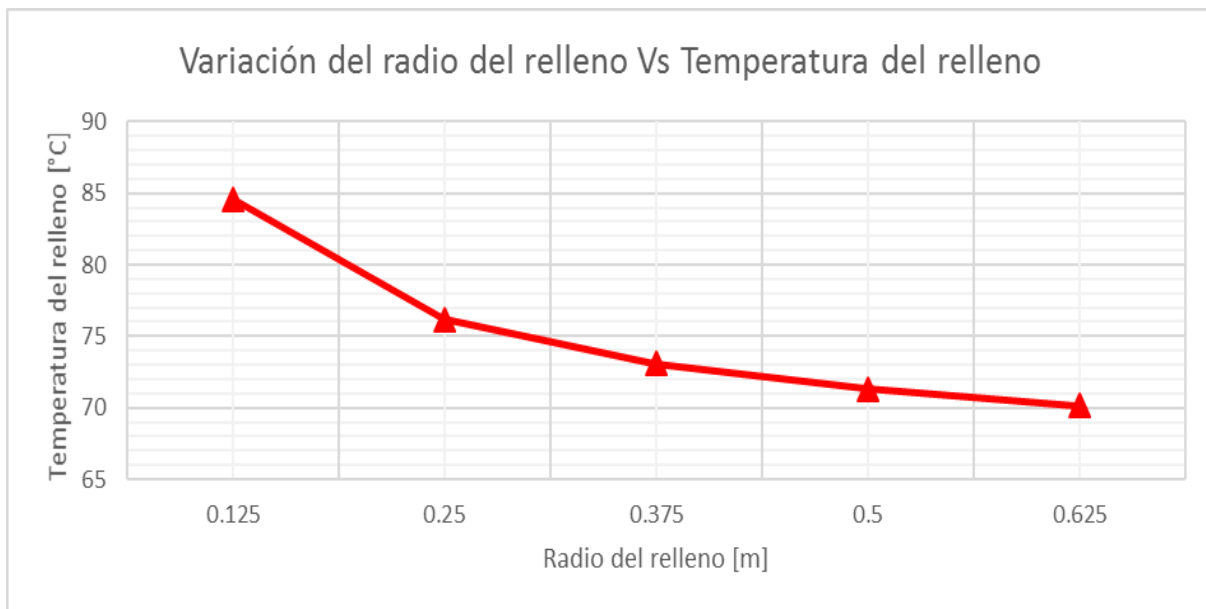


Fig. 61 “ Variación del radio del relleno (Autor)”

Al variar la distancia entre tuberías se puede observar que conforme aumenta la distancia la resistencia del relleno disminuye y la temperatura del fluido aumenta (Fig. 62). Este aumento se debe a que las tuberías se comienzan a posicionar cerca de los límites del relleno lo que disminuye la resistencia térmica entre el suelo circundante y el fluido de trabajo proporcionando un mayor intercambio de energía que aumenta la temperatura de salida del fluido de trabajo.

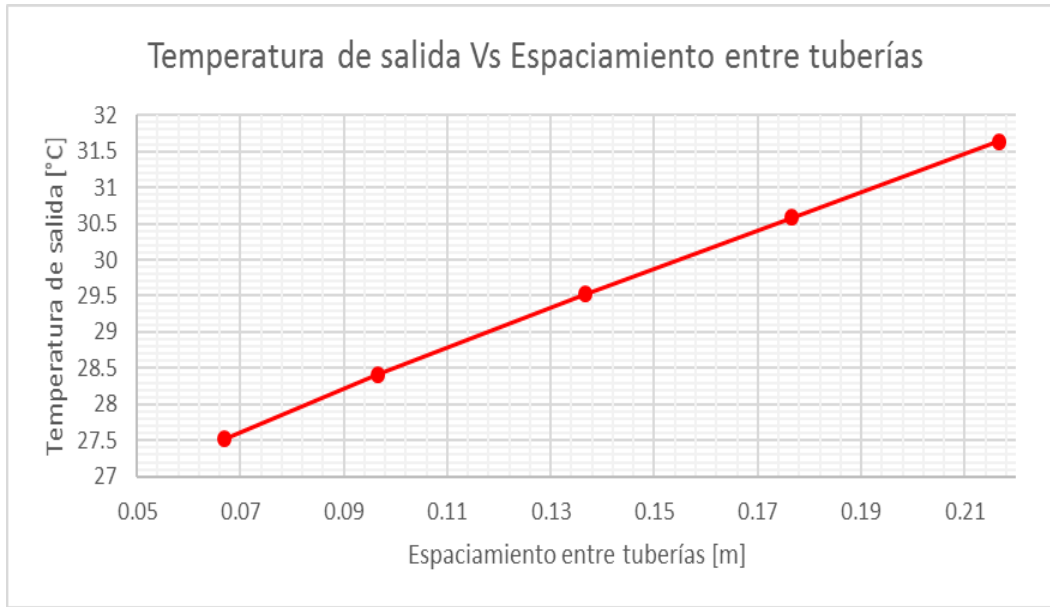


Fig. 62 “Variación del espaciamiento entre tuberías (Autor)”

4.4.3. Intercambiadores de calor en serie

La temperatura del fluido de trabajo depende principalmente del diámetro de la tubería y de su ubicación, ya que mientras más se acerca a las paredes del relleno mayor es la temperatura de salida del fluido es por ello que se propone el uso de un arreglo en serie para aumentar la temperatura de salida del fluido de trabajo. Esta propuesta se realizó bajo la suposición de que entre las estructuras térmicas no existe interacción térmica que afecte su funcionamiento.

Se mantendrá un flujo másico de 1 [kg/s] en una tubería de 1 [in] y un espaciamiento amplio entre las tuberías de 0.21 [m] en una estructura de diámetro de 0.25 [m]. El sistema funcionara bombeando el fluido de trabajo por el primer intercambiador de calor y a la salida de este se bombeará al siguiente para conseguir un aumento de temperatura siguiendo este ciclo hasta que se llegue a la máxima temperatura posible. El arreglo en serie se propone como solución al problema de la baja profundidad del pozo.

Después de realizar el análisis, utilizando agua y R-134a, se puede observar que ante el mismo número de intercambiadores la diferencia de temperaturas de salida en el último intercambiador es de 31.9 [°C] (Fig. 63).

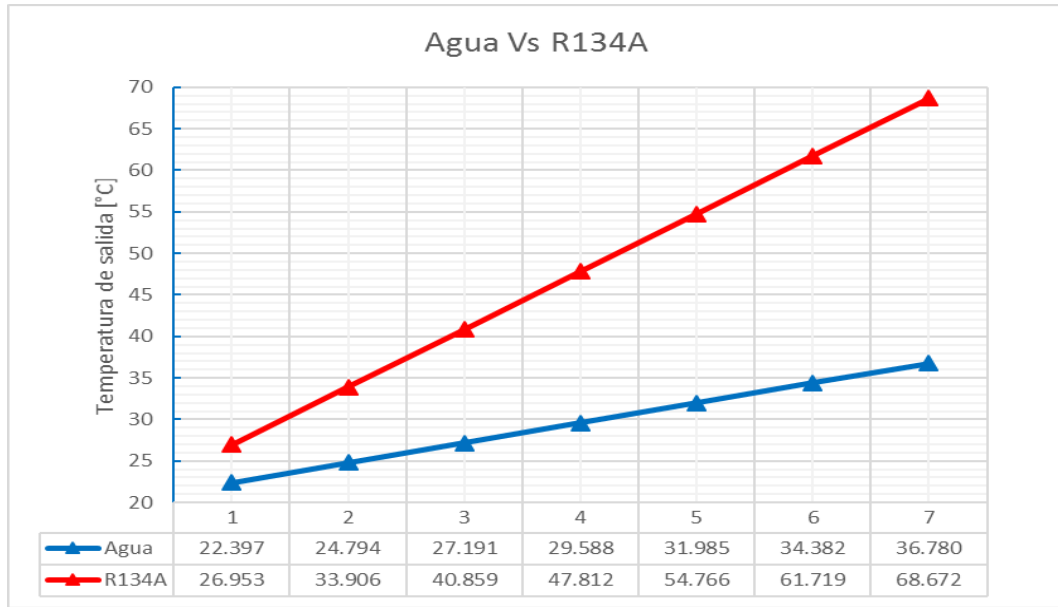


Fig. 63 “ Comparación de la temperatura de salida utilizando agua y refrigerante R134a (Autor)”

Conclusión del capítulo

En el análisis térmico se pudo observar que ante la instalación somera de las estructuras el uso de pilotes conectadas en serie pueden ser una opción factible para aprovechar al máximo el calor almacenado en la zona. El uso de refrigerantes aumenta considerablemente el calor aprovechado por la estructura, aunque presenta el inconveniente de que ante una fuga podría resultar nocivo para la fauna marina.

También se puede observar que ante profundidades someras de instalación el recurso obtenido no podría funcionar para la generación de energía eléctrica pero si para su implementación en proyectos de usos directos que ayuden a minimizar el consumo de combustibles fósiles ayudando a minimizar el impacto ambiental, algunos ejemplos de los usos que podrían tener estas estructuras en profundidades someras son: balneología, invernaderos, deshidratación de alimentos, acuicultura y sistemas de acordonamiento de espacios.

Trabajando con mayores profundidades las aplicaciones de las estructuras termo-activas podrían aumentar llegando hasta el punto de poder generar energía eléctrica si trabajamos con temperatura cercanas a las estimadas en los reservorios de calor que son mayores a los 200 [°C].

Capítulo 5. Propuesta de aplicación

En el capítulo anterior se pudo observar que la temperatura obtenida en la zona de Punta Mita entraba dentro del rango de baja entalpia lo que limitaba su aplicación al campo de usos directos. Aunque el principal objetivo a nivel mundial es utilizar en mayor medida el uso de energías limpias para la generación de energía eléctrica y poder minimizar el impacto ambiental, los proyectos en el campo de los usos directos también sirven para ayudar al medio ambiente al utilizar menor cantidad de combustibles fósiles y evitar la emanación de gases de efecto invernadero a la atmosfera, un ejemplo claro de esto son los sistemas de acondicionamiento de hogares que día a día han ido evolucionando apostando más por el uso de sistemas geotérmicos que por el uso de sistemas eléctricos.

En este capítulo analizaremos el desempeño de la estructura termo-activa ante un proyecto de usos directos específicamente en el campo de la acuicultura. Se eligió este proyecto entre los demás posibles usos que se le pueden dar a los pilotes geotérmicos, en una instalación somera, por la amplia variedad de información bibliográfica con la que se cuenta acerca del tema, esto facilita el realizar un análisis rápido sobre los materiales necesarios para su aplicación. La especie elegida es la tilapia la cual es una de las especies con mayor documentación sobre las diferentes etapas de cría en el país y es una de las especies con mayor rentabilidad. Esta información facilita el implementar este proyecto como ejemplo de uno de los posibles usos de las estructuras termo-activas.

La ventaja que tiene el ofrecer este proyecto es el de poder proveer se un suministro constante de tilapia aumentado la producción anual del estado, esta especie en particular es de agua dulce, lo que ofrece diversidad a la gama de peces ofertados en la zona que son obtenidos mediante métodos de pesca tradicional. El sistema cuenta con la ventaja de no depender de las condiciones climatológicas ya que se asegura un suministro constante de agua caliente que facilita la cosecha del producto en más de una ocasión al año.

Para este sistema se propone la instalación en la costa de un tanque de almacenamiento de agua de donde se obtendrá el fluido de trabajo y desde ahí será bombeado hasta la zona del recurso

geotérmico, aproximadamente 400 [m], donde elevará su temperatura para su posterior regreso a los tanques de cría (Fig. 64).

