



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PLANTAS DE ENERGÍA TÉRMICA DEL OCÉANO Y  
MONITOREO DE LOS PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS DE SU ENTORNO EN TIEMPO  
REAL

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

Maestro en Ciencias  
(Oceanografía Física)

p r e s e n t a :

ING. VICTOR ENRIQUE LUNA GÓMEZ

Director de tesis: Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

Comité Tutorial: Dra. Cecilia Elizabeth Enriquez Ortiz  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología  
Dr. Rodolfo Silva Casarín  
Instituto de Ingeniería  
Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin  
Instituto de Ingeniería  
Dr. Antonio Zoilo Márquez García  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología  
Asesor externo: Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez  
Instituto de Ingeniería

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., MARZO 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADECIMIENTOS

A la **U**niversidad **N**acional **A**utónoma de **M**éxico.

A todos los miembros del **P**osgrado en **C**iencias del **M**ar y **L**imnología que hacen posible la realización de los sueños de sus alumnos, y de manera muy especial a **D**iana **J**uárez.

A los integrantes de mi **C**omité **T**utor por todas sus contribuciones que fortalecieron este trabajo. Al **D**octor **A**latorre por su voto de confianza y por mi lugar de trabajo "en el que se ponen a prueba las ideas".

## **DEDICATORIAS**

*A mi amada novia Iza, por su inagotable  
felicidad y por tomarme de la mano para disfrutar  
juntos de este viaje en el que el mundo actúa para  
nosotros.*

*A mi Regina, por todas las alegrías que ha dado  
a mi vida desde que la conocí, estoy seguro que  
lograrás todo lo que te propongas.*

*A las dos por todo lo que compartimos, por todo  
lo que hemos conocido y aprendido juntos, por las  
noches de conciertos "bailando al son de este ritmo"*

*"Una canción que se haga estallar el corazón...  
y la cabeza"*

# CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| CONTENIDO .....   | IV        |
| LISTA DE FIGURAS .....  | VI        |
| LISTA DE TABLAS .....   | VIII      |
| SIGLAS Y ABREVIATURAS .....   | IX        |
| UNIDADES.....   | XI        |
| DEFINICIONES .....  | XII       |
| RESUMEN .....   | XIV       |
| ABSTRACT .....  | XV        |
| INTRODUCCIÓN .....  | XVI       |
| OBJETIVOS .....   | XIX       |
| <b>CAPÍTULO 1.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1. ANTECEDENTES.....  | 2         |
| <b>CAPÍTULO 2.....</b>  | <b>8</b>  |
| 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....   | 9         |
| 2.1 <i>Parámetros oceanográficos</i> .....  | 9         |
| 2.2 <i>Temperatura del océano</i> .....   | 10        |
| 2.2.1 Zonas térmicas del océano mundial.....  | 11        |
| 2.2.2 Zonas térmicas en mares de México.....  | 13        |
| 2.3 <i>Planta OTEC</i> .....  | 15        |
| 2.3.1 Principio de funcionamiento.....  | 15        |
| 2.3.2 Ciclos y tipo de planta .....   | 20        |
| 2.4. <i>Sistemas y métodos de control</i> .....   | 22        |
| 2.5. <i>Parámetros de control y monitoreo</i> .....   | 23        |
| 2.5.1 Dentro de la planta .....   | 24        |
| 2.5.2 En torno a la planta.....   | 25        |
| <b>CAPÍTULO 3.....</b>  | <b>26</b> |
| 3. PROTOTIPO DE PLANTA OTEC .....   | 27        |
| 3.1. <i>Representación de las etapas</i> .....  | 28        |
| 3.2. <i>Ubicación de los puntos de interés</i> .....  | 30        |
| 3.2.1. Puntos de monitoreo .....  | 44        |
| 3.2.2. Puntos de control.....   | 44        |
| 3.2.3. Respuesta y funcionamiento del sistema.....  | 44        |
| 3.3. <i>Etapas de experimentación</i> .....   | 45        |
| 3.3.1. Funcionamiento con gradiente térmico mínimo.....   | 46        |
| 3.3.2. Modificaciones controladas del gradiente térmico.....  | 47        |
| 3.3.3. Modificaciones al segundo prototipo .....  | 52        |
| 3.4. <i>Estudio de los resultados observados</i> .....  | 53        |
| 3.5. <i>Consideraciones para el desarrollo del prototipo</i> .....  | 54        |
| <b>CAPÍTULO 4.....</b>  | <b>55</b> |
| 4. DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN .....  | 56        |
| 4.1. <i>Variables oceanográficas de interés para monitorear en torno a una planta OTEC</i> .....                    | 56        |
| 4.2. <i>Implementación de sensores y estructura instrumental para el monitoreo en torno a una planta OTEC</i> ..... | 57        |
| 4.3. <i>Simulación y pruebas al correntómetro desarrollado</i> .....  | 59        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.4. <i>Funcionamiento del correntómetro en un ambiente acuático</i> ..... | 59        |
| 4.5. <i>Resultados observados de las pruebas al correntómetro</i> .....    | 60        |
| <b>CAPÍTULO 5</b> .....  | <b>64</b> |
| 5. IMPACTO AMBIENTAL.....  | 65        |
| 5.1. <i>Clorofila a</i> .....  | 65        |
| 5.1.1. Monitoreo.....  | 66        |
| 5.1.2. Estrategia para el monitoreo de la clorofila a .....                | 66        |
| 5.2. <i>Temperatura</i> .....  | 68        |
| 5.2.1. Monitoreo.....  | 68        |
| 5.2.2. Estrategia para el monitoreo de la temperatura .....                | 68        |
| 5.3. <i>Propuesta para monitorear el posible Impacto Ambiental</i> .....   | 68        |
| 5.3.1. Consideraciones previas .....                                       | 69        |
| <b>CAPÍTULO 6</b> .....  | <b>72</b> |
| 6. CONCLUSIONES.....   | 73        |
| REFERENCIAS .....  | 74        |
| ANEXO I. FICHA TÉCNICA DE SENSORES UTILIZADOS .....                        | 77        |
| ANEXO II. CÓDIGOS FUENTES DE PROGRAMACIÓN.....                             | 79        |

# LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1.1 APARIENCIA ACTUAL DEL RÍO MEUSE. TOMADA DE GOOGLE STREET VIEW. ....  | 2  |
| FIGURA 1.2 LONGITUD DE 2 KM PARA EXTRAER AGUA FRÍA (TOMADA DE OTECNEWS EN LÍNEA). ....  | 3  |
| FIGURA 1.3 DIÁMETRO DE 1.6 M PARA EXTRAER AGUA FRÍA (TOMADA DE OTECNEWS EN LÍNEA). ....   | 3  |
| FIGURA 1.4 LA TUNISIE (TOMADA DE OTECNEWS EN LÍNEA). ....   | 3  |
| FIGURA 1.5 MINI-OTEC (TOMADA DE OTECNEWS EN LÍNEA). ....  | 4  |
| FIGURA 1.6 REGIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL (MODIFICADA DE WWW.CFE.GOB.MX). ....   | 6  |
| FIGURA 1.7 PRODUCTORES INDEPENDIENTES DE ENERGÍA. DICIEMBRE 2015. ....  | 6  |
| FIGURA 1.8 APORTE DE OTEC A LA GENERACIÓN ELÉCTRICA NACIONAL. CASO HIPOTÉTICO PARA DICIEMBRE DE 2015. ....  | 7  |
| FIGURA 2.1 H. M. S. CHALLENGER (TOMADA DE THE VOYAGE OF H. M. S. CHALLENGER NARRATIVE-VOL. I). ....   | 9  |
| FIGURA 2.2 RUTA DEL H. M. S. CHALLENGER (TOMADA DEL SITIO: I4IS.ORG). ....  | 9  |
| FIGURA 2.3 ROSETA-CTD DEL B/O EL PUMA. ....   | 10 |
| FIGURA 2.4 CURVA TÍPICA DE TEMPERATURA. ....  | 10 |
| FIGURA 2.5 ESTRUCTURA VERTICAL DEL OCÉANO. ....   | 11 |
| FIGURA 2.6 CIRCULACIÓN TERMOHALINA (TOMADA DEL SITIO: FJFERRER.WEBS.ULL.ES). ....   | 12 |
| FIGURA 2.7 GRADIENTE TÉRMICO ENTRE 20 Y 1000 M DE PROFUNDIDAD (TOMADA DEL SITIO: HTTP://WWW. GLOBALCCSINSTITUTE.COM, FUENTE: HINMREC). ....   | 12 |
| FIGURA 2.8 PERFIL DE TEMPERATURA DEL GOLFO DE CALIFORNIA. ....  | 13 |
| FIGURA 2.9 BATIMETRÍA CABO SAN LUCAS, BASADO EN SM-352. ....  | 13 |
| FIGURA 2.10 BATIMETRÍA BAHÍA DE BANDERAS, BASADO EN SM-421. ....  | 14 |
| FIGURA 2.11 PERFIL DE TEMPERATURA ESTACIÓN E24 DEL CRUCERO GIOX-POM. ....   | 14 |
| FIGURA 2.12 BATIMETRÍA MAR CARIBE, BASADO EN SM-922. ....   | 15 |
| FIGURA 2.13 PERFIL DE TEMPERATURA CRUCERO J07. ....   | 15 |
| FIGURA 2.14 ENTROPÍA DEL CICLO RANKINE SIMPLE. ....   | 16 |
| FIGURA 2.15 ESQUEMA DEL CICLO RANKINE SIMPLE. ....  | 16 |
| FIGURA 2.16 ENTROPÍA DEL CICLO HIRN. ....   | 18 |
| FIGURA 2.17 ESQUEMA DEL CICLO HIRN. ....  | 18 |
| FIGURA 2.18 ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA OTEC. ....   | 19 |
| FIGURA 2.19 ESQUEMA CICLO ABIERTO OTEC. ....  | 20 |
| FIGURA 2.20 ESQUEMA CICLO CERRADO OTEC. ....  | 20 |
| FIGURA 2.21 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA CONFIGURADO COMO LAZO ABIERTO. ....   | 22 |
| FIGURA 2.22 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA CONFIGURADO COMO LAZO CERRADO. ....   | 23 |
| FIGURA 3.1 PRIMER PROTOTIPO DE PLANTA OTEC DE LABORATORIO PARA ESTE PROYECTO. ....  | 27 |
| FIGURA 3.2 PANTALLA DE CONTROL Y MONITOREO. ....  | 27 |
| FIGURA 3.3 CONDENSADOR TUBO-ALETA. ....   | 28 |
| FIGURA 3.4 EVAPORADOR TUBO-ALETA. ....  | 28 |
| FIGURA 3.5 FLUJÓMETRO EMPLEADO. ....  | 29 |
| FIGURA 3.6 REFRIGERANTE R-134A. ....  | 29 |
| FIGURA 3.7 SEGUNDO PROTOTIPO DE PLANTA OTEC DE LABORATORIO PARA ESTE PROYECTO. ....   | 29 |
| FIGURA 3.8 ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS DEL SEGUNDO PROTOTIPO DE PLANTA OTEC DE LABORATORIO PARA ESTE PROYECTO. ....   | 30 |
| FIGURA 3.9 TERMOPAR TIPO J DENTRO DEL CONGELADOR (IZQUIERDA), TERMOPAR TIPO J EN EL RETORNO DE AGUA AL CONGELADOR (CENTRO), TERMOPAR TIPO J EN LA ZONA DEL EVAPORADOR (DERECHA). .... | 31 |
| FIGURA 3.10 RESPUESTA TÍPICA DE TERMOPAR TIPO J. ....   | 32 |
| FIGURA 3.11 RESPUESTA EXPERIMENTAL DEL TERMOPAR A, B Y C, CON SU ECUACIÓN LINEAL. ....  | 34 |
| FIGURA 3.12 RESPUESTA EXPERIMENTAL DEL TERMOPAR A, B Y C, ORDENADOS DE ARRIBA HACIA ABAJO, CURVA IDEAL EN ROJO, CURVA DE RESPUESTA EN AZUL. ....                                      | 35 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 3.13 TERMOPAR TIPO K A LA SALIDA DEL EVAPORADOR (IZQUIERDA), TERMOPAR TIPO K A LA SALIDA DEL CONDENSADOR (DERECHA)...   | 36 |
| FIGURA 3.14 RESPUESTA TÍPICA DE TERMOPAR TIPO K.....   | 37 |
| FIGURA 3.15 ANÁLISIS DE EXACTITUD DE "K1", RESPUESTA DE "K1" EN AZUL, PATRÓN DE REFERENCIA EN ROJO, RANGO COMPLETO A LA IZQUIERDA, ZOOM DEL LADO DERECHO. ....   | 38 |
| FIGURA 3.16 ANÁLISIS DE EXACTITUD DE "K2", RESPUESTA DE "K2" EN AZUL, PATRÓN DE REFERENCIA EN ROJO, RANGO COMPLETO A LA IZQUIERDA, ZOOM DEL LADO DERECHO. ....   | 38 |
| FIGURA 3.17 POLINOMIOS DE AJUSTE PARA "K1" GRADO 5 (VERDE) Y GRADO 6 (MORADO), RANGO COMPLETO ARRIBA, ZOOM A LOS RANGOS DE INTERÉS ABAJO.....  | 39 |
| FIGURA 3.18 POLINOMIOS DE AJUSTE PARA "K2" GRADO 5 (VERDE) Y GRADO 6 (MORADO), RANGO COMPLETO ARRIBA, ZOOM A LOS RANGOS DE INTERÉS ABAJO.....  | 40 |
| FIGURA 3.19 CONEXIONES PARA CALIBRAR LA RESPUESTA DEL FLUJÓMETRO ANTE EL PASO DEL R-134A. ....   | 41 |
| FIGURA 3.20 CURVA DE CALIBRACIÓN DEL FLUJÓMETRO.....   | 43 |
| FIGURA 3.21 FLUJÓMETRO A LA SALIDA DEL EVAPORADOR.....   | 43 |
| FIGURA 3.22 REPRESENTACIÓN EN DIAGRAMA UNIFILAR DEL PROTOTIPO DE PLANTA OTEC Y SUS PUNTOS DE MEDICIÓN. SIMBOLOGÍA NORMALIZADA ISO 1219. SE OMITEN LAS VÁLVULAS DE CIERRE, LLENADO, ESTRANGULAMIENTO Y LOS CAMBIOS EN EL DIÁMETRO Y TIPO DE LA TUBERÍA, YA QUE PARA ESTE ESTUDIO SE DESPRECIARON SUS EFECTOS..... | 46 |
| FIGURA 3.23 BOSQUEJO DE GRÁFICAS, GRADIENTE TÉRMICO DE 20°C. ....  | 47 |
| FIGURA 3.24 BOSQUEJO DE GRÁFICAS, GRADIENTE TÉRMICO DE 22°C. ....  | 48 |
| FIGURA 3.25 BOSQUEJO DE GRÁFICAS, GRADIENTE TÉRMICO DE 28°C. ....  | 49 |
| FIGURA 3.26 BOSQUEJO DE GRÁFICAS, GRADIENTE TÉRMICO DE 35°C. ....  | 49 |
| FIGURA 3.27 BOSQUEJO DE GRÁFICAS, GRADIENTE TÉRMICO DE 38°C. ....  | 50 |
| FIGURA 3.28 BOSQUEJO DE GRÁFICAS, GRADIENTE TÉRMICO DE 41°C. ....  | 51 |
| FIGURA 3.29 BOSQUEJO DE GRÁFICAS, GRADIENTE TÉRMICO DE 44°C. ....  | 52 |
| FIGURA 3.30 PROTOTIPO COMPLETO DE PLANTA OTEC. ....  | 52 |
| FIGURA 3.31 CURVAS DE EFICIENCIA. TEÓRICA EN AZUL. EXPERIMENTAL EN ROJO. ....  | 53 |
| FIGURA 3.32 EFICIENCIA NEGATIVA. TEÓRICA EN AZUL. EXPERIMENTAL EN ROJO.....  | 53 |
| FIGURA 3.33 DIÁMETROS DIFERENTES. ....   | 54 |
| FIGURA 3.34 PRIMERA BOMBA DE CIRCULACIÓN.....  | 54 |
| FIGURA 4.1 CORRENTÓMETRO SENSOR DATA SD-4 Y SUS PARTES. ....   | 57 |
| FIGURA 4.2 COMPONENTES ELECTRÓNICOS. ....  | 58 |
| FIGURA 4.3 DESTINO HIPOTÉTICO DEL AGUA DE DESCARGA. ....   | 58 |
| FIGURA 4.4 CAPTURA DE PANTALLA DE LA APLICACIÓN PARA COMUNICARSE CON EL CORRENTÓMETRO.....   | 59 |
| FIGURA 4.5 RECORRIDOS DEL CORRENTÓMETRO.....   | 60 |
| FIGURA 4.6 RECORRIDOS DEL CORRENTÓMETRO ALREDEDOR DE LA ALBERCA. ....  | 62 |
| FIGURA 5.1 ESPECTRO DE ABSORCIÓN DE LA CLOROFILA A (VERDE) Y LA CLOROFILA B (ROJO). ....   | 66 |
| FIGURA 5.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN FLUORÓMETRO.....  | 66 |
| FIGURA 5.3 LUZ REFLEJADA, CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA 0%.....   | 67 |
| FIGURA 5.4 LUZ REFLEJADA, CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA 100%.....   | 67 |
| FIGURA 5.5 INCIDENCIA DE LUZ REFLEJADA SOBRE LA FOTORRESISTENCIA. ....   | 67 |
| FIGURA 5.6 DENSIDAD DEL AGUA SEGÚN SU TEMPERATURA Y SALINIDAD. AGUA SUPERFICIAL A LA IZQUIERDA (2 M), AGUA PROFUNDA A LA DERECHA (785 M).....  | 70 |



## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| TABLA 1.- RESPUESTA DE CADA TERMOPAR TIPO J UTILIZADO. ....  | 33 |
| TABLA 2.- RESPUESTA DE CADA TERMOPAR TIPO K.....   | 37 |
| TABLA 3.- CONDICIONES DEL GAS R-134A PARA EL EXPERIMENTO.....  | 42 |
| TABLA 4.- PULSOS POR FLUJO DE GAS. ....  | 43 |
| TABLA 5.- RESPUESTA CALIBRADA DE CADA TERMOPAR TIPO K.....   | 45 |
| TABLA 6.- CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS R-134A. GRADIENTE 20°C. RESULTADOS CORROBORADOS MEDIANTE EL EMPLEO DE TABLAS..          | 47 |
| TABLA 7.- CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS R-134A. GRADIENTE 22°C. ....  | 48 |
| TABLA 8.- CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS R-134A. GRADIENTE 28°C. ....  | 48 |
| TABLA 9.- CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS R-134A. GRADIENTE 35°C. RESULTADOS CORROBORADOS MEDIANTE EL EMPLEO DE TABLAS..          | 49 |
| TABLA 10.- CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS R-134A. GRADIENTE 38°C. ....   | 50 |
| TABLA 11.- CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS R-134A. GRADIENTE 41°C. ....   | 51 |
| TABLA 12.- CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS R-134A. GRADIENTE 44°C. RESULTADOS CORROBORADOS MEDIANTE EL EMPLEO DE TABLAS.<br>..... | 51 |
| TABLA 13.- EFICIENCIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DE CADA GRADIENTE. ....   | 53 |
| TABLA 14.- TIEMPO DE ARRASTRE POR TRANSECTO, VELOCIDAD TEÓRICA.....  | 60 |
| TABLA 15.- DATOS CAPTURADOS EN MEMORIA SD DE CADA TRANSECTO. ....  | 61 |
| TABLA 16.- TIEMPO DE ARRASTRE POR TRANSECTO, VELOCIDAD TEÓRICA.....  | 61 |
| TABLA 17.- DATOS CAPTURADOS EN MEMORIA SD DE CADA TRANSECTO. ....  | 62 |
| TABLA 18.- TIEMPO DE ARRASTRE ALREDEDOR DE LA ALBERCA.....   | 63 |
| TABLA 19.- DATOS CAPTURADOS EN CADA TRANSECTO. ....  | 63 |
| TABLA 20.- LUMINOSIDAD DEL AGUA DE MAR A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE CLOROFILA. MEDICIONES REALIZADAS EN LABORATORIO....       | 67 |
| TABLA 21.- VALORES PARA EL CÁLCULO TEÓRICO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE DESCARGA.....   | 69 |
| TABLA 22.- VALORES PARA EL CÁLCULO TEÓRICO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE DESCARGA. AGOSTO 2003.....                              | 70 |
| TABLA 23.- VALORES PARA EL CÁLCULO TEÓRICO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE DESCARGA. DICIEMBRE 2002. ....                          | 71 |