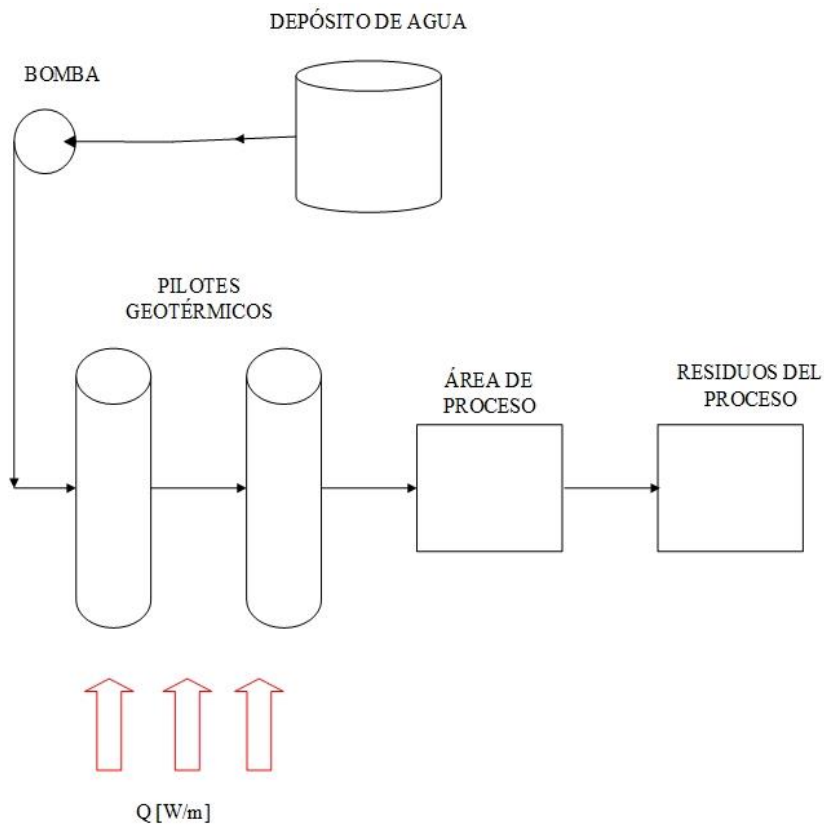


Fig. 64 “Diagrama de proceso (Autor)”

5.1. Proyecto: Acuicultura

La acuicultura es una opción de producción de alimentos de bajo impacto ambiental en pequeña y gran escala. Esta práctica puede ser dividida acorde a su nivel de producción en intensiva, semi intensiva y extensiva. La relevancia de la acuicultura en la actualidad ha incrementado de acuerdo con estimaciones de la FAO se encuentra en el conjunto de actividades de mayor crecimiento. Este proceso de cultivo surge como una alternativa para aumentar la producción de cultivo de organismos acuáticos. Actualmente la acuicultura aporta cerca del 50 % de la producción mundial de pescado. (Guzmán, et al., 2019)

En los sistemas de acuicultura se debe tener control sobre las propiedades del agua, uno de los mayores requerimientos es la disponibilidad de calor continuo para mantener la temperatura constante ya que esta tiene una afectación directa en el promedio de sobrevivencia y la tasa de crecimiento de la especie. El uso de calderas o calentadores eléctricos para la generación de calor representa un aumento considerable en los costos de inversión además incurre en el uso de combustibles fósiles. (Guzmán, et al., 2019)

Para este proyecto se propone el uso del recurso geotérmico obtenido como alternativa al uso de combustibles fósiles. La especie elegida para cultivar es tilapia la cual es una especie originaria de África introducida a México desde 1964 donde su desarrollo biotecnológico está completo para analizar las diferentes etapas de cultivo de la especie. Esta especie es de alta rentabilidad por sus atributos de rápido crecimiento, resistencia a las enfermedades, elevada productividad y tolerancia a condiciones de alta densidad. La acuicultura aporta el 91 % de la producción de tilapia en México y es cultivada en 31 estado de la República Mexicana. Su ciclo de maduración va de los 4 a 6 meses para los machos y de 3-5 meses para la hembra, tiene un porcentaje de sobrevivencia de 80-95 % y tiene tiempos de cultivo bien establecidos en los cuales puede alcanzar una talla mayor a los 350 [g] la cual puede ser obtenida ofreciendo una mayor cantidad de alimento en la última etapa. (Tabla 14). (Inapesca, 2012)

Tabla 14 “ Porcentaje de alimento por etapa (CESAY A.C., 2017)”

Tabla básica para alimentación en tilapia				
peso promedio del pez [g]	Etapas	Días de cultivo	% de alimento en base a la biomasa	Frecuencia de alimentación
0.05	Siembra	60	5	4
0.15	Levante	45	3	3
0.5	Engorda	75	2	2

Las temperaturas del agua dentro del estanque van de los 24 a los 32 [°C] y requiere un porcentaje de recambio de agua en ciclos cerrados de 5 al 20 %. La densidad de producción por metro cuadrado en el estanque varía de acuerdo a la etapa de cultivo en la que se encuentre la especie presentando los siguientes valores (Tabla 15):

Tabla 15 “ Densidad de cultivo por metro cuadrado (Inapesca, 2012)”

Etapa de cultivo	Superficie de cultivo [m2]		Densidad de siembra [org/m2]	
Siembra	350	850	100	150
Pre engorda	400	1500	20	50
Engorda	1000	5000	10	30

5.2. Producción de tilapia

Para comenzar el dimensionamiento de la producción de tilapia es necesario conocer la temperatura media, mínima y la velocidad promedio del viento del lugar de instalación (Tabla 16). Estos datos servirán para calcular las pérdidas de calor por convección y radiación.

Tabla 16 “ Temperaturas de Punta Mita, Nayarit (SSN, 2020)”

Datos		
Temperatura media	26.2	[°C]
Temperatura mínima	16	[°C]
Velocidad promedio del viento	2.78	[m/s]

Posteriormente se calculará el flujo másico necesario para alimentar 27 estanques de producción de 6 [m] de diámetro los cuales deberán mantener una temperatura promedio del agua en el estanque de 28 [°C] y deberán estar cubiertos para evitar las pérdidas por evaporación: (Boyd & Rafferty, 1998)

$$\dot{m}_w \times Cp \times (T_{int} - T_e) = \text{perdidas} + \dot{m}_{out} \times Cp \times T_e$$

Donde:

perdidas – pérdidas por convección y radiación

\dot{m}_{out} – masa de salida del estanque $\left[\frac{kg}{s}\right]$

T_{int} – Temperatura a la salida del intercambiador [°C]

T_e – Temperatura del estanque [°C]

Las pérdidas por convección se originan por el intercambio de energía entre la temperatura del agua del estanque y el aire en el medio ambiente (Boyd & Rafferty, 1998), estas serán calculadas mediante la siguiente expresión: (Lund, 2017)

$$q_{conv} = 9.045 \times V_{aire} \times A_T \times (T_e - T_{aire})$$

Donde:

q_{conv} – Perdidas de calor por conveccion [W]

V_{aire} – Velocidad promedio del aire en la zona de instalacion $\left[\frac{m}{s}\right]$

A_T – Área del tanque de cria [m^2]

T_{aire} – Tempertaura del aire en la zona de instalación [$^{\circ}C$]

Las pérdidas presentadas por radiación se originan por la diferencia de temperaturas entre el agua del tanque y el vapor de agua que irradia la superficie del estanque (Boyd & Rafferty, 1998), estas serán calculadas utilizando la siguiente expresión: (Lund, 2017)

$$q_{rad} = 0.00000001836 \times ((492 + 1.8T_e)^4 - (492 + 1.8T_{aire})^4) \times A_T$$

Las pérdidas por conducción se omiten en la mayoría de los casos ya que son demasiados pequeñas. La T_{int} se establece por debajo de la temperatura máxima soportada por la especie en cría para evitar que esta muera y la T_e se establece en la temperatura óptima para el crecimiento de la especie. Con estos datos se obtiene el flujo másico promedio a la cual el tanque funcionara y el flujo másico máxima el cual solo será requerido ante condiciones limite (Tabla 17).

Tabla 17 “ Flujo másico promedio y Flujo másico máximo (Autor) ”

Tint	32	[$^{\circ}C$]
Te	26	[$^{\circ}C$]
Convección	230351.349	
Radiación	182002.225	
Q	412353.573	[W]
Flujo másico promedio	0.00366941	[kg/s]
Flujo másico máximo	4.56345256	[kg/s]

Para mantener este flujo másico se necesitan 15 pilotes geotérmicos conectados en serie con una tubería de 0.025 [m] y una longitud de 10 [m].

5.3. Bombeo

Para transportar el fluido caliente de la zona del recurso a la costa, donde se instalarán los tanques, se calculará la potencia de la bomba mediante el uso de las siguientes consideraciones:

- Altura del tanque de almacenamiento: 5 [m]
- Longitud total de tubería: 1125 [m]
- Tubo liso con un factor de fricción de 0.029
- Tubería aislada para evitar pérdidas de energía en el transporte del fluido
- Tubería de HDPE de 4 [in] de diámetro

Para calcular la potencia necesaria para bombear el fluido de trabajo a la zona del recurso geotérmico se utilizó la siguiente expresión: (Cafaggi, et al., 2016)

$$P_H = \rho \times g \times Q \times H_B$$

Donde:

P_H – Potencia de la bomba [W]

Q – Caudal de salida $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

H_B – Carga que adiciona la bomba [m]

Para obtener el caudal de salida de la bomba multiplicaremos la velocidad que obtuvimos en el apartado anterior para mantener un flujo turbulento por el área transversal del tubo:

$$Q = V \times A_T$$

$$A_T = \pi \times r_{pi}^2$$

Donde:

A_T – Área transversal [m²]

La carga que adiciona la bomba es el término que engloba la carga por energía cinética, energía potencial, el trabajo por presión y las pérdidas a lo largo del circuito.

$$H_B = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + h_l$$

$$h_l = f \times \frac{L_T}{D_{in}} \times \frac{V^2}{2}$$

Donde:

ΔZ – Diferencia de alturas [m]

ΔP – Diferencia de presiones entre la succión y la descarga [Pa]

γ – Peso específico $\left[\frac{N}{m^3}\right]$

g – Gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

h_l – Perdidas primarias [m]

D_{in} – Diametro interno de la tubería

L_T – Longitud total de la tubería [m]

La potencia obtenida para nuestro sistema es (Tabla 18):

Tabla 18 “ Potencia de la bomba (Autor) ”

Potencia		
Re	56301.8997	
Densidad	1000	[kg/m ³]
Gravedad	9.81	[m/s ²]
Q	0.00449269	[m ³ /s]
HB	81.3542895	[m]
PH	3585.55264	[W]
	4.80637082	[Hp]

Para asegurar un buen desempeño del sistema se elegirá una bomba de 5 [Hp] para agregar un factor de seguridad en caso que la tubería presente incrustaciones y aumenten las perdidas en la tubería.

5.4. Análisis económico

Para analizar la factibilidad económica de la extracción del recurso geotérmico submarino y su aplicación en el proyecto de acuicultura se realizará un modelo financiero el cual permite plantear las condiciones de inversión, operacionales y costos en un determinado horizonte de tiempo, sobre las cuales se basará el modelo financiero para evaluar su factibilidad económica.

El primer paso para realizar este análisis será definir un plan de trabajo en el cual se establecerán la duración de los procesos, fechas de reproducción, siembra y cosecha de la tilapia. Este plan servirá para dimensionar el monto de inversión para un determinado nivel de producción a partir del cual se obtendrá la proyección de ingresos a obtener de acuerdo a las condiciones del mercado en un horizonte de tiempo determinado y se estimaran los costos en el mismo periodo de tiempo. Con estos datos se obtendrá el flujo de caja libre que el proyecto puede obtener en el periodo de tiempo analizado y se calcularán los indicadores financieros para determinar la viabilidad económica del proyecto.

5.4.1. Plan de operaciones

El desarrollo del plan de operaciones servirá para establecer las fechas de inicio de la siembra, levante, engorda y reproducción. Con estas fechas se podrá obtener un estimado de los ingresos obtenidos por cosecha considerando un precio promedio de venta en los meses de cosecha de los últimos cinco años.

Este plan de producción se basa en la densidad de organismos por metro cuadrado en cada estanque proponiendo el uso de 3 tanques para la siembra, 6 para el levante y 15 tanques para la etapa de engorda. Entre cada etapa se propone el uso de un factor de sobrevivencia para acercar el modelo financiero a la realidad. Este porcentaje cubrirá las pérdidas que se presenten en el cambio de estanque en cada una de las etapas. El porcentaje elegido es del 95 % para la etapa de siembra a levante y para la etapa de levante a engorda. En la siguiente tabla se describirá el plan de producción de los primeros dos años (Tabla 19), los siguientes años de análisis se comportarán igual que el año dos y por ello se omite su descripción en la tabla.

Tabla 19 “ Plan de producción (Autor) ”

año	lote	Etapa	Fecha de inicio	Fecha de termino	Número de estanques	unidades	
1	1	Siembra	01-oct	30-nov	3	12600	
		Levante	01-dic	15-ene	9	11970	
		Engorda	16-ene	31-mar	15	11372	
	2	Reproducción	01-dic	31-dic	3	12600	
		Siembra	01-ene	28-feb	3	12600	
		Levante	01-mar	15-abr	9	11970	
	3	Engorda	16-abr	30-jun	15	11372	
		Reproducción	01-mar	31-mar	3	12600	
		Siembra	01-abr	31-may	3	12600	
	4	Levante	01-jun	15-jul	9	11970	
		Engorda	16-jul	30-sep	15	11372	
		Reproducción	01-jun	30-jun	3	12600	
	2	1	Siembra	01-jul	31-ago	3	12600
			Levante	01-sep	15-oct	9	11970
			Engorda	16-oct	31-dic	15	11372
			Reproducción	01-sep	30-sep	3	12600
2		Siembra	01-oct	30-nov	3	12600	
		Levante	01-dic	15-ene	9	11970	
		Engorda	16-ene	31-mar	15	11372	
		Reproducción	01-dic	31-dic	3	12600	
3		Siembra	01-ene	28-feb	3	12600	
		Levante	01-mar	15-abr	9	11970	
		Engorda	16-abr	30-jun	15	11372	
		Reproducción	01-mar	31-mar	3	12600	
4		Siembra	01-abr	31-may	3	12600	
		Levante	01-jun	15-jul	9	11970	
		Engorda	16-jul	30-sep	15	11372	
		Reproducción	01-sep	30-sep	3	12600	
1	Siembra	01-oct	30-nov	3	12600		
	Levante	01-dic	15-ene	9	11970		
	Engorda	16-ene	31-mar	15	11372		
	Reproducción	01-sep	30-sep	3	12600		

5.4.2. CAPEX

El monto de inversión necesario para iniciar el montaje del sistema de acuacultura y las estructuras termo-activas se muestran en la siguiente tabla (Tabla 20) la cual incluye los equipos necesarios para la cría de tilapias, las estructuras termo-activas, perforación de pozos, tubería de circulación, bomba de circulación, operario, gastos eléctricos, costos por materia prima y alimentos para las distintas etapas de cría. El costo de las estructuras termo activas se estima del costo promedio de construcción establecido por *CYPE ingenieros* este costo se eligió ya que engloba todos los materiales de construcción que con lleva el pilote geotérmico, los costos de alevines y hembras reproductoras se obtuvieron de la empresa *Mexi Fish* y el costo del alimento para las distintas etapas de cría de la empresa *GrowFish*.

Tabla 20 “ CAPEX (Autor) “

	Cant.	Costo unitario	Mes											Total		
			Oct.	Nov.	Dic.	En.	Febr.	Mzo.	Abr.	My	Jun.	Jul.	Agto		Sept	
Inversiones fijas			\$799,811.40													\$799,811.40
Bomba de circulación	1	\$11,000.00	\$11,000.00													\$11,000.00
Pilotes geotérmicos	15	\$13,576.00	\$203,640.00													\$203,640.00
Rollo de Tubería de 1 [in]	820	\$153.00	\$125,490.40													\$125,490.40
Tanque de cría	27	\$11,899.00	\$321,273.00													\$321,273.00
Perforación	150	\$883.50	\$132,528.00													\$132,528.00
Reproductor de Tilapia	29	\$200.00	\$5,880.00													\$5,880.00
Capital de trabajo			\$56,292.00													\$250,808.80
Operario	1	\$185.60	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80								\$33,400.80
Alimento	1		\$23,190.30		\$28,893.20	\$97,222.00		\$28,893.20								\$178,198.70
Consumo eléctrico	1	\$2,334.90	\$2,334.90	\$2,334.90	\$2,334.90	\$2,334.90	\$2,334.90	\$2,334.90								\$14,009.30
Aluvi3n de tilapia	12600	\$2.00	\$25,200.00													\$25,200.00
CAPEX			\$856,103.40	\$7,901.70	\$36,794.90	\$105,123.70	\$7,901.70	\$36,794.90	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$1,050,620.20

5.4.3. Proyección de ingresos

En las siguientes tablas (Tabla 21, Tabla 22) se puede observar el desglose de la proyección de ingresos para el primer año de producción y para el horizonte de evaluación de 10 años de operación acorde al plan de operaciones establecido, considerando el precio de venta promedio de los últimos cinco años en el mercado la Nueva Viga de la Ciudad de México (SNIIM, 2020). Para los años posteriores al primero año de operación se realizó un ajuste al precio de venta con la inflación proyectada año a año.

Tabla 21 “Proyección de ingresos para el primer año de producción (Autor)”

Ingresos												
mes	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
inflación												
Kg cosechados						5686			5686			5686
Precio Promedio mensual	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$38.57	\$ -	\$ -	\$40.34	\$ -	\$ -	\$40.52
Ingresos obtenidos por cosecha	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$219,309.02	\$ -	\$ -	\$229,395.98	\$ -	\$ -	\$230,396.72

Tabla 22 “Ingresos para el horizonte de evaluación (Autor)”

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
inflación	0.0348	0.0345	0.0344	0.0342	0.034	0.0348	0.0345	0.0344	0.0342	0.034
Kg cosechados	\$17,058.00	\$22,744.00	\$22,744.00	\$22,744.00	\$22,744.00	\$22,744.00	\$22,744.00	\$22,744.00	\$22,744.00	\$22,744.00
Precio Promedio mensual										
Ingresos obtenidos por	\$679,101.72	\$939,087.96	\$971,392.59	\$1,004,614.21	\$1,038,771.10	\$1,074,920.30	\$1,112,005.10	\$1,150,258.10	\$1,189,596.90	\$1,230,043.20
Total	\$4,632,967.58									

5.4.4. OPEX

En este apartado se definirán los costos y gastos operacionales los cuales incluyen alimento, operario, consumo eléctrico y depreciaciones, para los 10 años de evaluación (Tabla 24), desglosando el primer año (Tabla 23). Para cada lote se propone sembrar 12 600 alevines los cuales mantendrán un consumo promedio de alimento de 31.5 [kg] por día en la etapa de siembra, 53.8 [kg] en la etapa de levante y 90.9 [kg] en la etapa de engorda. El costo promedio por kilo se obtuvo de la marca *Grow fish*, utilizando los costos por bulto de alimento para tilapia de 1.5 [mm], 2.5 [mm] y 3.5 [mm]. (ADM, 2020)

El consumo eléctrico se calculó en base a las tarifas establecidas por la CFE considerando que la bomba de circulación trabajará las 24 horas del día de las cuales 6 serán en carga base, 16 en intermedia y 2 en punta. (CFE, 2020)

Por último, se obtuvo el valor de la depreciación anual obteniendo los porcentajes de depreciación del diario oficial de la federación manejando el 5 % para infraestructura y el 20 % para maquinaria. (Segob, 2012)

Tabla 23 “ Desglosé de los costos y gastos en el primer año de operación (Autor) ”

Mes	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
inflación												
alimento	\$23,190.30		\$28,893.19	\$97,222.02		\$28,893.19	\$97,222.02		\$28,893.19	\$97,222.02		
Operario	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80	\$5,566.80
Electricidad	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88	\$2,334.88
Depreciaciones												
Total	\$31,091.98	\$7,901.68	\$36,794.86	\$105,123.70	\$7,901.68	\$36,794.86	\$105,123.70	\$7,901.68	\$36,794.86	\$105,123.70	\$7,901.68	\$7,901.68

Tabla 24 “ OPEX (Autor) ”

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inflación	0.0348	0.0345	0.0344	0.0342	0.034	0.03438	0.034296	0.0342552	0.03422624	0.034231488
Alimento	\$401,535.92	\$491,974.72	\$508,898.65	\$526,302.99	\$544,197.29	\$563,135.35	\$582,563.52	\$602,603.71	\$623,212.75	\$644,401.99
Operario	\$66,801.60	\$66,801.60	\$66,801.60	\$66,801.60	\$66,801.60	\$66,801.60	\$66,801.60	\$66,801.60	\$66,801.60	\$66,801.60
Electricidad	\$28,018.54	\$28,985.18	\$29,982.27	\$31,007.66	\$32,061.92	\$33,164.21	\$34,301.61	\$35,476.62	\$36,690.85	\$37,946.83
Depreciaciones	\$132,280.68	\$132,280.68	\$132,280.68	\$132,280.68	\$132,280.68	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Total	\$628,636.74	\$720,042.18	\$737,963.20	\$756,392.93	\$775,341.49	\$663,101.16	\$683,666.73	\$704,881.92	\$726,705.20	\$749,150.42
OPEX	\$7,145,881.98									

5.4.5. Flujo de caja libre

El flujo de caja libre se muestra en la siguiente tabla (Tabla 25) en el cual se incluyen el total de los costos por año e ingresos considerando la variación anual en la tasa de inflación. Con la proyección de los ingresos y costos se obtienen las utilidades operacionales sobre las cuales se aplica el impuesto acorde a la ley del ISR. Con esto se obtiene la utilidad neta y se estiman los flujos de caja libre por año para calcular los indicadores financieros de la evaluación.

Tabla 25 “ Flujo de caja libre (Autor) ”

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos		\$679,101.72	\$939,087.96	\$971,392.59	\$1,004,614.21	\$1,038,771.10	\$1,074,920.33	\$1,112,005.08	\$1,150,258.06	\$1,189,596.88	\$1,230,043.18
Costos		\$628,636.74	\$720,042.18	\$737,963.20	\$756,392.93	\$775,341.49	\$663,101.16	\$683,666.73	\$704,881.92	\$726,705.20	\$749,150.42
Utilidad bruta		\$50,464.99	\$219,045.78	\$233,429.39	\$248,221.28	\$263,429.61	\$411,819.17	\$428,338.35	\$445,376.13	\$462,891.68	\$480,892.76
G. Vent y adm											
Utilidad operacional		\$50,464.99	\$219,045.78	\$233,429.39	\$248,221.28	\$263,429.61	\$411,819.17	\$428,338.35	\$445,376.13	\$462,891.68	\$480,892.76
Gastos financieros											
Utilidad antes de impuestos		\$50,464.99	\$219,045.78	\$233,429.39	\$248,221.28	\$263,429.61	\$411,819.17	\$428,338.35	\$445,376.13	\$462,891.68	\$480,892.76
Impuestos (30%)		\$15,139.50	\$65,713.73	\$70,028.82	\$74,466.39	\$79,028.88	\$123,545.75	\$128,501.51	\$133,612.84	\$138,867.50	\$144,267.83
PTU(10%)		\$5,046.50	\$21,904.58	\$23,342.94	\$24,822.13	\$26,342.96	\$41,181.92	\$42,833.84	\$44,537.61	\$46,289.17	\$48,089.28
Utilidad Neta		\$30,278.99	\$131,427.47	\$140,057.63	\$148,932.77	\$158,057.76	\$247,091.50	\$257,003.01	\$267,225.68	\$277,735.01	\$288,535.66
Depreciación		\$132,280.68	\$132,280.68	\$132,280.68	\$132,280.68	\$132,280.68	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Amortizaciones											
Cambios en el capital de trabajo											
CAPEX	\$1,050,620.18										
Inversiones fijas	\$799,811.42										
Capital de trabajo	\$250,808.76										
Flujo de caja libre	-1050620.182	\$162,559.68	\$263,708.15	\$272,338.32	\$281,213.46	\$290,338.45	\$247,091.50	\$257,003.01	\$267,225.68	\$277,735.01	\$288,535.66

5.4.6. Indicadores financieros y análisis de rentabilidad

Para conocer la viabilidad económica del proyecto se estiman los indicadores financieros a partir de los flujos de caja obtenidos. Para esto se calculó el costo medio ponderado del capital (WACC) (Diez, 2016), considerando una tasa de riesgo del país de 1.18%, un valor beta de 0.64 para labores agrícolas y una tasa libre de riesgo de 8.54 % obtenida de un bono a diez años del banco de México, con lo que se obtiene una WACC de 9.29 % (Damodaran, 2020).

$$WACC = (k_e) \left(\frac{E}{D + E} \right) + (k_d) \left(\frac{D}{D + E} \right)$$

Donde:

K_e – Costo del patrimonio

k_d – costo de la deuda, después de impuestos

E – Patrimonio

D – Deuda

Al no tener contemplada la adquisición de una deuda la expresión se resume a:

$$WACC = k_e \frac{E}{D + E}$$

$$k_e = R_f + (\beta \times R_p)$$

Donde:

R_f – Tasa libre de riesgo

β – Riesgo sistémico del sistema

R_p – Prima de riesgo por país

En la siguiente tabla se muestran los indicadores financieros obtenidos (Tabla 26):

Tabla 26 “ Indicadores financieros (Autor) ”

Horizonte de evaluación	10 años
WACC	9.29%
TIR	20%
VPN	\$568,444.93
Pay Back (meses)	50.9
Pay Back (años)	4.2
ROI	18.53%

Con las condiciones planteadas para el funcionamiento del proyecto ofreciendo en promedio cuatro cosechas al año con una producción de más de 11 mil tilapias en cada cosecha y con una inversión de \$1,050,620.18 el proyecto tiene la capacidad de generar efectivo para un valor presente neto del 9.29 %. Obteniendo el valor presente neto se puede observar que al ser positivo se espera que el proyecto sea viable para la inversión

El monto de la inversión presenta un periodo de recuperación de 50.9 meses aproximadamente 4.2 años. En las condiciones planteadas, se identifica un valor promedio de retorno sobre la inversión de 18.53 % anual, lo que indica que se puede obtener hasta el 18 % de la inversión anualmente.

5.5. Análisis de riesgo

Pese a que nuestro análisis anterior indicó valores favorables para la inversión del proyecto el análisis de riesgo permitirá estudiar las diversas posibilidades que pueden presentarse en el mercado arrojando resultados para los mejores y peores escenarios en los cuales puede incurrir el proyecto. Para realizar este análisis es necesario definir variables de entrada y a través del uso del simulador **@RISK** podemos determinar su comportamiento definiendo una distribución de probabilidad acorde a sus características.