## SIGLAS Y ABREVIATURAS

|                  |  |
|------------------|--|
| APROX            | Aproximadamente  |
| B/O              | Buque Oceanográfico                                      |
| $C_e$            | Calor específico   |
| CFE              | Comisión Federal de Electricidad                         |
| CO <sub>2</sub>  | Dióxido de Carbono                                       |
| CTD              | Conductividad Temperatura Profundidad                    |
| $\Delta$         | Gradiente  |
| DOE              | Departamento de Energía de los Estados Unidos            |
| E                | Exponente  |
| ENIAC            | Electronic Numerical Integrator and Computer             |
| FEM              | Fuerza Electro Magnética                                 |
| $h$              | Entalpía   |
| H <sub>2</sub> O | Agua   |
| HINMREC          | Hawaii National Marine Renewable Energy Center           |
| LED              | Light Emitting Diode                                     |
| LTEO             | Laboratorio Taller de Energía Oceánica                   |
| $m$              | Masa   |
| $M$              | Masa molar   |
| N                | Norte  |
| $\eta$           | Eficiencia térmica                                       |
| $n$              | Número de moles  |
| NELHA            | Laboratorio de Energía Natural de la Autoridad de Hawaii |
| NH <sub>2</sub>  | Grupo amino  |
| NH <sub>3</sub>  | Amoníaco   |
| OPEP             | Organización de países Árabes Exportadores de Petróleo   |
| OTEC             | Ocean Thermal Energy Conversion                          |
| $P$              | Presión absoluta   |
| $\rho$           | Densidad   |
| PIE              | Productores Independientes de Energía                    |
| PVC              | Poli cloruro de Vinil                                    |
| $Q$              | Calor  |
| $R$              | Constante universal de los gases ideales                 |
| S                | Salinidad  |
| SD               | Secure Digital   |
| SEN              | Sistema Eléctrico Nacional                               |
| SIN              | Sistema Interconectado Nacional                          |
| $T$              | Temperatura  |
| T-S              | Temperatura-Salinidad                                    |
| UNAM             | Universidad Nacional Autónoma de México                  |
| USB              | Universal Serial Bus                                     |

|     |  |         |
|-----|--|---------|
| $V$ |  | Volumen |
| $W$ |  | Este    |
| $W$ |  | Trabajo |

## UNIDADES

|                |                                 |
|----------------|---------------------------------|
| '              | Minutos                         |
| "              | Pulgadas                        |
| %              | Tanto por ciento                |
| °              | Grados                          |
| °C             | Grados Celsius                  |
| atm            | Atmósfera                       |
| g              | Gramo                           |
| J              | Joule                           |
| K              | Kelvin                          |
| kg             | Kilo gramo                      |
| km             | Kilo metro                      |
| kPa            | Kilo Pascal                     |
| kW             | kilo Watt                       |
| L              | Litro                           |
| m              | Metro                           |
| m <sup>3</sup> | Metro cúbico                    |
| mAh            | Mili Ampere hora                |
| mg             | Mili gramo                      |
| ml             | Mili litros                     |
| mm             | Mili metros                     |
| mol            | Mol                             |
| ms             | Mili segundos                   |
| mV             | Mili Volt                       |
| MW             | Mega Watt                       |
| nm             | Nano metros                     |
| ppm            | Partes por millón               |
| PSI            | Libra por pulgada cuadrada      |
| RPM            | Revoluciones Por Minuto         |
| RPS            | Revoluciones Por Segundo        |
| s              | Segundos                        |
| UPS            | Unidades Prácticas de Salinidad |
| V              | Volt                            |

## DEFINICIONES

|                         |  |
|-------------------------|--|
| °Celsius                | Unidad de medición de la temperatura creada en 1742 por Anders Celsius.  |
| Adiabático              | Que se realiza sin intercambio de calor entre los sistemas involucrados.   |
| Amoniaco                | Gas incoloro, compuesto de hidrogeno y nitrógeno.  |
| Ampere                  | Unidad de medición de la intensidad de corriente eléctrica.  |
| Arduino                 | Plataforma de hardware libre, basado en un microcontrolador y puertos de entrada/salida.                                 |
| Atmósfera               | Presión ejercida sobre un centímetro cuadrado por una columna de mercurio de 76 mm de altura, a 0°C y a 45° de latitud.  |
| Batimetría              | Levantamiento del relieve de las superficies subacuáticas.   |
| Calor                   | Energía que se manifiesta por una variación en la temperatura.   |
| Calor específico        | Cantidad de calor necesario para elevar en una unidad la temperatura de una unidad de masa de una sustancia.             |
| Carboeléctrico          | Proceso de generación eléctrica por medio de turbinas accionadas mediante la combustión de carbón.                       |
| Circulación Termohalina | Circulación oceánica determinada por los gradientes de densidad causados por las diferencias de temperatura y salinidad. |
| Clorofila               | Pigmento verde presente en las hojas, responsable de la fotosíntesis.  |
| Correntómetro           | Aparato para medir la velocidad y dirección de las corrientes de agua.   |
| Densidad                | Cantidad de masa en un determinado volumen.  |
| Deshidratador           | Dispositivo que remueve o retiene la humedad a su alrededor.   |
| Eficiencia              | Relación calculada mediante el cociente de la energía producida entre la energía suministrada al sistema.                |
| Energía renovable       | Energía que utiliza los recursos de la naturaleza como las radiaciones solares o el viento.                              |
| Entalpía                | Cantidad de energía cedida o absorbida por un sistema termodinámico.   |
| Entropía                | Permite medir la parte no utilizable de la energía contenida en un sistema.  |
| Eólico                  | Proceso que aprovecha las corrientes del viento para generar electricidad.   |
| Estado trófico          | Describe la productividad del ambiente acuático.   |
| Eutrofización           | Enriquecimiento de nutrientes en un ecosistema.  |
| Factor de planta        | Porcentaje de tiempo durante el cual una planta OTEC generará electricidad respecto al tiempo total de funcionamiento.   |
| Flujómetro              | Instrumento de medición del caudal de un fluido.   |
| Fluorómetro             | Dispositivo utilizado para medir los parámetros de fluorescencia.  |
| Fotovoltaico            | Proceso que aprovecha la radiación solar para producir electricidad.   |
| Geotermoeléctrica       | Proceso de aprovechamiento del calor del interior de la Tierra para producir electricidad.                               |
| Gradiente               | Diferencia algebraica entre dos valores.   |
| Gramo                   | Unidad de medida de la masa.   |
| Grupo amino             | Grupo derivado del amoniaco.   |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Hidrocala             | Muestreo acuático que consiste en el lance de aparatos de medición o de recuperación de agua.     |
| Hidroeléctrico        | Proceso de aprovechamiento de la energía hidráulica para generar electricidad.                    |
| Inducción magnética   | Proceso mediante el cual campos magnéticos genera campos eléctricos.                              |
| Isentrópico           | Proceso termodinámico en el cual la entropía permanece constante.                                 |
| Isóbatas              | Línea que une los puntos de igual profundidad en el océano.                                       |
| Joule                 | Unidad de medida para la energía en forma de calor o trabajo.                                     |
| Kelvin                | Unidad de medición de la temperatura creada en 1848 por Lord Kelvin.                              |
| Líquido saturado      | Estado en el cuál el aporte de calor le produce cambiar de fase líquida a vapor.                  |
| Líquido subsaturado   | Estado del líquido en el cual el aporte de calor le produce un aumento en su temperatura.         |
| Litro                 | Unidad de medición de volumen.  |
| Masa                  | Cantidad de materia de un cuerpo.   |
| Masa molar            | Masa de un mol de sustancia.  |
| Metro                 | Unidad de medición de la longitud.  |
| Millas náuticas       | Unidad de medición de la longitud empleada en navegación.   |
| Mol                   | Cantidad de materia que contiene $6.02 \times 10^{23}$ partículas.                                |
| Nucleoeléctrica       | Proceso de generación eléctrica por medio de turbinas accionadas mediante combustibles nucleares. |
| Offshore              | Tipo de planta OTEC situada sobre el mar.   |
| Onshore               | Tipo de planta OTEC situada sobre tierra firme.   |
| OTEC                  | Planta de generación eléctrica mediante el gradiente térmico del mar.                             |
| Presión absoluta      | Resultado de la presión atmosférica más la presión manométrica.                                   |
| Producción neta       | Producción eléctrica que no es utilizada dentro del proceso de generación.                        |
| Producción bruta      | Producción eléctrica sin considerar la electricidad invertida.                                    |
| Pulgadas              | Unidad de longitud equivalente a 2.54 cm.   |
| Punto de ebullición   | Temperatura en la que la presión del líquido es igual a la presión del vapor.                     |
| Punto de vaporización | Temperatura a la cual un líquido pasa a fase de vapor   |
| Salinidad             | Cantidad relativa de las sales disueltas en el agua.  |
| Segundos              | Unidad de medición del tiempo.  |
| Surgencia             | Ascenso de agua profunda hacia la superficie.   |
| Termoclina            | Capa de agua en la cual la temperatura cambia rápidamente con la profundidad.                     |
| Termopar j            | Unión de hierro y constantán que produce un voltaje al aplicarle temperatura.                     |
| Termopar k            | Unión de chromel y alumel que produce un voltaje al aplicarle temperatura.                        |
| Turbogas              | Proceso de generación eléctrica por medio de turbinas accionadas mediante la combustión de gas.   |
| Vapor saturado        | Vapor a la temperatura de ebullición del líquido  |
| Vapor sobrecalentado  | Vapor con mayor temperatura que la de ebullición  |
| Volt                  | Unidad de medición del potencial eléctrico.   |
| Volumen               | Espacio que ocupa un cuerpo.  |
| Zona fótica           | Zona en la que penetra la luz en un ecosistema acuático.  |

Esta investigación tuvo como objetivo general, el monitoreo en tiempo real del funcionamiento de una planta térmica del océano tipo OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion). Como primer paso se desarrolló, a nivel de laboratorio, un prototipo de OTEC, representando cada una de las fases de su ciclo de trabajo, colocando de manera estratégica los dispositivos de sensado más adecuados para dicho fin, en este primer prototipo las variables monitoreadas fueron la temperatura y el voltaje generado, con esto se obtuvo una primera aproximación a una planta OTEC. Seguidamente se fueron realizando diversas modificaciones estructurales y de diseño llegando a un segundo modelo en el cual se agregó un número mayor de dispositivos de sensado para monitorear variables como la presión, la temperatura y la velocidad de flujo dentro del sistema.