5.5.1. Variables del modelo

Las variables definidas para el modelo deben de ocasionar cambios sobre el comportamiento del proyecto, es por ello que las variables elegidas son el precio del alimento en las tres etapas de

cría, los precios de venta en los distintos meses de cosecha, el porcentaje de sobrevivencia entre las etapas y el peso final del producto cosechado. Las distribuciones de probabilidad definidas son las siguientes:

- **Precio de compra del alimento**

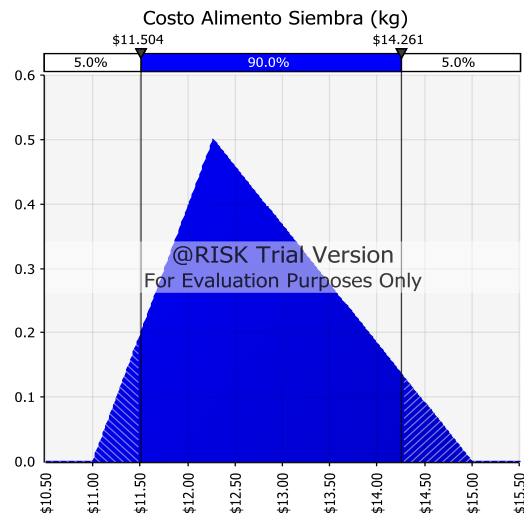


Fig. 65 “ Distribución triangular del costo del alimento de siembra (Autor) ”

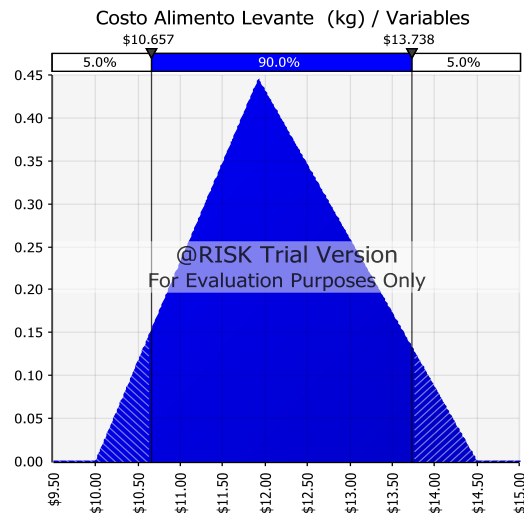


Fig. 66 “ Distribución triangular del costo del alimento de levante (Autor) ”

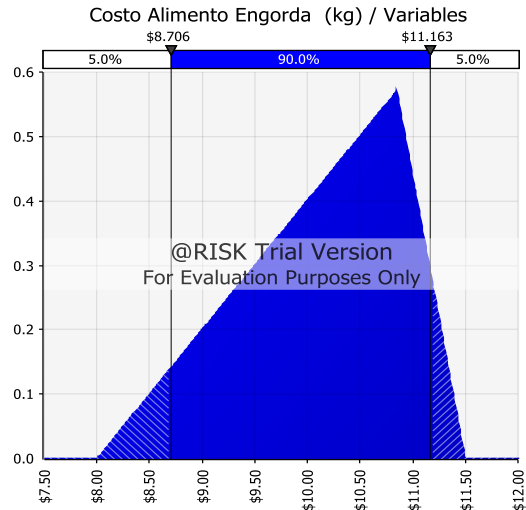


Fig. 67 “ Distribución triangular del costo del alimento de engorda (Autor) ”

El precio de compra del alimento por kilo se obtuvo de la empresa **Grow fish** manteniendo un valor de referencia de \$ 12.27 para la siembra, \$11.92 para el levante y \$10.85 para la engorda, con el cual se establece una distribución triangular para los tres tipos de alimento la cual señala que con una probabilidad del 90 % el precio oscilara entre los \$11.5 y los \$14.2 para la siembra (Fig. 65), \$10.6 y \$13.7 para el levante (Fig. 66) y \$8.7 y \$11.1 para la engorda (Fig. 67).

- **Porcentaje de sobrevivencia**

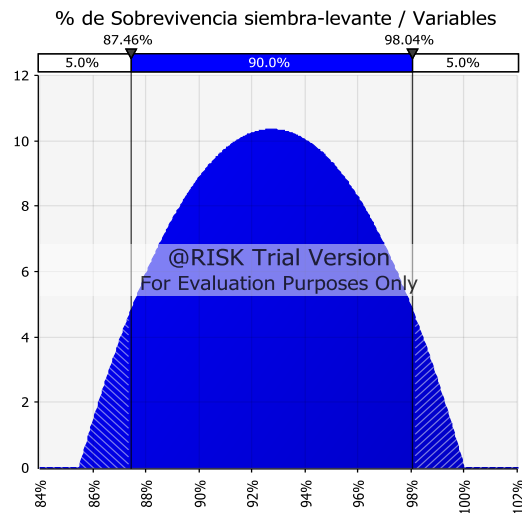


Fig. 68 “ Distribución normal para el porcentaje de sobrevivencia siembra-levante (Autor) ”

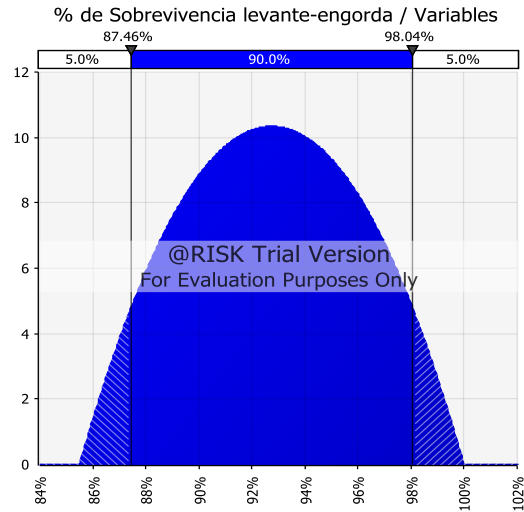


Fig. 69 “ Distribución normal para el porcentaje de supervivencia levante-engorda (Autor) ”

El porcentaje de supervivencia entre cada etapa se estableció para considerar un porcentaje de pérdidas del total de la producción sembrada asignándole una distribución normal la cual permite obtener un rango de valores amplio para evaluar los distintos escenarios de supervivencia en los cuales se establecieron límites de 87 a 98 % (Fig. 68, Fig. 69).

- **Precio de venta**

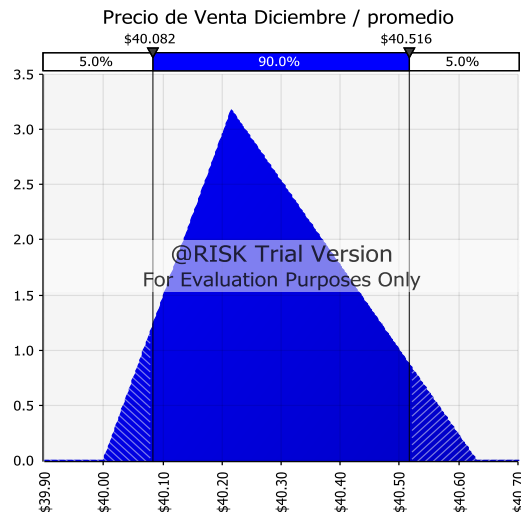


Fig. 70 “ Precio de venta en el mes de Diciembre (Autor) ”

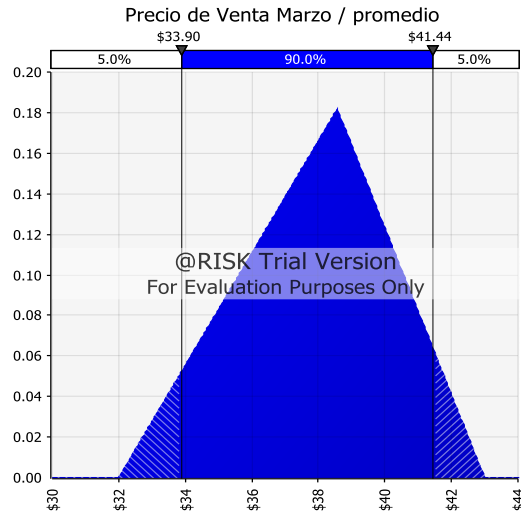


Fig. 71 " Precio de venta en el mes de Marzo (Autor) "

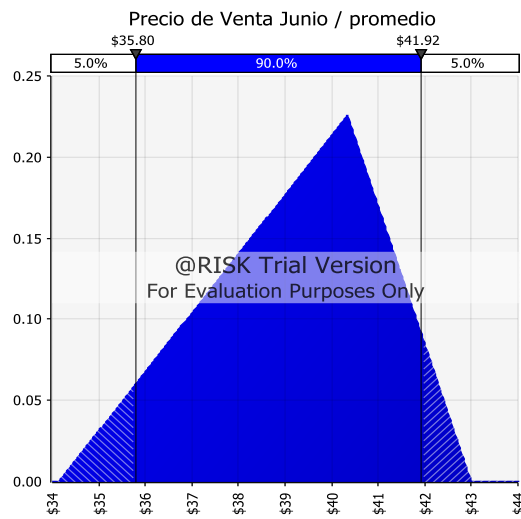


Fig. 72 " Precio de venta en el mes de Junio (Autor) "

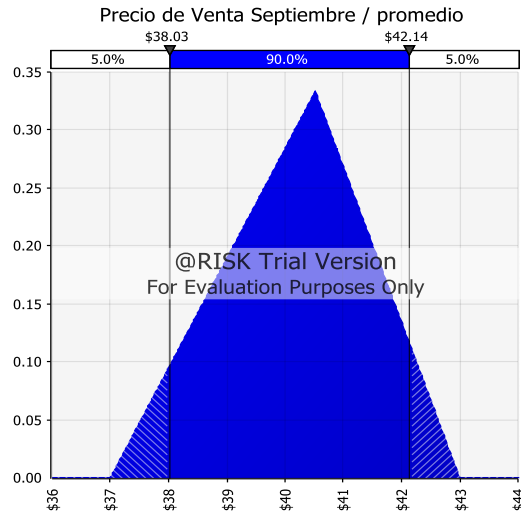


Fig. 73 “ Precio de venta en el mes de Septiembre (Autor) ”

Los precios de venta fueron establecidos acorde a los reportados por el mercado *La Nueva Viga* de la Ciudad de México asignando una distribución triangular en los cuales se estableció para el mes de diciembre un precio máximo de \$40.63 y un mínimo de \$40 (Fig. 70), para el mes de marzo un precio de \$43 y \$32 (Fig. 71), para el mes de junio de \$43 y \$34.14 (Fig. 72) y para el mes de septiembre de \$43 y \$37 respectivamente (Fig. 73).

- **Peso promedio de la tilapia cosechada**

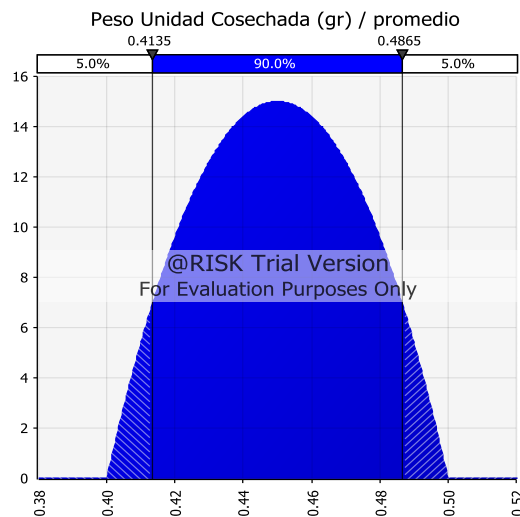


Fig. 74 “ Precio promedio de la tilapia cosechada (Autor) ”

La distribución asignada para el peso promedio de la tilapia cosechada es del tipo normal la cual permite simular un amplio rango de valores los cuales van desde un mínimo de 400 [g] hasta un máximo de 500 [g], de esta variable dependerán los ingresos obtenidos por cosecha.

5.5.2. Distribución de valores posibles de TIR

En la siguiente grafica (Fig. 75) se puede observar los posibles valores que puede tomar la tasa interna de retorno de acuerdo a las distribuciones de las variables definidas. Con una probabilidad del 90 % el rango del TIR se encuentra entre el 3.15 y 18.58 % con una media de 11.04 % la cual se encuentra por debajo del modelo inicial que indica un 20 %. Pese a que nuestro valor se encuentra por debajo la gráfica muestra que este se mantendrá positivo el 90 % de las veces lo que asegura obtener ganancias del proyecto, con un 65.1% de posibilidades de encontrarse por encima del WACC (Fig. 76) lo cual aumenta las posibilidades de ser una inversión atractiva para posibles inversionistas.