El prototipo final no sólo contó con el monitoreo de su funcionamiento, también se le agregaron los dispositivos necesarios para que el usuario tenga controlados los procesos del ciclo de trabajo. Para lograr los fines de control y, en general, el monitoreo de una planta OTEC, se utilizó el lenguaje de programación ARDUINO y los componentes y dispositivos de la misma familia. Con el lenguaje ARDUINO se programaron los dispositivos para enviar la señal de sensado, y que ésta fuera procesada e interpretada por el microcontrolador ATMEGA328. Dependiendo de los parámetros previamente estipulados por el usuario, el microcontrolador envía una señal de acción a los componentes para lograr así, un ciclo de trabajo eficiente y automático. Se desarrolló también una aplicación para dispositivos con plataforma Android, utilizando para ello el lenguaje de programación MIT APP INVENTOR 2 con el cual se logró tener una comunicación inalámbrica entre una tableta electrónica convencional y el microcontrolador ATMEGA328 a través de la comunicación bluetooth. Con esta aplicación se monitorea el funcionamiento y los valores de temperatura y voltaje generado, además de que permite el arranque y paro de los procesos que comprenden el ciclo de trabajo dentro de una planta OTEC.

Para el planteamiento realizado, se tomó como referencia el sistema de monitoreo y control de la planta OTEC que opera exitosamente en Corea del Sur.

Se desarrolló instrumentación propia para el monitoreo de algunas variables oceanográficas de interés. Un aspecto de relevancia es el referente al agua de descarga, la cual resulta de la mezcla del agua cálida y el agua fría. Es importante conocer las características fisicoquímicas de ésta, para proponer la profundidad adecuada de liberación, para ello es importante conocer las características de la columna de agua para identificar cuál es la profundidad a la que se encuentran características similares entre las dos aguas.

Utilizando la carcasa de un correntómetro SENSORDATA SD-4, se desarrolló otro correntómetro con mayor capacidad de almacenamiento y mediciones más precisas; esto con la finalidad de conocer las propiedades de la corriente en la zona de descarga, y con ellas estimar el destino del agua de descarga. Para minimizar un posible impacto ambiental será necesario monitorear las alteraciones que pudieran presentarse en los valores de Clorofila disuelta ante el aporte de nutrientes contenidos dentro del agua de descarga, ya que la Clorofila es un buen parámetro indicador de presencia orgánica. Para dicho fin, se desarrolló un fluorómetro de bajo costo. La respuesta de dicho fluorómetro al medir cinco diferentes soluciones preparadas en laboratorio, muestra la utilidad de este aparato, sin embargo, es necesario implementarle mejoras, ya que se encuentra aún en una fase experimental.

## ABSTRACT

The objective of this research is the real-time monitoring of the operation of an Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). Initially, an experimental OTEC prototype was developed, representing each phase of its work cycle, strategically placing the most suitable sensors for this purpose. In this first model was an approximation to an OTEC power plant and the variables monitored were the temperature and the voltage generated. Several structural and design changes were made, obtaining a second prototype in which a greater number of detection devices were added to control variables such as pressure, temperature and flow rate within the system.

The final prototype, counted on the monitoring of its operation and with the necessary devices for the user to control the processes of the work cycle. In order to achieve the purpose of controlling and, in general, monitoring the OTEC plant, the ARDUINO programming language and the components and devices of the same family were used. With the ARDUINO language the devices were programmed to send the detection signal, and that was processed and interpreted by the ATMEGA328 microcontroller, depending on the parameters previously stipulated by the user, the microcontroller sends an action signal to the components to achieve it, An Efficient and automatic. Also developed an application for devices with Android platform, using the programming language MIT APP INVENTOR 2 with which it was possible to have a wireless communication between a conventional electronic tablet and the ATMEGA328 microcontroller through the bluetooth communication. This application monitors the values of operation and temperature and voltage generated, in addition to allowing us to start and stop the processes that make up the work cycle within an OTEC power plant.

Currently the research of the OTEC power plant proposed, required to take as a reference the monitoring and control system of the facilities operating in South Korea.

It was also necessary to develop own instrumentation for the monitoring of some oceanographic variables of interest. One aspect of relevance is the one that refers to the water of discharge, that results from the mixture of the hot water and the cold water. It is important to know the physicochemical characteristics of the discharge water to propose adequate discharge depth, it is also important to know the characteristics of the water column to identify the depth of characteristics similar to the discharge water.

Using the SENSORDATA SD-4 correntometer housing, another correntometer with more storage capacity and more accurate measurements was developed; This in order to know the properties of the current in the discharge zone, and with them to estimate the destination of the discharge water. In order to minimize a possible environmental impact, it will be necessary to monitor the alterations that can occur in chlorophyll dissolved in the presence of nutrients contained in the discharge water, since chlorophyll is a good indicator of organic presence. For this purpose, a low-cost fluorometer was developed to measure chlorophyll values. The response of this fluorometer to the measurement of five different solutions prepared in the laboratory shows the usefulness of this apparatus, to which it is necessary to implant a housing.



# INTRODUCCIÓN

La humanidad ha utilizado desde hace mucho tiempo las energías renovables que están a su alrededor, energías como la eólica, solar e hidráulica son algunos ejemplos de los diferentes tipos de estas energías; el uso de ellas prevaleció hasta la llegada de la Revolución Industrial, momento en el cual las energías renovables ceden su lugar a energías obtenidas mediante la explotación de recursos fósiles como el petróleo y el carbón, recursos que en ese entonces representaban fuentes de energía baratas y abundantes.

Durante muchos miles de años la temperatura media de la Tierra se ha conservado relativamente constante, esto propicia que los climas se comporten de manera estable y permite el desarrollo de la vida y evolución de las especies. Así también los gases de efecto invernadero habían conservado su equilibrio gracias, fundamentalmente, a la acción de los árboles y las lluvias que regulan las cantidades de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera. Sin embargo, desde la década de los 50 del siglo XX, se ha notado un incremento en las concentraciones de los niveles de gases invernadero provocado por el uso generalizado y excesivo de los recursos fósiles, el debilitamiento de la capa de ozono y la destrucción de masas forestales ha causado un aumento en la temperatura del planeta provocando cambios drásticos en los climas haciéndolos cada vez más impredecibles; esto aunado a los procesos naturales de enfriamiento y calentamiento que la Tierra presenta desde sus inicios.

En los últimos años, debido al aumento de los gases invernadero, al aumento de la temperatura del planeta y al incremento en los precios de los combustibles fósiles, estamos asistiendo a un renacer del uso de las energías renovables. Entre los sistemas más conocidos están los sistemas fotovoltaicos, los sistemas eólicos, hidroeléctricos y más recientemente los sistemas de conversión de energía térmica oceánica, **OTEC** por sus siglas en inglés "Ocean Thermal Energy Conversion".

Los sistemas OTEC utilizan el gradiente térmico natural del mar para generar energía, en las zonas geográficas con agua superficial cálida y agua fría profunda, se aprovecha este gradiente térmico para producir un ciclo de vapor que hace girar una turbina acoplada a un generador eléctrico. Existen dos tipos de ciclos. Uno llamado "ciclo abierto" en el cual el fluido de trabajo es el vapor del agua superficial, evaporada en una cámara de vacío, el cual hace girar una turbina acoplada a un generador; el otro tipo de es llamado "ciclo cerrado" en el cual el fluido de trabajo es un gas con bajo punto de evaporación. Esta idea fue originalmente concebida por el físico francés Arsène d'Arsonval en el año de 1881, pero no fue sino hasta 1930 cuando uno de sus discípulos, Georges Claude, construyó la primera planta OTEC en Matanzas Cuba con la intención de producir 25 MW para abastecer a la ciudad. Sin embargo, el proyecto fracasó en los primeros días de prueba a causa de un huracán que destruyó la tubería de agua fría. En 1935, cerca de las costas de Río de Janeiro, lo intentó nuevamente a bordo del barco "Le Tunisie" pero el fuerte oleaje impidió la puesta en marcha del nuevo diseño. En los años 60's, Hilbert Anderson y su hijo James Anderson, diseñaron una planta OTEC de ciclo cerrado [Anderson, 1982] incorporando un gas como fluido de trabajo. En 1979 se construyó en el Laboratorio de Energía Natural de Hawaii una planta MINI-OTEC, a bordo de una embarcación militar, generando una energía neta de 18 kW [L.A. Vega 2007]. En 1980 el Departamento de Energía de los Estados Unidos construyó la planta de ciclo cerrado OTEC-1 En 1982 Tokio Electric Power Company y Toshiba construyeron, con éxito, en la Isla de Nauru una pequeña planta OTEC de 100 kW de potencia bruta. En 1993, el Laboratorio de Energía Natural establece una generación neta récord para una planta OTEC de ciclo abierto de 50 kW, 6 años más tarde se pone a prueba con éxito una planta OTEC de ciclo cerrado de 120 kW. En 2008 el Instituto Nacional de Tecnología Oceánica de la India experimenta con una planta de ciclo cerrado con una generación bruta de 1 MW. Actualmente el Instituto de Energía Oceánica de Japón en conjunto con la Universidad de Saga, operan en verano una planta OTEC con una producción neta de 50 kW desde febrero del 2014. Corea del Sur opera una planta OTEC desde noviembre del 2013 produciendo 20 kW de potencia neta y proyecta una generación bruta de 100 MW para finales del año 2018 [OTEC News, 2013].