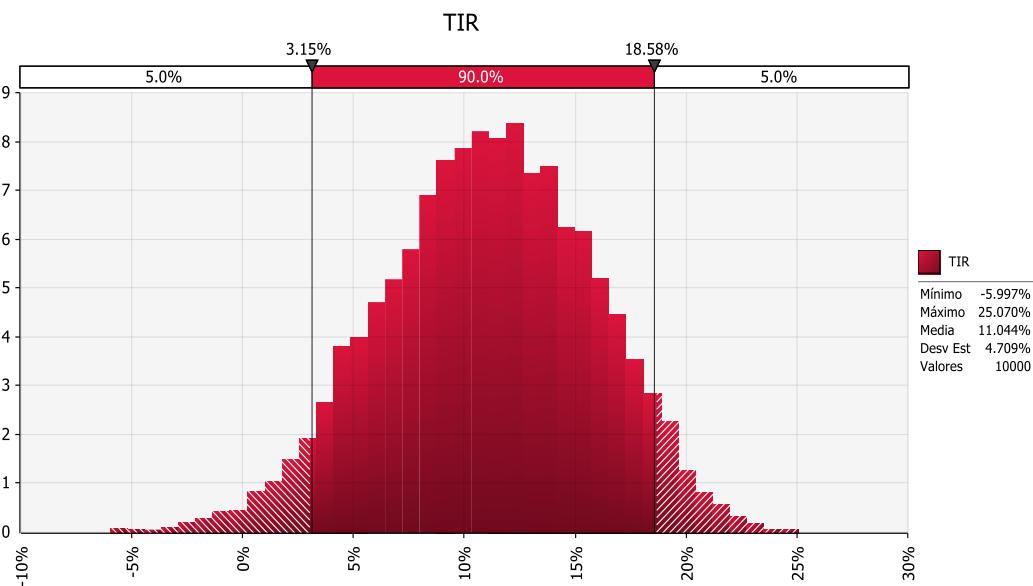


Fig. 75 “ Distribución de valores posibles del TIR (Autor) ”

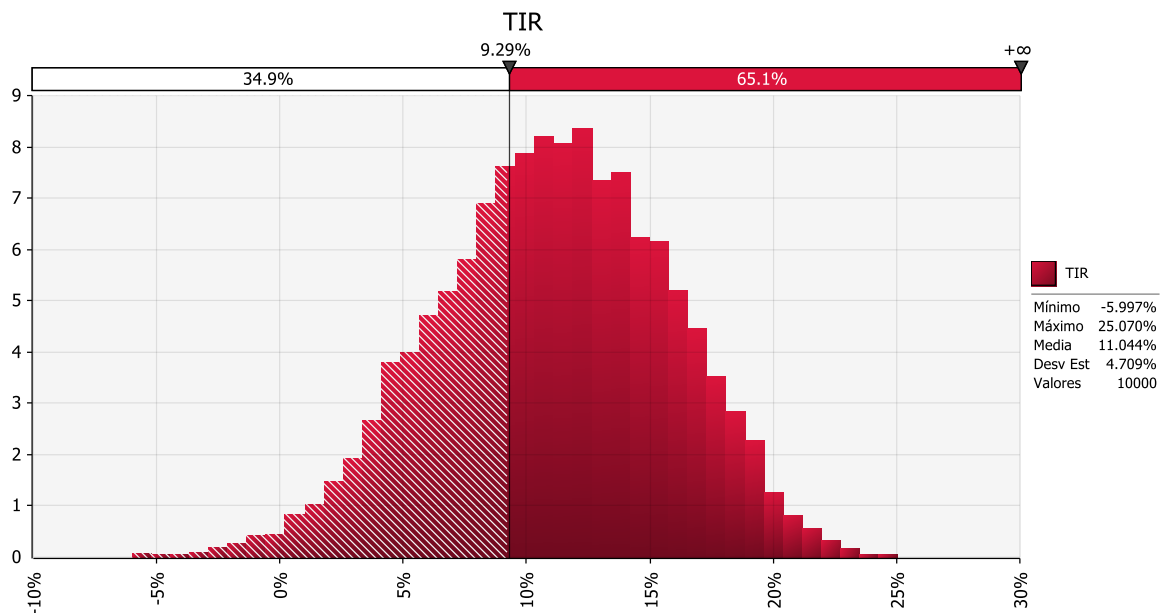


Fig. 76 “ Posible porcentaje por encima del WACC (Autor) ”

5.5.2.1. Sensibilidad de la TIR respecto a las variables de entrada

En la siguiente grafica se puede observar cuales de las variables de entrada son las que tienen mayor efecto en el valor final de la TIR (Fig. 77). Como se puede observar la variable de mayor relevancia es el peso de la tilapia cosechada la cual puede causar en el peor de los escenarios un TIR de 5.1% y en el mejor de los casos 16.4%, la siguiente variable que afecta el valor final del TIR es el costo del alimento de engorda ya que en esta etapa es donde mayor cantidad de alimento se consume. La variable de menor peso en el análisis es el costo de venta en el mes de diciembre porque en este mes la variación del precio máximo y mínimo es menor al rango de los demás meses. La simulación del modelo financiero muestra que el valor promedio se mantiene por encima del WACC con un valor del 11.044% lo cual hace atractivo al proyecto.

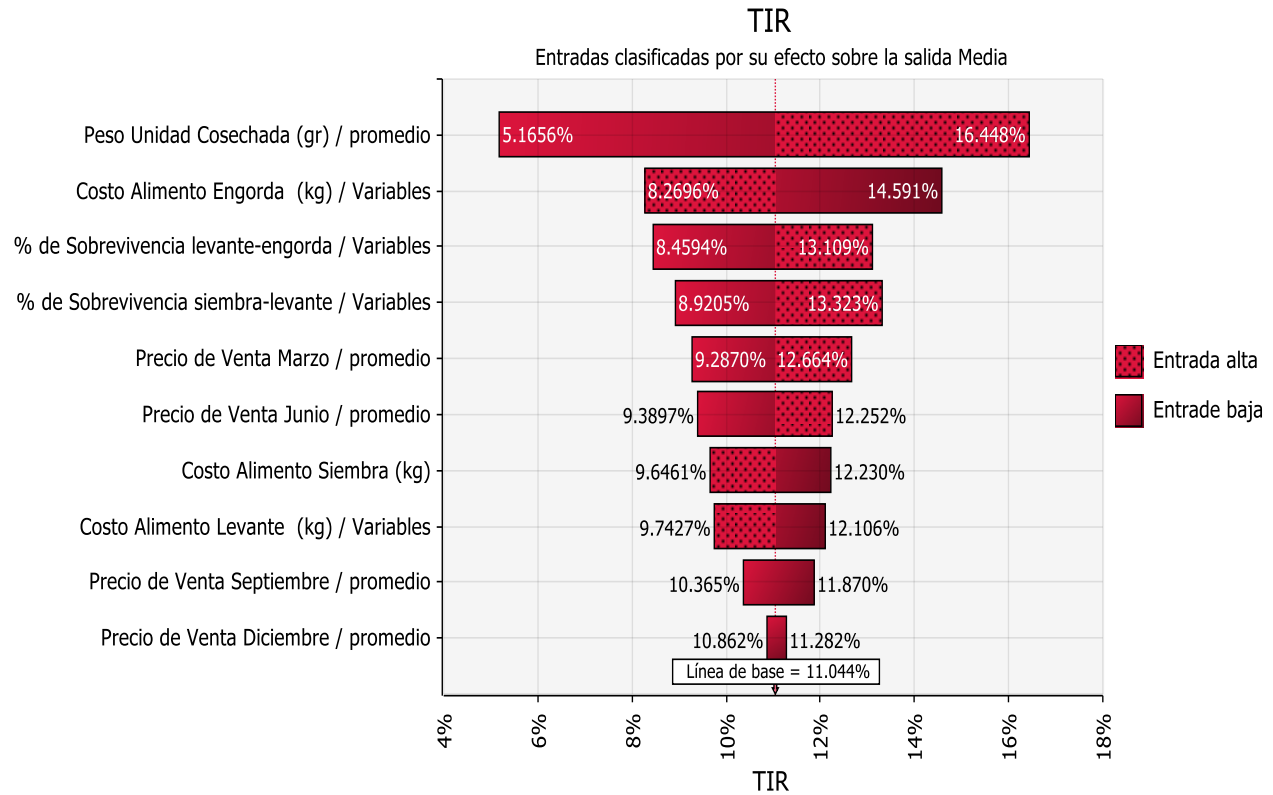


Fig. 77 “Sensibilidad del TIR ante las variables de entrada (Autor)”

5.5.3. Distribución de los valores posibles de VPN

En la siguiente grafica se puede observar los valores obtenidos del VPN siendo el valor más probable de \$96,655.4 menor al modelo estático de 568,444.93 con una probabilidad del 90 % de caer en el rango de -\$611,853.88 a \$874,678.6 con una probabilidad del 60.1 % de mantener valores positivos. También es importante señalar que tiene una cierta acumulación a valores cercanos a cero lo que indica una probabilidad relevante de que en ciertas combinaciones los parámetros de entrada logren este valor con mayor frecuencia ocasionando una situación de riesgo para el modelo.

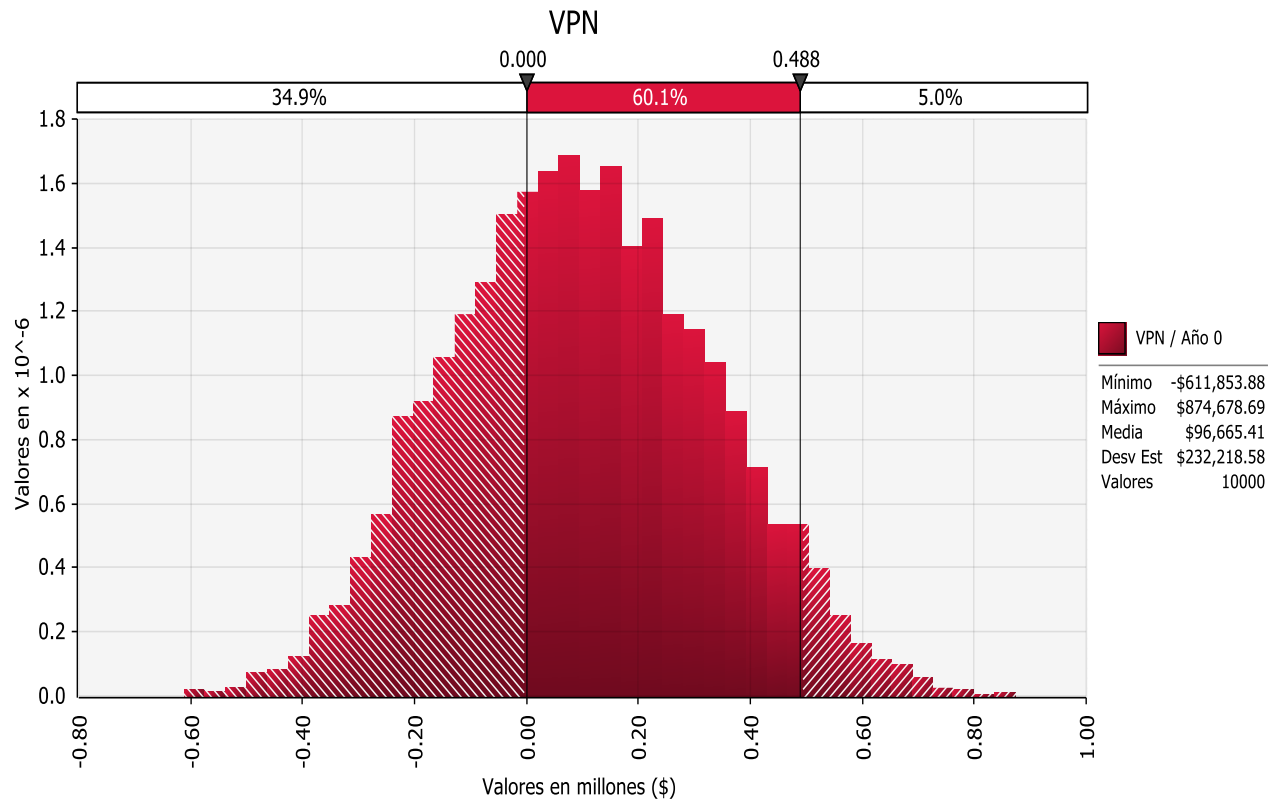


Fig. 78 “ Distribución de los posibles valores del VPN (Autor) ”

5.5.3.1. Sensibilidad del VPN respecto a las variables de entrada

En la siguiente grafica (Fig. 79) se puede observar que las variables de entrada que tienen mayor relevancia en el VPN son el peso de la tilapia cosechada, parecido al comportamiento del TIR, la cual va de -\$181,742.04 hasta los \$374,159.53 con una media de \$96,655.41. La siguiente variable de mayor importancia en el VPN es el costo de alimento de engorda el cual puede llevar al VPN al mínimo de -\$37,216.40 hasta el máximo de \$273,791.84. La variable de menor influencia en el modelo es el precio de venta del mes de diciembre.

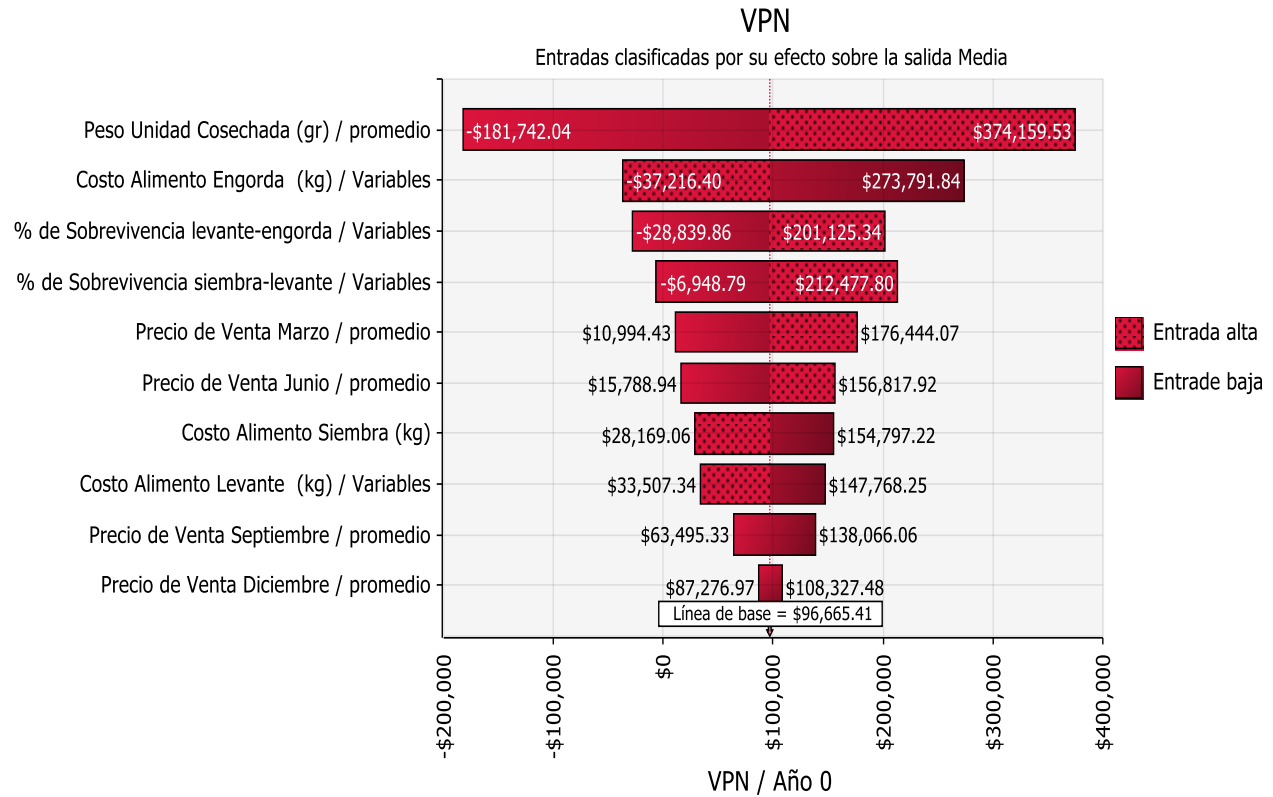


Fig. 79 “ Sensibilidad del VPN ante las variables de entrada (Autor) ”

En la gráfica de araña (Fig. 80) podemos observar que pesos promedios cosechados por encima de los 430 [g] y, precios del alimento de engorda por debajo de \$10.9 aseguran mantener un VPN positivo.

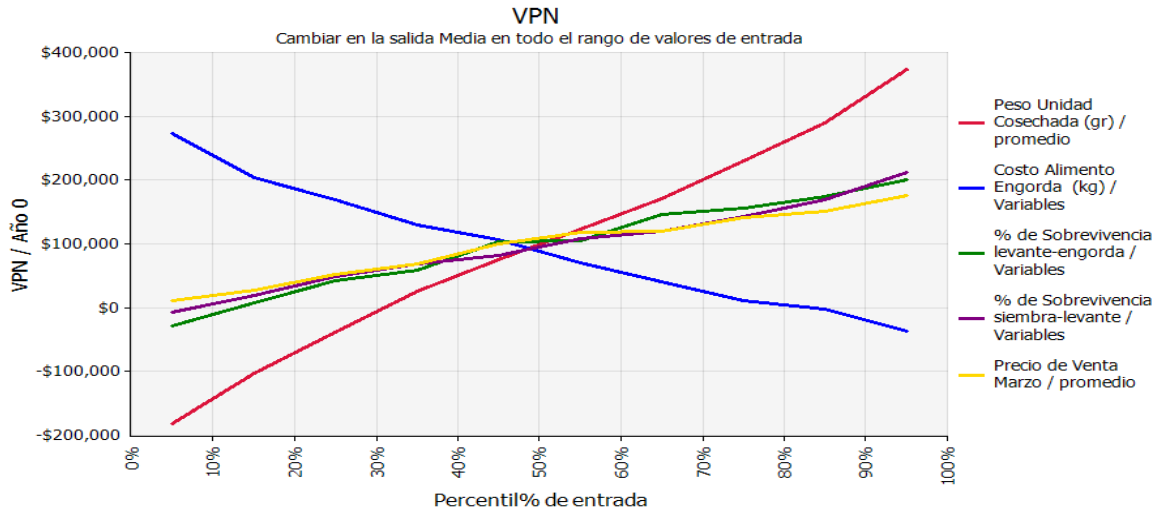


Fig. 80 “ Grafica de araña de la sensibilidad del VPN antes las variables de entrada (Autor)”

5.5.4. Distribución de los posibles valores de Pay Back

En la siguiente grafica (Fig. 81) se puede observar que el periodo de recuperación se encuentra cercano a los 4.4 años el cual se encuentra cercano al valor calculo en el análisis inicial de 4.2 años. Se puede observar que en el peor de los escenarios el periodo de recuperación se encuentra hasta los 10 años con un 90 % de posibilidad de estar entre los 4.41 y los 8.47 años.

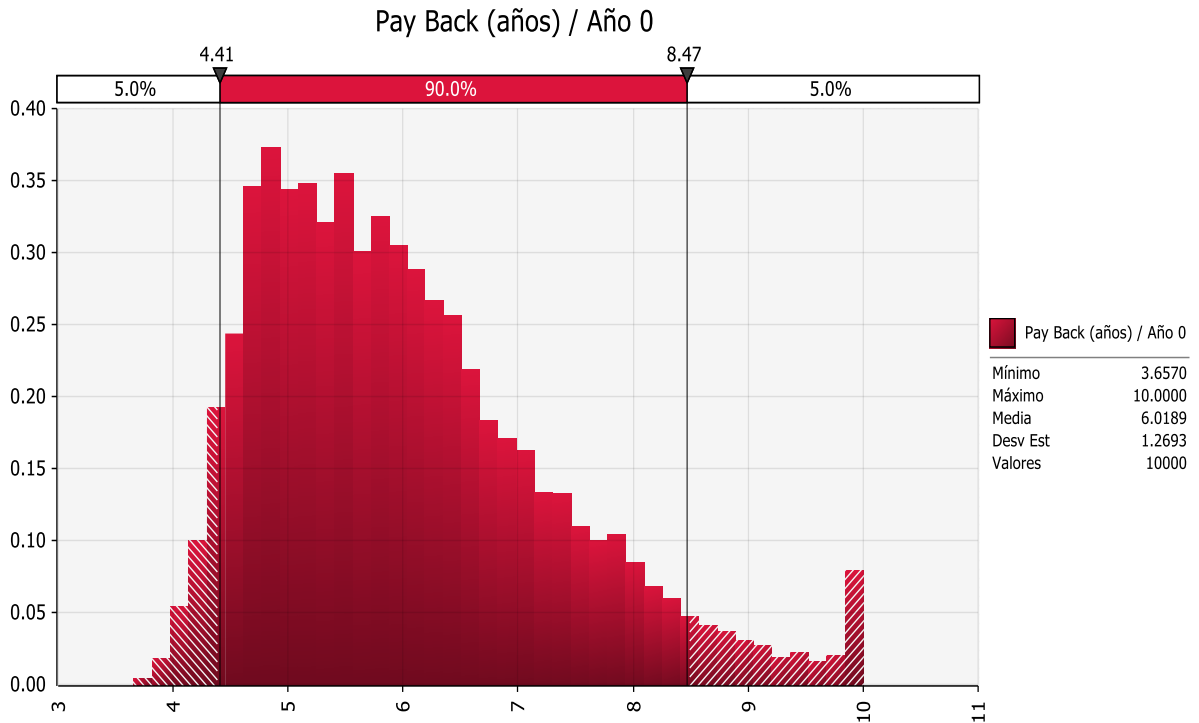


Fig. 81 “ Distribución de los posibles valores de Pay Back (Autor) ”

5.5.5. Distribución de los posibles valores del ROI

La siguiente grafica (Fig. 82) muestra el comportamiento del retorno sobre la inversión a partir de las utilidades netas obtenidas la cual tendrá un promedio de 11.24 % en el periodo del tiempo evaluado con un 90% de probabilidad de encontrarse entre 5.55 % y 18.55 % lo que permite confirmar que antes los perores escenario el TIR y EL VPN se mantendrán con valores positivos en todo el horizonte de evaluación, esto no implica que se obtengan flujos que permitan recuperar la inversión pero si permitirán sostener la producción de tilapia con las condiciones establecidas.

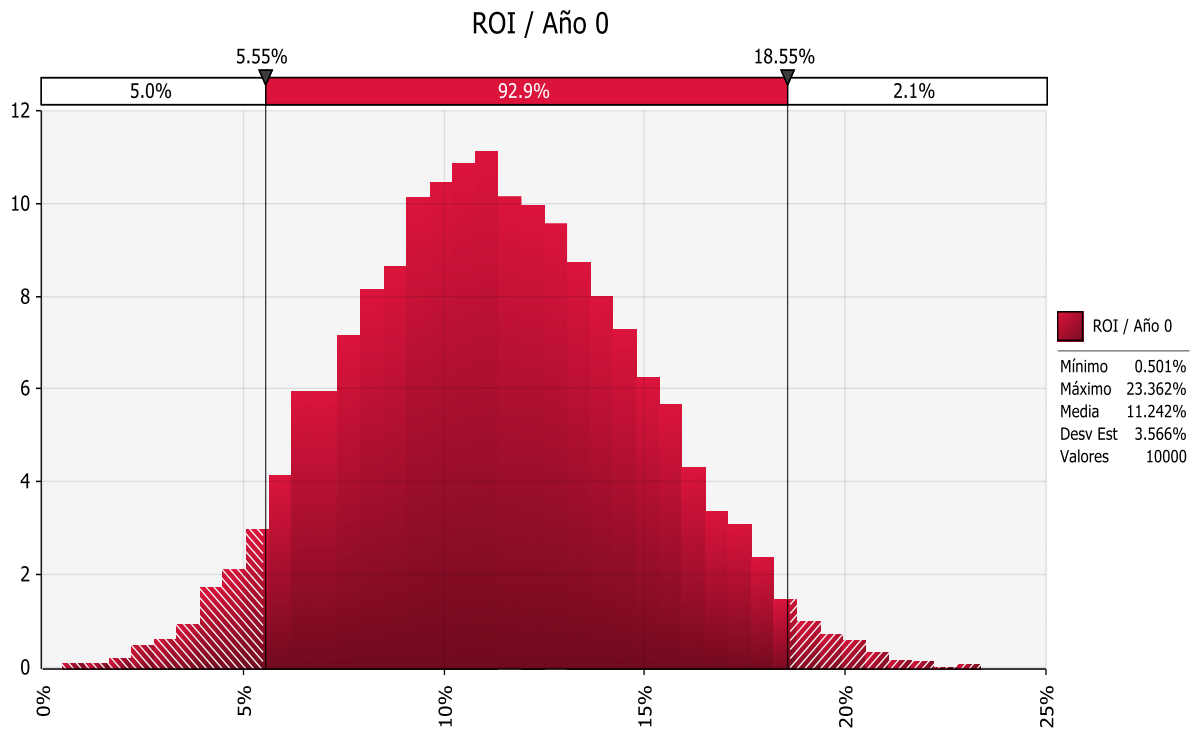


Fig. 82 “ Distribución de posibles valores del ROI (Autor) ”

5.6. Conclusión del capítulo

Como se puede observar la implementación de un sistema de captación para su uso en un proyecto de acuicultura es rentable. El recurso obtenido tiene una perfecta temperatura para mantener un criadero de tilapias con un flujo constante de agua caliente lo que ofrece la ventaja de obtener múltiples cosechas en un año sin importar las condiciones climáticas del lugar, a diferencia de un sistema de cría convencional, ya que este siempre brindara una temperatura constante.

En el análisis económico se puede observar que el proyecto es rentable en un horizonte de diez años y en el mejor de los casos tendrá un tiempo de retorno de 3.6 años. Este análisis indica que el proyecto ofrece una tasa interna de retorno aceptable con las condiciones del mercado actual. También asegura con un 90 % de probabilidad que ante los peores escenarios este siempre mantendrá flujos de caja positivos, aunque el tiempo de retorno de la inversión aumentara.

Este análisis abre el panorama para las diversas aplicaciones que se le puede dar al sistema de captación en el campo de los usos directos. En un futuro ampliando la profundidad de instalación se podría llegar al objetivo de generar energía eléctrica y poder analizar un proyecto de la factibilidad económica de una planta de ciclo Rankine orgánico.

Conclusiones

La demanda energética actual, derivada del crecimiento poblacional, ha llevado a que los países establezcan metas a futuro para minimizar el impacto ecológico que con lleva el consumo y producción de energía. Para completar estas metas se han establecido el objetivo de depender menos de los combustibles fósiles y apostar por el consumo de energías limpias. Esto provee de un escenario favorable para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan la obtención de energía utilizando como fuente las energías limpias.

El alto potencial geotérmico a nivel nacional y mundial que aún no ha sido explotado podría ayudar a minimizar el uso de combustibles fósiles. La energía geotérmica, al no solo producir energía eléctrica, permite que su aplicación en usos directos minimice el consumo de combustibles fósiles en diferentes sectores que van desde la calefacción de hogares hasta la crianza de peces y el cultivo de alimentos.

Esta búsqueda de nuevas tecnologías favorece la exploración del uso de ventilas hidrotermales como fuente de energía geotérmica. Al encontrarse distribuidas a nivel mundial en más de 67 000 [km], cerca de los dorsales oceánicos, su potencial energético es alto contando con emanaciones que van desde los 50 [°C] hasta los 400 [°C]. Este amplio rango de temperaturas permite el analizar diferentes aplicaciones que van desde el campo de los usos directos hasta la posible generación de energía eléctrica.