El desarrollo de esta nueva tecnología de generación eléctrica trae consigo la apertura de nuevos campos de investigación, así como una serie de beneficios secundarios como aire acondicionado, fertilizantes, acuicultura, sales, purificación del agua, entre otros. Un sistema tan vasto y productivo como OTEC, requiere de todas las herramientas y recursos disponibles para su buen funcionamiento, es por ello que se siguen estudiando las maneras de optimizar las inversiones y hacer más eficientes los ciclos de trabajo también se explora el uso de diferentes fluidos de trabajo.

La complejidad de este sistema y la presencia de sus múltiples variables requiere de un monitoreo constante en todo momento y a lo largo de todo su funcionamiento. Es por ello que los sistemas electrónicos y de control deben responder a las necesidades de monitoreo, seguridad y confiabilidad.

Al igual que cualquier otra ciencia, la electrónica, está marcada por pequeños y grandes descubrimientos, así como los inventos que éstos provocaron. En el año de 1800 Alessandro Volta presenta ante el Royal Society de Londres sus resultados para generar electricidad empleando diferentes metales separados por un conductor húmedo, apiló 30 discos metálicos separados por paños humedecidos con agua salada, nació así la "pila voltaica" y la unidad de medida Volt. En 1820 Hans C. Oersted descubre que, al fluir una corriente eléctrica por un conductor, se genera un campo magnético. En ese mismo año Michael Faraday, utiliza este descubrimiento para construir el motor eléctrico y 10 años después descubre el efecto inverso, creando así la Ley de la Inducción Magnética, que es la base de los generadores eléctricos. En 1883 Thomas Alva Edison descubre que, al calentar un metal, éste emite cargas eléctricas y lo llamó "efecto Edison", 20 años después John Ambrose Fleming encontró una aplicación práctica para este efecto, el Diodo, para utilizarlo como detector de ondas electromagnéticas. A Fleming se le conoce como "el padre de la electrónica". En 1887 Heinrich Hertz crea el primer transmisor de radio. En el año de 1920, se transmite el primer programa público de radio en Inglaterra. En 1924, John Logie Baird logra transmitir imágenes utilizando ondas de radio. En 1947, un equipo de ingenieros encabezados por John W. Mauchly y J. Prester Eckert crean la primera computadora digital electrónica "ENIAC" (Electronic Numerical Integrator and Computer), 4 años después producen "UNIVAC I", la primera computadora comercial. En 1958 Jack Kilby de "Texas Instruments" desarrolla un circuito completo en una pastilla de silicio, lo llamó "circuito integrado", de manera casi simultánea el ingeniero Robert Noyce de "Fairchild Semiconductor" desarrollo un dispositivo similar al que nombró "circuito unitario"; ambos son reconocidos como los creadores de los circuitos integrados. En 1962 Nick Holonyak de "General Electric" desarrolla el primer LED (Light Emitting Diode). En 1968, "Fairchild Semiconductor" produce el primer circuito integrado regulador de voltaje lineal, poco tiempo después lanza al mercado la serie 7800 de 5V. En 1971 se diseña el primer microprocesador, el Intel 4004. En 1994 la empresa Ericsson inicia estudios para investigar la viabilidad de una interfaz vía radio, nace así la transmisión bluetooth.

En este trabajo de investigación se hizo uso de la electrónica para el monitoreo, control y automatización de un prototipo funcional de una planta tipo OTEC, a nivel de laboratorio.

En los capítulos siguientes se tratarán con mayor detalle las variables oceanográficas consideradas para su monitoreo, así también se justificarán los puntos de interés dentro del prototipo que se eligieron para su monitoreo y control, y la interacción que estos puntos tienen con las variables oceanográficas.

En el capítulo 1, "ANTECEDENTES", se ha profundizado sobre el tema OTEC, desde los primeros experimentos del físico francés Arsène d'Arsonval en Matanzas Cuba, hasta una de las plantas OTEC más recientes y de mayor tecnología localizada en Corea del Sur.

En el capítulo 2, "FUNDAMENTOS TEÓRICOS", se detallan las variables oceanográficas más relevantes y de mayor interés en torno a una planta OTEC, así también, se mencionan los diferentes tipos de plantas OTEC y los sistemas de control y monitoreo.

En el capítulo 3, "PROTOTIPO DE PLANTA OTEC", se presenta el modelo desarrollado dentro del laboratorio, comenzando con la primera versión y las modificaciones pertinentes hasta su aspecto final. Así también se explica su

funcionamiento y cuáles serían sus etapas equivalentes dentro de una planta OTEC real y su respuesta ante la modificación controlada del gradiente de temperatura.

En el capítulo 4, "DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN", se hace una propuesta de modificaciones sobre un instrumento de medición oceánica para sustituir su electrónica original por electrónica actual de mayor rendimiento, detallando su funcionamiento mecánico y electrónico, se presentan los resultados ante las pruebas y experimentos realizados en un ambiente acuático.

En el capítulo 5, "IMPACTO AMBIENTAL", se hace referencia a los estudios realizados sobre el posible impacto ambiental ante la presencia de una planta OTEC. Se propone un instrumento para monitoreo de clorofila disuelta.

En el capítulo 6, "CONCLUSIONES", se presentan los resultados obtenidos y se hacen propuestas de acuerdo a las tendencias del comportamiento del modelo observado.

Se agregan dos anexos y la fuente de las referencias citadas. En el ANEXO I se incorporan los datos técnicos de los dispositivos utilizados para el buen funcionamiento del modelo de planta OTEC. En el ANEXO II podemos encontrar los códigos fuente de la programación utilizada para lograr una óptima automatización del modelo, así como capturas de pantalla de los experimentos y el cálculo de entalpía.

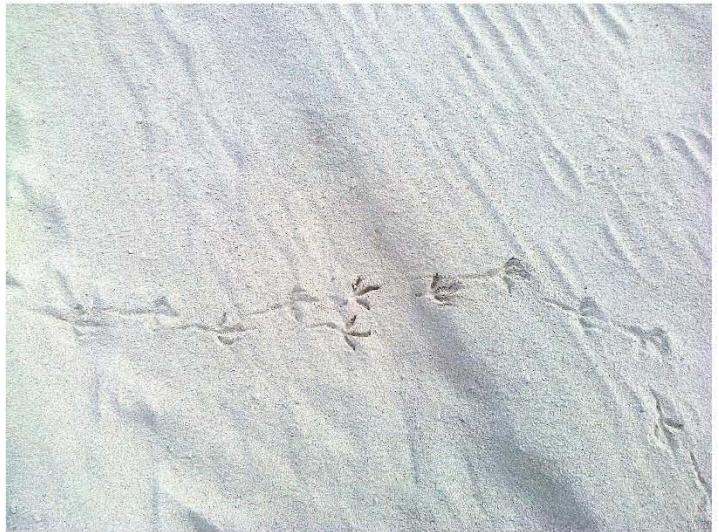
# OBJETIVOS

**GENERAL.** Monitorear en tiempo real el funcionamiento de una planta de energía térmica oceánica, mediante un prototipo a escala construido en laboratorio, así como algunos parámetros de su entorno oceanográfico.

**ESPECÍFICO 1.** Diseñar experimentos a nivel de laboratorio asociados a una planta de energía térmica oceánica.

**ESPECÍFICO 2.** Desarrollar instrumentos y tecnología para el monitoreo y estudio en el entorno de una planta de energía térmica oceánica.

# CAPÍTULO 1



# 1. ANTECEDENTES

A pesar de lo reciente que es el tema OTEC, la idea de obtener energía eléctrica aprovechando el gradiente térmico del mar, no lo es. Esta idea se puede ver planteada en la famosa novela “20, 000 leguas de viaje submarino” escrita por Julio Verne<sup>1</sup> y publicada en Francia en 1869, en la cual el capitán Nemo, a bordo de su enorme submarino “Nautilus”, hace referencia a la posibilidad de transformar el gradiente de temperatura de la columna de agua de los océanos, en una energía utilizable por el hombre, la electricidad. En su capítulo XXII, *todo por la electricidad*, se lee: “Sí, señor profesor, y no faltan los medios de hacerlo. Yo podría obtener la electricidad estableciendo un circuito entre hilos sumergidos a diferentes profundidades, a través de las diversas temperaturas de las mismas...”<sup>2</sup>. Actualmente este método se utiliza para la obtención de energía eléctrica, empleando para ello el gradiente térmico que existe en la columna de agua. Esta idea se basa en el descubrimiento hecho en 1821 por Thomas Seebeck<sup>3</sup>, cuando soldó dos metales diferentes, cobre y bismuto, observó que al calentarlos se producía un campo electromagnético. Este descubrimiento es la base para la elaboración de los termopares, los cuales producen un pequeño voltaje del orden de los milivolts dependiendo de la temperatura a la que son sometidos.

Más de veinte años después de esta publicación, en 1881 y también en Francia, el biofísico Jacques-Arsène d’Arsonval<sup>4</sup> propuso, sin éxito, la idea de explotar la energía térmica presente en el mar [Martí et al, 2008]. En 1926 Georges Claude<sup>5</sup>, un químico francés alumno de Arsenè, se basa en las investigaciones de su mentor para centrar sus trabajos en la producción de energía eléctrica mediante las diferencias de temperatura entre las aguas marinas superficiales y las profundas. Con esas bases construyó en 1928 una pequeña planta experimental de 60 kW en Ougrée (Bélgica), alimentada por el agua de un alto horno a 33°C y por el agua del río Meuse a 12°C [Vega, 2007].



Figura 1.1 Apariencia actual del río Meuse. Tomada de Google Street View.

---

<sup>1</sup> Jules Gabriel Verne (8 de febrero 1828 – 24 de marzo 1905). Escritor, poeta y dramaturgo francés reconocido por sus novelas de aventura y su influencia en la ciencia ficción.

<sup>2</sup> Texto original: “*Oui, monsieur le professeur, et les moyens ne me manquaient pas. J’aurais pu, en effet, en établissant un circuit entre des fils plongés à différentes profondeurs, obtenir l’électricité par la diversité de températures qu’ils éprouvaient...*”

<sup>3</sup> Thomas Johann Seebeck (9 de abril 1770 – 10 de diciembre 1831). Médico e investigador físico natural de origen alemán Báltico, descubrió el efecto termoeléctrico.

<sup>4</sup> Jacques-Arsène d’Arsonval (8 de junio 1851 – 13 de diciembre 1940). Biofísico e inventor francés ideó el galvanómetro y el amperímetro. Pionero en proponer el uso del gradiente térmico del océano como fuente de energía.

<sup>5</sup> Georges Claude (24 de septiembre 1870 – 23 de mayo 1960). Químico, físico e inventor francés reconocido por la licuefacción de gases, desarrolló e impulsó la propuesta de Arsène para comenzar el ámbito OTEC.

Debido a los resultados alcanzados, construyó entre 1929 y 1930 en la bahía de Matanzas Cuba la primera planta de aprovechamiento de la energía térmica del océano, para ello utilizó la misma máquina de Ougrée, a la cual le instaló tubería de 1.6 m de diámetro y casi 2 km de longitud [Vega, 2010]. Hizo funcionar esta planta para obtener 22 kW con un pequeño gradiente de 14°C, 27°C en la superficie contra 13°C a una profundidad de 700 metros aproximadamente. La planta funcionó únicamente durante 11 días debido a que una fuerte tempestad destruyó la tubería de agua fría. El bajo rendimiento de la planta, por debajo del 1%, no hizo competitiva la propuesta de Claude ante otros tipos de generación eléctrica. En la actualidad sólo es posible encontrar una parte de la estructura construida por Claude en Matanzas, Cuba.



Figura 1.2 Longitud de 2 km para extraer agua fría (tomada de otecnews en línea).



Figura 1.3 Diámetro de 1.6 m para extraer agua fría (tomada de otecnews en línea).

Luego de su intento en Cuba, Georges Claude construyó en 1935, sobre un barco mercante de 10,000 toneladas



Figura 1.4 La Tunisie (tomada de otecnews en línea).

llamado "Le Tunisie" fondeado a 100 km de las costas de Río de Janeiro (Brasil), un nuevo intento de planta OTEC con la intención de accionar un generador de 800 kW mediante la utilización de 8 turbinas de 257 kW (mecánicas) y un compresor rotativo de amoníaco de 1300 kW para fabricar hielo. Una vez más la inclemencia del oleaje destruyó la tubería de captación de agua fría y se vio nuevamente obligado a abandonar el proyecto, teniendo como única ganancia el haber producido 2 mil toneladas de hielo [Martí, 2008]. En 1945 Claude deja su empresa "L'Air Liquide", en 1945 es arrestado tras la ocupación nazi en Francia y condenado a cadena perpetua,

pero liberado en 1950.

Claude había dejado con sus intentos una gran base para el desarrollo de la explotación de la energía térmica de los océanos.

A mediados de la década de 1950, la empresa francesa Societé Energie de Mers propone una nueva planta para ser explotada en tierra firme en Costa de Marfil, donde contarían con un gradiente de 20°C para hacer funcionar dos módulos de 5 MW cada uno y tener una generación neta de 7 MW, el proyecto tuvo que ser abandonado debido a los altos costos que representaba en su momento, aunado a los bajos precios que entonces se tenían en la industria petrolera.

En esa misma década, Bryn Beorse llega a Estados Unidos y junto con Everett Howe fundan *Sea Water Conversion Laboratory* (Laboratorio de Conversión de Agua de Mar) en la Universidad de California en Berkeley. No tuvieron éxito en construir una planta OTEC, el laboratorio se convirtió en uno de los principales centros de investigación sobre desalinización de agua.

La crisis del petróleo en 1973<sup>6</sup>, provocó una renovación en el interés sobre el desarrollo de plantas OTEC. Por ello surgen nuevas propuestas por parte de empresas y universidades americanas, se proponían centrales flotantes de gran potencia. Por una parte, el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad John Hopkins presenta una propuesta de planta de 100 MW, por su parte la empresa TRW Corporation propone una planta de potencia similar. Una empresa más, Lockheed, da la propuesta de una planta de 160 MW. En 1970, la compañía eléctrica Tokio Electric Power Company comenzó trabajos para la construcción de una planta OTEC experimental en la Isla de Nauru con la finalidad de producir 100 kW. En 1981 la planta entró en operación y, debido a que el consumo propio de la planta llegaba a los 90 kW, sólo logró alcanzar a producir 31.5 kW de energía neta durante largos periodos de prueba, los cuales fueron destinados a la energización de una escuela y otros consumos. Nuevamente los altos costes de operación provocaron su desmantelamiento.

Los intentos de implementar una planta OTEC a escala comercial continúan y, en 1979, un consorcio de empresas



Figura 1.5 Mini-OTEC (tomada de otecnews en línea).

construye en el Laboratorio de Energía Natural de la Autoridad de Hawaii (NELHA) la planta "Mni-OTEC" a bordo de un barco militar, fondeado a 1.5 millas de la costa. Proyectada para generar 50 kW y accionada por un gradiente de 20°C, esta planta generaba, después de descontar la energía requerida para el funcionamiento del sistema OTEC, entre 10 y 17 kW netos que servían únicamente para las necesidades propias del barco. Al año siguiente el Departamento de Energía de los Estados Unidos ("DOE" por sus siglas en inglés) construyó la planta OTEC-1 a bordo de un buque, la cual sirvió para la

realización de pruebas para el mejoramiento de los intercambiadores de calor y sobretodo fue útil para la demostración de que un sistema OTEC puede trabajar desde barcos en movimiento y demostraron, también, la viabilidad de diseños de tuberías suspendidas de agua fría.

En 1981 las empresas japonesas Toshiba y Tokyo Electric Power construyeron una planta experimental en la Republica de Nauru con la que alcanzaron buenos éxitos a nivel de experimento. Debido a estos éxitos, el grupo diseñó una planta de 2.5 MW, la cual nunca fue construida.

<sup>6</sup> El 23 de agosto de 1973 la OPEP (Organización de países Árabes Exportadores de Petróleo) más Egipto, Túnez, Siria y países como Emiratos Árabes Unidos, Baréin, Arabia Saudita Omán, Kuwait y Catar, miembros del Golfo Pérsico, toman la decisión de ya no exportar más petróleo a los países que habían apoyado a Israel durante la guerra de Yom Kipur que enfrentaba a Israel con Siria y Egipto. Esta medida incluía a Estados Unidos y los aliados de Europa Occidental.



En 1993 el Laboratorio de Energía Natural de Hawaii construyó y operó una planta de 210 MW en conjunto con desalinización de agua. Diseñada para operar con 26°C y 6°C. Las tasas más altas de producción alcanzaron los 255 kW netos y 0.4 litros por segundo de agua desalada. La planta operó hasta 1998 y fue desmantelada en enero de 1999 [Vega, 2002/2003].

En 1994 la Universidad de Saga construyó una planta experimental de 4.5 kW donde puso a prueba intercambiadores de calor y estudia actualmente los beneficios secundarios del sistema OTEC.

Durante 2011 y 2012 la India, con materiales importados de Japón y asesoría británica, utilizó plantas flotantes tipo OTEC en la costa de Tamil Nadu con la finalidad de obtener agua potable, lamentablemente al año siguiente una tempestad destruyó las instalaciones.

### **PLANTAS OTEC ACTUALES**

En 2013 entró en funciones una planta OTEC en la región de Goseong, Corea del Sur, produciendo 20 kW de energía neta, se proyecta que para 2018 podrá aumentar su producción.

El Instituto de Energía Oceánica de Japón, en colaboración con la Universidad de Saga, construyó una planta OTEC experimental en 2014 con una producción neta de 50 kW.

En 2015 Hawaii instaló una planta OTEC desarrollada por Makai Ocean Engineering, la planta de 100 kW provee electricidad a 120 familias aproximadamente.

### **ELECTRICIDAD Y PERSPECTIVA OTEC EN MÉXICO**

El desarrollo de la energía eléctrica en México comenzó en el año de 1879, cuando se instaló la primera planta generadora, "La Americana", para una fábrica textil en León Guanajuato, con una generación de 1.8 kW.

A finales del siglo XIX Porfirio Díaz otorgó el grado de "servicio público" a la electricidad. Se realizaron investigaciones y se comprobó el potencial de las corrientes de agua para la generación de electricidad en Huachinango Puebla, y en 1905 la empresa The Mexican Light and Power Company inició las operaciones de la planta Necaxa, ésta se convirtió en la primera planta hidroeléctrica del país siendo la planta con mayor producción del mundo, en 1906 ya producía 31.5 MW. En 1910 ya se contaba en México con una generación de 50 MW, los cuales eran producidos totalmente por empresas extranjeras, The Mexican Light and Power Company producía el 80% del total de generación<sup>7</sup>.

El 18 de enero de 1934 se reformó el Artículo 73 Constitucional en su fracción X con la finalidad de facultar al Congreso de la Unión para legislar sobre la energía eléctrica, atendiendo las necesidades de la época de ampliar el servicio eléctrico a las zonas en las que no existía rentabilidad para la construcción de plantas generadoras.

El gobierno federal crea la Comisión Federal de Electricidad (CFE) el 14 de agosto de 1937 que tendría como objetivo organizar y dirigir un sistema nacional de generación, transmisión y distribución de la electricidad, basándose en principios técnicos y económicos, sin propósitos de lucro y con la finalidad de obtener el mayor rendimiento posible en beneficio de los intereses generales a un costo mínimo<sup>8</sup>. Para 1938 la CFE tenía una generación de 64 kW, en 1960 ya aportaba el 54% de los 2308 MW de capacidad instalada. A pesar de ello, tan solo el 44% de la población contaba con energía eléctrica.