El sistema propuesto en este trabajo puede ser una opción viable para la captación del recurso geotérmico submarino al contar con la ventaja de soportar las condiciones ambientales del sitio, no depender directamente de la emanación, minimizar el impacto ambiental y evitar las incrustaciones

biológicas que pueden genera una capa aislante en el sistema que disminuya su eficiencia como en otros dispositivos presentados a nivel mundial.

En el análisis térmico se pudo observar el desempeño de este sistema propuesto y los parámetros que influyen en el proceso de transferencia de calor de la estructura. El primer parámetro que influye es el diámetro de la tubería que bajo el mismo flujo másico de 0.2 [kg/s] presenta una diferencia de 5 [°C] entre la tubería de 4 y 1 [in], el segundo parámetro es el espaciamiento entre la tubería de entrada y salida ya que mientras la tubería se posiciona más cerca a la armadura de varilla la temperatura de salida del fluido de trabajo aumenta hasta 4 [°C]. El tercer para metro es el radio del relleno el cual marca una diferencia en la temperatura del relleno de hasta 15 [°C] comparando un radio de 0.125 y 0.5 [m], mientras mayor es el radio menor es la temperatura del relleno registrada en la zona cercana a la tubería esto se debe al aumento en la resistencia térmica del relleno.

El limitante de las condiciones ambientales propuestas no permitió el análisis de la estructura a grandes profundidades ya que uno de los objetivos de este trabajo era demostrar la viabilidad del aprovechamiento del recurso apegando las condiciones teóricas a las condiciones reales en el sitio las cuales no permitirían una excavación profunda por el tipo de roca presente en la zona.

Al tener poca profundidad se observó que la temperatura de salida no era tan alta por lo que se propuso el uso de estructuras termo activas en serie lo que ayudo a obtener mayores temperaturas de salida. El uso de refrigerantes como fluido de trabajo logro demostrar el aumento de la eficiencia en el fenómeno de transferencia mostrando una temperatura de 68.6 [°C] con 7 estructuras conectadas en serie contra 36.7 [°C] utilizando agua como fluido de trabajo.

El análisis económico logro demostrar la rentabilidad del proyecto con aplicaciones de usos directos, ofreciendo un periodo de recuperación, en las mejores condiciones del mercado, de 3.6 años y en el peor de los escenarios en 10 años para el caso de acuicultura. También se pudo observar que el TIR se mantendrá positivo en un 90 % de las ocasiones lo que garantiza obtener ganancias, aunque este valor se encuentre por debajo del WACC establecido por el inversionista. Este análisis permite abrir la puerta para las posibles aplicaciones que se le puede dar al sistema de captación ampliando la utilización de usos directos en el país e incluso podría llegarse hasta la generación de energía eléctrica si se aumentara la profundidad del pozo.

Para trabajo futuro se propone el estudiar los efectos del uso de nano-fluidos en la estructura y analizar el efecto de la profundidad del pozo con la temperatura de salida del fluido de trabajo. También se propone la realización de simulaciones numéricas para verificar el comportamiento de la estructura con modelos más acercados a la realidad.

Referencias

Acciona, 2016. *Energía eólica*. [En línea]
Disponible en: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/>
[Último acceso: 18 Junio 2019].

ADM, 2020. *Acuicultura*. [En línea]
Disponible en: <http://acuicultura.com.mx/Home/GrowfishTilapia>
[Último acceso: 25 Marzo 2020].

Arango, C., Prol, R. M. & Torres Vera, M. A., 2015. Geothermal Prospects in the Baja California Peninsula. *Geothermics*, Volumen 55, pp. 39-57.

ASHRAE, 2011. 2011 ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications. En: M. S. Owen, ed. *Chapter 34. Geothermal Energy*. Atlanta: ASHRAE, pp. 34.1-34.34.

Banco Mundial, 2017. *Energía geotérmica*. [En línea]
Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/geothermal>
[Último acceso: 11 Junio 2019].

Banco Mundial, 2018. *Energía: Panorama general*. [En línea]
Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
[Último acceso: 18 Junio 2019].

Banerjee, A., Chakraborty, T. & Matsagar, V., 2018. Evaluation of possibilities in geothermal energy extraction from oceanic crust using offshore wind turbine monopiles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol.92*, pp. 685-700.

Biosait Europe, 2020. *Microorganismos mesófilos en alimentos*. [En línea]
Disponible en: <https://biosait.com/microorganismos-mesofilos-alimentos/>
[Último acceso: 15 mayo 2020].

Birol, F., 2018. *Renewables 2018 market analysis and forecast from 2018 to 2023.* [En línea] Disponible en: <https://www.iea.org/renewables2018/> [Último acceso: 18 Junio 2019].

Boyd, T. & Rafferty, K., 1998. *Aquaculture information Package*. Oregon: Geo.Heat Center Oregon Institute of Technology.

Brandl, H., 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), pp. 81-122.

Brazelton, W., 2017. Quick Guide Hydrothermal Vents. *Current Biology*, pp. 450-452.

Brunetti, A., 2014. *Ciencia y biologia.com*. [En línea] Disponible en: <https://cienciaybiologia.com/poliquetos-marinos/> [Último acceso: 15 mayo 2020].

Cafaggi, A. A., Rodal, E. A. & Sánchez, A., 2016. *Sistemas de bombeo*. Segunda ed. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Calzada, R. & Olivares, J. C., 2015. *Conceptos de geotermia para ingenieros petroleros*, Ciudad de México: UNAM.

Canet, C. & Prol Ledesma, R. M., 2006. Procesos de mineralización en manantiales hidrotermales submarinos someros. Ejemplos en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, pp. 83-102.

Canet, C., Prol, R. M. & Melgarejo, J., 2000. The hydrothermal system of Punta Mita (México): an example of present submarine exhalative deposit. *Cadernos de laboratorio xeológico de Laxe*, Volumen 25, pp. 325-327.

Cárcel, F. J. & Martínez, D., 2015. Captación de la energía geotérmica para su uso en la edificación. *3C tecnología*, 4(2), pp. 84-95.

Carmona, J., 2013. *Mi blog sobre Eficiencia Energética y Edificación*. [En línea]
Disponibile en: <https://juliocarmonablog.wordpress.com/2013/06/21/transferecia-de-calor-en-edificacion/>
[Último acceso: 26 Abril 2019].

CEMEX, 2020. *Cemento Gris: cemento portland gris*. [En línea]
Disponibile en: <https://www.cemexmexico.com/productos/cemento/portland-gris>
[Último acceso: 12 Febrero 2020].

CeMIEGeo, 2014. *Geotermia en México*. [En línea]
Disponibile en: <http://www.cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>
[Último acceso: 18 Septiembre 2019].

CEMIEGEO, 2015. *Geotermia en México*. [En línea]
Disponibile en: <http://www.cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>
[Último acceso: 17 Marzo 2020].

CEMIEGEO, 2017. *¿Qué es la geotermia?*. [En línea]
Disponibile en: <http://www.cemiegeo.org/index.php/que-es-la-geotermia>
[Último acceso: 16 Marzo 2020].

Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J., 2011. *Transferencia de calor y masa*. tercera ed. Ciudad de México: Mc Graw Hill.

CESAY A.C., 2017. *Esquema de alimentación en tilapia*. [En línea]
Disponibile en: <http://cesay.org.mx/download/material-consulta/Alimentaci%C3%B3n%20tilapia.pdf>
[Último acceso: 18 marzo 2020].

CFE, 2020. *Consulta tu tarifa*. [En línea]
Disponibile en: https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=HM
[Último acceso: 25 Marzo 2020].

Changxing, Z. y otros, 2019. Effect of depth and fluid rate on estimate for borehole thermal resistance of single U-pipe borehole heat exchanger. *Renewable Energy*, Volumen 147, pp. 2399-2408.

CMIC, 2006. *Catálogo de precios unitarios de perforación de pozos para agua 2006*, Ciudad de México: cmic.

Creare inc., 2017. *Harnessing energy from deep sea hydrothermal vents*. [En línea] Disponible en: <https://www.creare.com/power-system-hydrothermal-vents/> [Último acceso: 15 Marzo 2019].

Cruz, D., Navarro, A. & Vargas, E., 2018. *Hormigón de alta conductividad térmica POWERCRETE*. Valencia, V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales.

CYPE ingenieros S.A., 2020. *Generador de precios México*. [En línea] Disponible en: http://www.mexico.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cimentaciones/Pilotes/Prefabricados/CP_P010_Pilote_prefabricado_de_concreto_ref.html [Último acceso: 8 Marzo 2020].

Damodaran, A., 2020. *Country Default Spreads and Risk Premiums*. [En línea] Disponible en: http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html [Último acceso: 30 Marzo 2020].

Derco, 2016. *Procesos constructivo de las pilas de cimentación*. [En línea] Disponible en: <https://www.derco.com.mx/es/blog-derco/item/proceso-constructivo-pilas-de-cimentacion> [Último acceso: 5 Mayo 2019].

Díaz, J. P., 2015. *Sietmas de energías renovables*. Madrid: Paraninfo.

Diez, S., 2016. Metodología para el cálculo del costo promedio ponderado de capital en el modelo del WACC. *Revista empresarial*, 10(39), pp. 33-45.

El Heraldo de México, 2019. *México se rezaga en geotermia*. [En línea]
Disponibile en: <https://heraldodemexico.com.mx/mer-k-2/mexico-se-rezaga-en-geotermia/>
[Último acceso: 17 Marzo 2020].

Electrical4U, 2018. *Seebeck effect*. [En línea]
Disponibile en: <https://www.electrical4u.com/seebeck-effect-and-seebeck-coefficient/>
[Último acceso: 22 marzo 2019].

Eurobuilding, 2019. *Geotermia Submarina*. [En línea]
Disponibile en: <http://www.eurobuilding.it/marsiliproject/>
[Último acceso: 12 marzo 2019].

Eurobuilding, 2019. *El comite científico*. [En línea]
Disponibile en: http://www.eurobuilding.it/marsiliproject/index.php?option=com_content&view=article&id=93&Itemid=59
[Último acceso: 12 marzo 2019].

Eurobuilding, 2019. *El equipo*. [En línea]
Disponibile en: http://www.eurobuilding.it/marsiliproject/index.php?option=com_content&view=article&id=92&Itemid=58
[Último acceso: 12 marzo 2019].

Eurobuilding, 2019. *Producción*. [En línea]
Disponibile en: http://www.eurobuilding.it/marsiliproject/index.php?option=com_content&view=article&id=95&Itemid=126
[Último acceso: 20 Marzo 2019].

Eurobuilding, 2019. *Programa economico*. [En línea]
Disponibile en: http://www.eurobuilding.it/marsiliproject/index.php?option=com_content&view=article&id=62&Itemid=126

temid=69

[Último acceso: 20 Marzo 2019].

Faizal, M., Bouazza, A. & Singh, R. M., 2016. Heat transfer enhancement of geothermal energy piles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 57, pp. 16-33.

FAO, 2008. *Bosques y energía*. Roma: FAO.

FCIHS, 2013. *Ecuacion de flujo de agua subterranea*. [En línea] Disponible en: <http://fcihs.espintime.com/tema2/docs/classe2-2-A.pdf> [Último acceso: 7 Julio 2019].

FDM, 2014. *Maquina perforadora rotatoria FD850A*. [En línea] Disponible en: <http://fdm-machinery.com/1-3-rotary-drilling-rig/165671/> [Último acceso: 21 Abril 2019].

Fernandez, T. & Prol, R. M., 2011. Imagenes Landsat TM y modelo digital de elevación para la identificación de lineamientos y mapeo litológico en Punta Mita (México).. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1).

Frutos, J., Lara, L., P. U. C. d. V. & S. N. d. G. y. M. d. C., 2010. Capitulo 3. La cuenca del oceano pacifico. En: J. Diaz Naveas, J. Frutos & P. U. C. d. V., edits. *Geologia marina de chile*. Chile: Comité Oceanográfico Nacional de Chile - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, pp. 20-23.

Galdámez, D. F., 2018. *Estudio del comportamiento de estructuras termoactivas, con énfasis en pilas de energía (Tesis de maestría)*, Ciudad de México: s.n.

García, C. A. & Masera, O., 2016. *Estado del arte de la bioenergía en México*, Guadalajara: Imagia comunicación.

Girguis, P. & Holden, J., 2012. On the potential for Bioenergy and Biofuels from hydrothermal Vent Microbes.. *Oceanography*, pp. 213-217.

González, J., 2009. *Energías renovables*. Barcelona: Reverté.

groen energy, 2012. *Cimentaciones Termoactivas*. [En línea] Disponible en: <http://www.groen.es/geotermia-cimentaciones-termoactivas.html> [Último acceso: 21 Abril 2019].

Guzmán, A., Perez, E. & Aviña, H. M., 2019. *Diseño de sistema de calefacción para acuicultura de circulación de Cherax quadricarinatus*. Morelia, Memorias del XXVI Congreso Anual.

H., Z., N., D. & Z., F., 2002. A Finite Line-Source Model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Asian Research*, 7(31), pp. 558-567.