El 27 de septiembre de 1960 el presidente Adolfo López Mateos nacionaliza la industria eléctrica.

---

<sup>7</sup> CFE [2014]. CFE y la electricidad en México, de CFE Sitio web: <http://www.cfe.gob.mx>

<sup>8</sup> Ley promulgada en Mérida, Yucatán el 14 de agosto de 1937 y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de agosto de 1937.

En 1992 se reformó la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica para permitir la inversión privada y extranjera en el ámbito de cogeneración, siendo el Estado el responsable del servicio público.

A inicios del año 2000 la generación llegó a los 35,385 MW y el servicio eléctrico cubría casi el 95% del territorio nacional con 614,653 km de red de transmisión y distribución.

Desde 2009 la empresa encargada de brindar el servicio eléctrico a todo el país es la CFE. Para este fin se utiliza el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), que se divide en 8 áreas de control y 9 áreas de transmisión, todas ellas interconectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) a excepción del área de Baja California Norte y Baja California Sur (7 y 8) la cual se encuentra interconectada a la red eléctrica de la región Occidental de Estados Unidos de América mediante dos líneas de transmisión.



Figura 1.6 Regiones del Sistema Eléctrico Nacional (modificada de [www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)).

La generación de electricidad en México se basa en 10 tipos de tecnología: vapor, carboeléctrica, geotermoeléctrica, ciclo combinado (una turbina de gas y una turbina de vapor), turbogas, combustión interna, hidroeléctrica, eoloeléctrica, nucleoeeléctrica y solar fotovoltaica. En diciembre de 2015 la capacidad instalada era de 54,852.2 MW. De ese total la CFE genera 41, 899.4 MW (76.39%), los restantes 12,952.8 MW (23.61%) lo generan los Productores Independientes de Energía (PIE) empleando para ello plantas generadoras basadas en la tecnología de ciclo combinado para generar 12,434.7 MW (96%) y plantas basadas en la tecnología eoloeléctrica para generar 518.1 MW (4%)<sup>9</sup>.

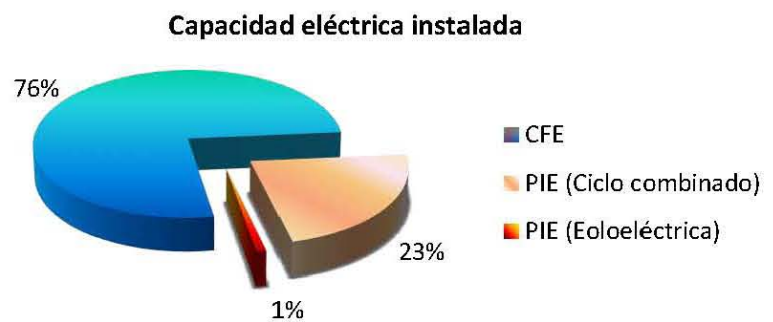


Figura 1.7 Productores Independientes de energía. Diciembre 2015.

La mayor parte de la energía eléctrica proviene de la quema de combustibles fósiles, los cuales resultan caros, contaminantes y comienzan a escasear. En el informe anual del año 2015, la CFE menciona que entre 2014 y 2016 convertirá 7 centrales de generación termoeléctrica a combustión dual, con el objetivo de que puedan utilizar, además de combustóleo, gas natural, ya que tanto los precios de los combustibles como las emisiones al ambiente por la quema de estos resultan altos en comparación con el gas natural.

Lo anterior refleja una clara tendencia por la búsqueda de nuevas fuentes de energía, sobretodo fuentes de energía renovable como lo ofrece una planta OTEC, que representa una alternativa para la generación de energía eléctrica limpia. Si al momento de este informe se hubiera contado con una planta OTEC con generación de 100 MW, ésta representaría aproximadamente el 1% de generación eléctrica nacional por parte de los productores independientes. Cabe mencionar que una planta OTEC tendrá un factor de planta del 100%, siempre y cuando cuente con el gradiente mínimo de 20°C.

<sup>9</sup> Fuente: Comisión Nacional de Electricidad, Informe anual 2015.

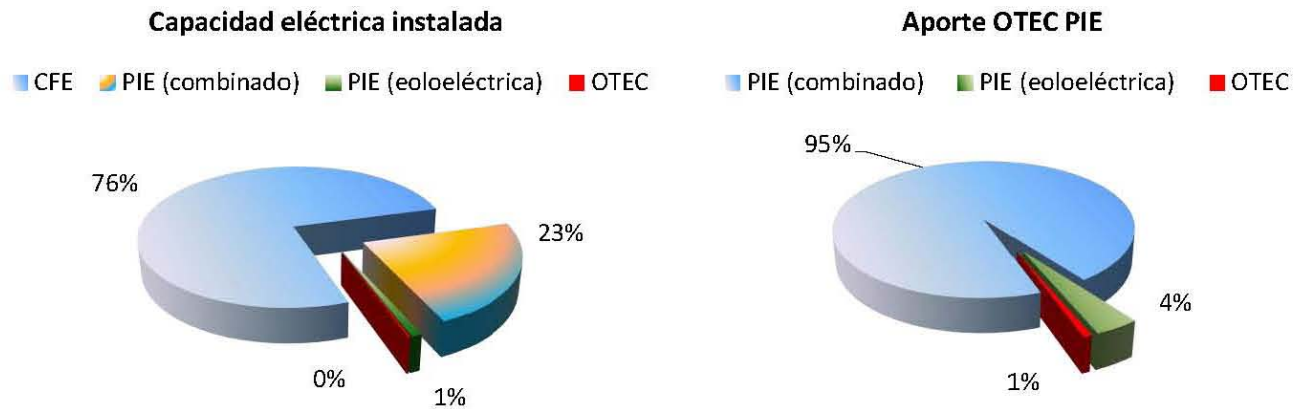


Figura 1.8 Aporte de OTEC a la generación eléctrica nacional. Caso hipotético para diciembre de 2015.

En los últimos 10 años se ha profundizado en México sobre OTEC, estructurando una base sólida para la planificación, desarrollo y puesta en marcha de una planta de este tipo.

Aviña Jiménez en el año 2007, analiza en su tesis de licenciatura la factibilidad de instalar una planta OTEC en costas mexicanas, concluyendo que "la factibilidad de la OTEC va de la mano con los beneficios extras que se pueden obtener del agua fría de las profundidades" y señala a la Bahía de San Lucas en Baja California, Puerto Vallarta en Jalisco y Cozumel en Quintana Roo como sitios adecuados para la instalación de una planta de este tipo.

Bárceñas Graniel en el año 2014, analiza en su tesis de maestría el potencial energético por gradiente térmico en el Mar Caribe. Considerando dos aspectos fundamentales para la ubicación de una planta OTEC: gradiente térmico mayor a los 20°C, y que este gradiente se encuentre a no más de 10 km de distancia de la costa. Con esas consideraciones propuso que los lugares con potencial OTEC en el Mar Caribe son: Isla Cozumel, Punta Allen, Tulum, Sian Ka'an, Xcalac, Mahahual y banco Chinchorro.

García Huante en el año 2015, analiza de manera teórica en su tesis de maestría los posibles efectos oceanográficos por la descarga de una planta OTEC con capacidad de generar 100 MW en la zona de Puerto Ángel en el estado de Oaxaca. En su trabajo concluye que los efectos generados a consecuencia de la dinámica estacional de las masas de agua aunada a la presencia de surgencias son mayores al posible efecto de la descarga de una OTEC "por lo que es poco probable que se produzcan cambios importantes a nivel de la cadena trófica".

# CAPÍTULO 2



## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La oceanografía es una ciencia que estudia los parámetros físicos, químicos, biológicos y geológicos del mar. La parte biológica se encarga de la flora y fauna marina, la química se enfoca a la composición del agua marina y la disolución de gases en ella, la geología describe la morfología y sedimentología de los ambientes marinos, y la física tiene por objeto el estudio de la estructura y dinámica de los mares, entre los parámetros más analizados se encuentran la presión, temperatura, salinidad y densidad.

En los últimos años la oceanografía física se ha convertido en una ciencia, además de descriptiva y explicativa, con el poder de predicción.

Los primeros estudios del océano comenzaron a ser desarrollados a finales del siglo XIX. En el año de 1872 se le asigna a la embarcación H. M. S. Challenger la primera expedición oceanográfica para investigar las profundidades del mar a lo largo de las grandes cuencas oceánicas. Esta expedición cubrió casi 70, 000 millas náuticas en los cuatro años que navegó, realizando 362 estaciones de muestreo, 492 sondeos de profundidad, 133 dragas y descubriendo 4, 700 nuevas especies de animales y plantas [Linklater, E. 1972]. Esta expedición tenía como objetivo principal cuestiones de biología marina. La hipótesis era la inexistencia de vida en el océano profundo (> 540 m) debido a la falta de luz y la gran presión, "hipótesis azoica" de Eduardo Forbes, la cual resultó falsa.

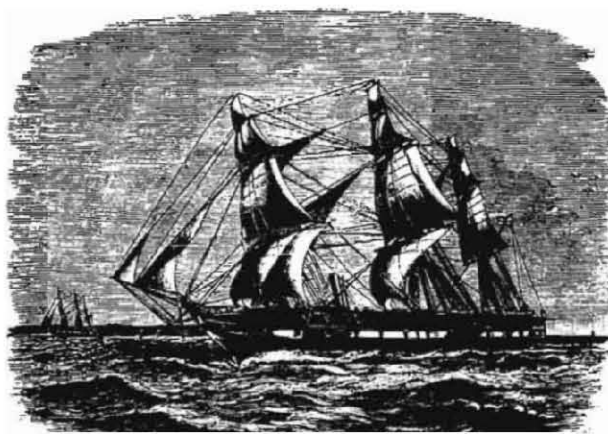


Figura 2.1 H. M. S. Challenger (tomada de *The voyage of H. M. S. Challenger Narrative-Vol. 1*).