Hellstrom, G., 1991. Chapter 5. Basic Assumptions and Thermal Properties. En: *Ground heat storage: thermal analyses of duct storage systems*. Suecia: University of Lund Sweden, pp. 25-27.

Herrera, O. J. & Becerra, L. A., 2014. *Diseño general de las etapas de simulación de procesos con énfasis en el análisis de entrada*. Guayaquil, Ecuador, s.n.

Hiriart, G., 2011. *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*, s.l.: s.n.

Hiriart, G., 2011. *Tecnologías de punta y costos asociados para generación distribuida, autoabastecimiento y cogeneración con recursos geotérmicos en México*, s.l.: Energy sector management assistance program.

Hiriart, G., Prol, R. M., Alcocer, S. & Espíndola, S., 2010. *Submarine Geothermics; Hydrothermal Vents and Electricity Generation*.

Holzer, O., 2018. *Situación de la energía hidráulica a nivel mundial 2018*. [En línea] Disponible en: <http://www.economiadelaenergia.com.ar/situacion-de-la-energia-hidraulica-a-nivel-mundial-2018/> [Último acceso: 18 Junio 2019].

Huminic, G. & Huminic, A., 2012. Application of nanofluids in heat exchangers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 16, pp. 5625-5637.

Ibáñez, J. J., 2011. *Ecosistemas: Redes Tróficas, Redesenergéticas, Cadenas alimentarias y pirámides de población..* [En línea] Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/03/29/137760> [Último acceso: 22 Enero 2019].

Inapesca, 2012. *Acuacultura: Tilapia.* [En línea] Disponible en: <https://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuacultura-tilapia> [Último acceso: 8 Marzo 2020].

Incropera, F. P. & Dewitt, D. P., 1999. Fundamentos de transferencia de calor. En: P. E. Roig Vázquez, ed. *Capítulo 1. Introducción.* s.l.:Pearson, pp. 1-42.

IRENA, 2018. *Bioenergy.* [En línea] Disponible en: <https://www.irena.org/bioenergy> [Último acceso: 8 Junio 2019].

IRENA, 2018. *Geothermal energy.* [En línea] Disponible en: <https://www.irena.org/geothermal> [Último acceso: 11 Junio 2019].

IRENA, 2018. *Solar energy.* [En línea] Disponible en: <https://www.irena.org/solar> [Último acceso: 9 Junio 2019].

IRENA, 2018. *Wind energy.* [En línea] Disponible en: <https://www.irena.org/wind> [Último acceso: 8 junio 2019].

IVAMI, 2018. *Microorganismos psicrófilos y psicrotrofos en alimentos y aguas - cultivo cualitativo y cuantitativo; identificación molecular.* [En línea] Disponible en: <https://www.ivami.com/es/microbiologia-de-alimentos/620-microorganismos->

psicrofilos-cultivo

[Último acceso: 15 mayo 2020].

Javed, S. & Spitler, J., 2016. Accuracy of borehole thermal resistance calculation methods for grouted single U-tube ground heat exchangers. *Applied Energy*, Issue 187, pp. 790-806.

Jensen, W., 2018. *Oportunidades de inversión crecientes nueva era dela energía México de fundamentos institucionales al enfoque eléctrico*, s.l.: Ey México.

Kumar, S., Choi, S. U. & Patel, H. E., 2006. Heat Transfer in Nanofluids- A Review. *Heat Transfer Engineering*, 27(10), pp. 3-19.

LLamada-, 2012. *P-105TT CFA PILING RIG*. [En línea] Disponible en: <http://www.cm-llamada.es/productos/maquinas/p-105.aspx> [Último acceso: 21| Abril 2019].

López, N. P., Barba, D. F. & Sánchez, M., 2017. Pilas de energía. Uso directo de la energía geotérmica a través de las cimentaciones profundas. pp. 149-161.

Lund, J., 2017. *1° Curso de usos directos impartido por Jhon Lund*. CDMX: s.n.

Maishch, M., 2018. *El crecimiento de la demanda de energia se duplica en 2017, viento y sol tuvieron un año exepcional*. [En línea] Disponible en: <https://www.pv-magazine-latam.com/2018/03/23/aie-el-crecimiento-de-la-demanda-de-energia-se-duplica-en-2017-viento-y-sol-tuvieron-un-ano-excepcional/> [Último acceso: 3 junio 2019].

Manzini, F. L. & Macías, P., 2004. *Nuevas energías renovables: una alternativa energética sustentable para México*, Ciudad de México: intituto de investigaciones legislativas del senado de la republica.

MAPC, 2013. *Deep Sea Energy*. [En línea] Disponible en: <http://www.mapcorp.com/our-work/deep-sea-energy/> [Último acceso: 20 Febrero 2019].

Margaret, T., 2014. Black and White Smokers. *Encyclopedia of Marine Geosciences*.

Marshall, B., 2011. *20 GW+ Renewable Energy Power Plants on the Horizon*. [En línea]
Disponibile en: <http://www.marshallhydrothermal.com/>
[Último acceso: 15 Febrero 2019].

MexiFish, 2020. *Presupuesto en línea*. [En línea]
Disponibile en: <https://mexifish.grupomexi.com.mx/presupuesto.php>
[Último acceso: 17 Marzo 2020].

Miguel, J., 2017. *Los organismos quimiosintéticos en la biología*. [En línea]
Disponibile en: <https://espaciociencia.com/los-organismos-quimiosinteticos/>
[Último acceso: 20 Enero 2019].

Ministerio de energía, 2017. *Opera en Chile la primera planta geotérmica de Sudamérica*.
[En línea]
Disponibile en: <https://www.energia.gob.cl/noticias/antofagasta/opera-en-chile-la-primera-planta-geotermica-de-sudamerica>
[Último acceso: 13 Marzo 2020].

Moya , D., Clay, A. & Prasad, K., 2018. Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, Volumen 94, pp. 889-901.

Padilla, F., 2012. *Geología*. La Coruña: Universidad de la Coruña.

Pantoja, J. & Gomez, J., 2004. Los sistemas hidrotermales y el origen de la vida.. *Ciencias*, pp. 14-22.

Petroflex, 2017. *Lista de precios 2017 PETROFLEX*. [En línea]
Disponibile en: <http://www.petroflex.cl/wp-content/uploads/2017/10/LP-2017-Petroflex.pdf>
[Último acceso: 2020 marzo 2020].

Prol, R. M. & Arango, C., 2017. *Sistemas geotérmicos de la Península de Baja California*.
CDMX: Instituto de geofísica.

Prol, R. M. & Canet, C., 2014. Evaluación y explotación de los recursos geotermicos del oceano. En: A. Low Pfeng & E. M. Peters Recagno, edits. *La frontera final: el océano profundo*. CDMX: INEEC-SEMARNAT, pp. 11-31.

Prol, R. M. y otros, 2004. Vent fluid chemistry in Bahía Concepción coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, Mexico. *Journal of volcanology and goothermal research*, pp. 311-328.

Prol, R. M. y otros, 2004. Vent fluid chemistry in Bahía Concepción coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, México. *Journal of Volcanology and geothermal research*, Issue 137, pp. 311-328.

Pura, A. y otros, 2003. Sulfur isotope geochemistry of the submarine hydrothermal coastal vents of Punta mita, Mexico. *Journal of geochemical exploration*, pp. 301-304.

Pura, A. y otros, 2005. Isotopic evidence for biogenic precipitation as a principal mineralization process in coastal gasohydrothermal vents, Punta Mita, Mexico. *Chemical geology*, Issue 224, pp. 119-121.

REN21, 2019. *Renewables 2019 Global Status Report*, Paris: REN21.

Rubio, C., Ambríz, V., Pastor, E. & Belman, J., 2015. Cascade utilization of low and medium geothermal enthalpy resources - A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, Volumen 52, pp. 689-716.

Salinas, M., 2016. *Desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía*. [En línea]

Disponible en: <http://cemiegeo.org/index.php/proyectos/desarrollos-tecnologicos-para-explotacion/p14/p14-objetivos/9-linea-de-investigacion/proyecto/28-p11>

[Último acceso: 17 Marzo 2020].

Sanchez, F. J., 2011. *Ley de Darcy. Conductividad hidráulica*. [En línea]

Disponible en: <http://web.usal.es/javisan/hidro>

[Último acceso: 12 julio 2019].

Sánchez, N. L., 2014. *Civilgeeks.com ingeniería y construcción*. [En línea] Disponible en: <https://civilgeeks.com/2014/01/13/pilotes-de-cimentacion-para-la-construccion/> [Último acceso: 20 abril 2019].

Santoyo , É. & Barragan, R. M., 2010. Energía geotérmica. *Revista Ciencia*, Issue 61, pp. 40-51.

Segob, 2012. *Parámetros de estimación de vida útil*. [En línea] Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5264340&fecha=15/08/2012 [Último acceso: 30 Marzo 2020].

SENER, 2018. *Mapa de ruta tecnológica Usos Directos del calor geotérmico*, CDMX: SENER.

SENER, 2018. *Prospectiva de energías renovables 2018-2032*, CDMX: SENER.

SENER, 2018. *Prospectiva de energías renovables 2018-2032*. En: *Diagnóstico histórico de las energías renovables 2007-2017*. CDMX: SENER, pp. 29-45.

SENER, 2018. *Prospectiva del sector eléctrico 2018-2032*, CDMX: Sener.

Smillie, D., 2018. *La energía solar, renovable y rentable*. [En línea] Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2018/04/1430451> [Último acceso: 8 junio 2019].

SNIIM, 2020. *Comportamiento para: Tilapia Grande*. [En línea] Disponible en: http://www.economia-sniim.gob.mx/SNIIM-pesca/estadisticas/e_pez1.asp?cent=624&prod=896&ACCION=Aceptar [Último acceso: 31 Marzo 2020].

Soto, L. & Estradas, A., 2014. La exploración en el mar profundo de ambientes extremos: sistemas hidrotermales. En: A. Low Pfeng & . E. M. Peters Recagno, edits. *La frontera final: el océano profundo*. CDMX: INEEC-SEMARNAT, pp. 86-106.

Spadacini, C., Centemeri, L. & Michele, D., 2015. *Geothermal Energy Exploitation with the Organic Radial Outflow Turbine*. Melbourne, s.n., pp. 1-6.

SSN, 2020. *Resumen mensual de temperaturas y lluvias*. [En línea] Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> [Último acceso: 6 Marzo 2020].

Suárez, C. y otros, 2004. La vida a altas temperaturas: adaptación de los microorganismos y aplicación industrial de sus enzimas. *Ciencia*, pp. 56-65.

Suárez, N. E., Suárez, M. C., Samaniego, F. & Delgado, V., 2005. Fundamental Characteristics of Hydrothermal Submarine Systems and Preliminary Evaluation of its Geothermal Potential in Mexico..

Toledo, M. y otros, 2002. *Implementación de un aprovechamiento geotérmico de baja entalpía en el sistema de entibación del nuevo edificio de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile*, Santiago de Chile: s.n.

Toselli, A. J., 2010. Capítulo 12. Dorsales oceánicas. En: D. F. G. Aceñolaza, ed. *Elementos Básicos de Petrología Ígnea*. San Miguel de Tucumán: INSUGEO, pp. 229-244.

Toselli, A. J., 2010. Capítulo 17. Cuencas Retro-arco. En: D. F. G. Aceñolaza, ed. *Elementos Básicos de Petrología ígnea*. San Miguel de Tucumán: INSUGEO, pp. 293-297.

Versaprofiles, 2013. *Geoperform*. [En línea] Disponible en: <http://www.versaprofiles.com/en/products/file/geoperformx-v2/16> [Último acceso: 2 Mayo 2019].

VERSAPROFILES, 2020. *GEOPERFORMX-V2 Technical Sheet*, Quebec: VERSAPROFILES.

WHOI, 2012. *Hydrothermal vents*. [En línea]
Disponible en: <https://www.whoi.edu/main/topic/hydrothermal-vents>
[Último acceso: 30 Enero 2019].

Wieland, 2014. *Standard Heat Exchangers*. [En línea]
Disponible en: http://www.wieland-thermalsolutions.com/internet/en/products/heatexchanger/standard_baureihe/Standard_Baureihe.jsp
[Último acceso: 26 Abril 2019].

Y, A., I, R. & M, F., 2016. *Electricity generation from hydrothermal vents*. s.l., s.n., pp. 1-6.

Yamamoto, M. y otros, 2013. Generation of Electricity and Illumination by an Environmental Fuel Cell in Deep-Sea Hydrothermal Vents. *Angewandte Communications*, pp. 10758-10761.

Yunsheng, X. & Chung, D., 2000. Cement of high specific heat and high thermal conductivity, obtained by using silane and silica fume as admixtures. *Cement and concrete research*, Volumen 30, pp. 1175-1178.

Yunsheng, X. & Chung, D., 2000. Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement. *Cement and concrete research*, Volumen 30, pp. 59-61.

Yu, X., Shi-jun, W. & Can-jun, Y., 2015. Generation of electricity from deep-sea hydrothermal vents with a thermoelectric converter. *Applied Energy*, pp. 620-627.

Yu, X., Shi-Jun, Y. & Can-Jun, Y., 2015. A thermoelectric cap for seafloor hydrothermal vents. *Energy: Conversion and management*, pp. 166-174.