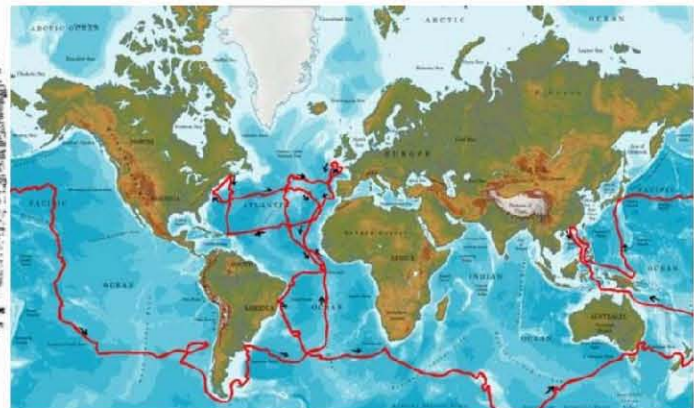


Figura 2.2 Ruta del H. M. S. Challenger (tomada del sitio: [i4is.org](http://i4is.org)).

### 2.1 Parámetros oceanográficos

El desarrollo de la tecnología ha contribuido en buena medida al robustecimiento de la oceanografía física, tanto así, que las masas de agua de los océanos y sus orígenes se han ido clasificando y definiendo mediante sus características físicas, tales como la salinidad y la temperatura [Silva y Konow, 1974]. En 1925 se realiza la primera expedición dedicada a la oceanografía física a bordo del Meteor a lo largo del Atlántico sur en transectos de Sudamérica a África. La oceanografía física tiene como objetivo estudiar la columna de agua y la dinámica del mar, fundamentalmente basándose en los parámetros de temperatura, salinidad y presión con los que se puede distinguir diferentes masas de agua y aproximar la dinámica de las mismas. Masa de agua se puede definir como un cuerpo de agua con una historia

común de formación y que tiene un origen en un lugar definido dentro del océano. “En ese lugar de formación las masas de agua son las únicas existentes, en otras regiones del océano las masas de agua se mezclan” [Tomczak, 1999]. Las características de temperatura y salinidad son representadas en diagramas “T-S”<sup>10</sup>. El diagrama T-S fue introducido en 1916 por el oceanógrafo noruego Bjorn Helland-Hansen<sup>11</sup> y desde entonces constituye una de las herramientas más importantes para la Oceanografía [Emilsson, 1981].



Figura 2.3 Roseta-CTD del B/O El Puma.

Los primeros estudios, utilizaban instrumentos como el termómetro reversible para medir la temperatura y la presión, la salinidad se medía mediante análisis químicos aplicados al agua extraída con botellas Nansen. Con el desarrollo de la tecnología se desarrolló el CTD que permite medir en forma simultánea y precisa la conductividad (relacionada directamente con la salinidad), la temperatura y la profundidad. Fue inventado por Bruce Hamon y Neil Brown [Benson, Keith R. et al, 1993]. El CTD comenzó a usarse en los años ochenta. Puede utilizarse instalado en un punto fijo para obtener las variaciones temporales de la temperatura, salinidad y nivel de agua o bien, para medir perfiles de temperatura y salinidad a lo largo de la columna de agua. En este último, el CTD<sup>12</sup> es embebido en una caja protectora que comúnmente se utiliza en conjunto con una estructura de varias botellas verticales para coleccionar muestras de agua. El CTD puede transmitir en tiempo real los valores de las propiedades físicas del agua del océano, a través de un cable hasta la computadora a bordo del barco, el mismo cable funciona como transmisor para enviar la señal de cierre de botellas. Actualmente los satélites equipados con sensores de percepción remota son capaces de medir de manera superficial la temperatura, salinidad y clorofila a.

En la columna de agua se observan las variaciones de temperatura, salinidad y presión. La temperatura disminuye con el aumento de profundidad, mientras que la salinidad aumenta y, por consecuencia, la densidad también aumenta. La densidad aumenta con la profundidad en relación directa, el conocimiento de estas variables permite conocer, entre otras cosas, las masas de agua y deducir las corrientes a diferentes profundidades, lo cual representa un gran aporte para la oceanografía física.

## 2.2 Temperatura del océano

**A**unque los parámetros físicos que determinan el comportamiento de los océanos son variados, el parámetro de principal interés en el entorno de una planta de energía tipo OTEC, es la temperatura.

El agua de la superficie del océano tiene generalmente una mayor temperatura que la del fondo, la temperatura varía según la latitud y la

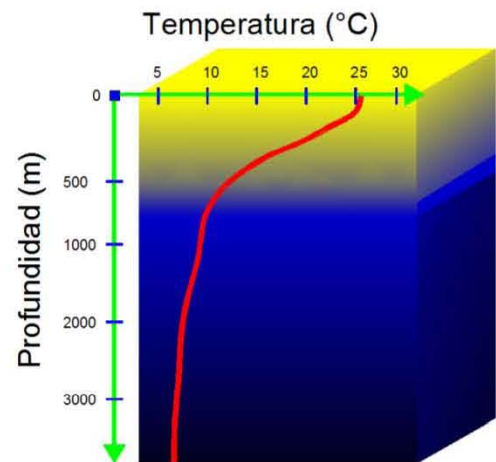


Figura 2.4 Curva típica de temperatura.

<sup>10</sup> Diagrama T-S es una representación gráfica en coordenadas cartesianas en la cual el eje vertical corresponde a los valores de temperatura y el eje horizontal a los valores de salinidad.

<sup>11</sup> Bjorn Helland-Hansen (16 de octubre 1877 – 7 de septiembre 1957). Pionero noruego en la oceanografía moderna, estudio los patrones de variación del clima en el norte del Océano Atlántico. Desarrolló en 1910 el fotómetro.

<sup>12</sup> El “B/O EL PUMA” está equipado con una roseta para 12 botellas y el CTD es un CTD modelo SEABIRD SBE 9 PLUS. Con carcasa de aluminio para profundidades de hasta 6 800 m.

intensidad de radiación solar asociada a ésta y con la existencia de corrientes marinas. Por tener una mayor densidad, a mayores profundidades se encuentra agua de menor temperatura y por el fondo oceánico fluye el agua de menor temperatura, encontrándose en las cuencas más profundas el agua originada por el deshielo de los polos. En general, la temperatura del agua oceánica varía bastante, esto es más notorio en las capas superficiales. Un perfil típico del comportamiento de la temperatura se muestra en la figura 2.4.

## 2.2.1 Zonas térmicas del océano mundial

Como se mencionó anteriormente, la capacidad calorífica del agua es una de las más altas ya que sus moléculas deben aumentar su vibración hasta el punto de romper el enlace de hidrógeno. Debido a su alta capacidad específica, el agua permite que los organismos permanezcan relativamente a una temperatura constante, aunque la temperatura ambiente varíe.

La capacidad calorífica del agua provoca que los océanos pueden absorber y almacenar las radiaciones provenientes del sol en forma de calor, esto los convierte en excelentes reguladores del clima en el planeta. La conservación de ese calor permite que la temperatura en el mar sea más estable que en los continentes. Las radiaciones del sol llegan a la superficie del mar calentándola y penetrando en su masa hasta una profundidad promedio de 200 m en zonas tropicales. De manera simplificada se puede definir una estructura del océano dividiéndolo en 3 grandes capas sobrepuestas una sobre la otra. En la capa superficial, o de mezcla, el viento y las olas, principalmente, mezclan esta capa con las capas más profundas, la profundidad depende de la turbidez del agua en la zona. La superficie del océano absorbe la radiación solar y la almacena en forma de calor, esto provoca que la temperatura en la primera capa sea elevada. La radiación solar también provoca la evaporación superficial, la cual es compensada por la precipitación. Aquí el agua es la menos densa. En mares mexicanos la capa de mezcla suele ser de unas decenas de metros. A medida que la profundidad va aumentando, las radiaciones penetran menos y la temperatura disminuye de manera constante. Por debajo de la capa de mezcla comienza la segunda capa, termoclina. En esta capa encontramos los gradientes más marcados de temperatura. En los mares alrededor de México, la termoclina suele presentarse a partir de los 50 m y hasta los 700 m de profundidad. La última capa, mar profundo, es la capa que tiene la mínima temperatura y las concentraciones de sal más elevadas. La enorme presión a la que está sometida la capa profunda contribuye al aumento de la densidad. En la figura 2.5 se muestra en un bosquejo de manera simplificada y conceptual la disposición de cada una de las capas antes mencionadas a lo largo de la columna de agua.

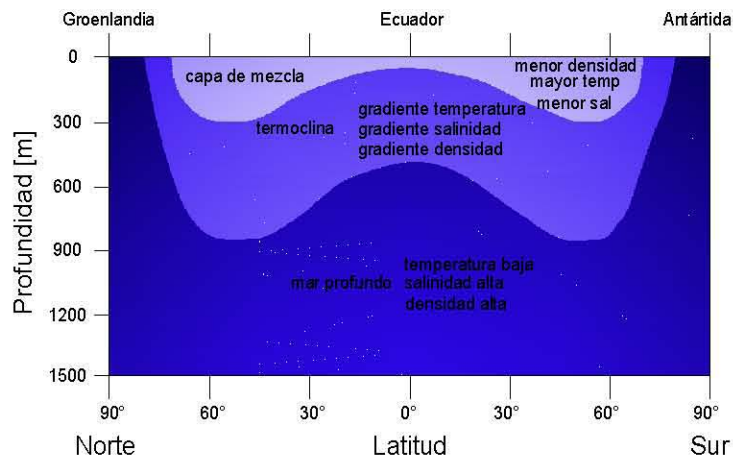


Figura 2.5 Estructura vertical del océano.

La temperatura en la superficie del océano varía fundamentalmente de manera latitudinal, en los mares polares de altas latitudes podemos encontrar temperaturas de  $-2^{\circ}\text{C}$  mientras que en los mares de bajas latitudes podemos encontrar temperaturas mayores a los  $30^{\circ}\text{C}$ . La temperatura superficial mínima en los mares de las zonas tropicales generalmente no baja de los  $20^{\circ}\text{C}$ . El viento provoca el desplazamiento del agua superficial del océano, llevándolas en ocasiones a

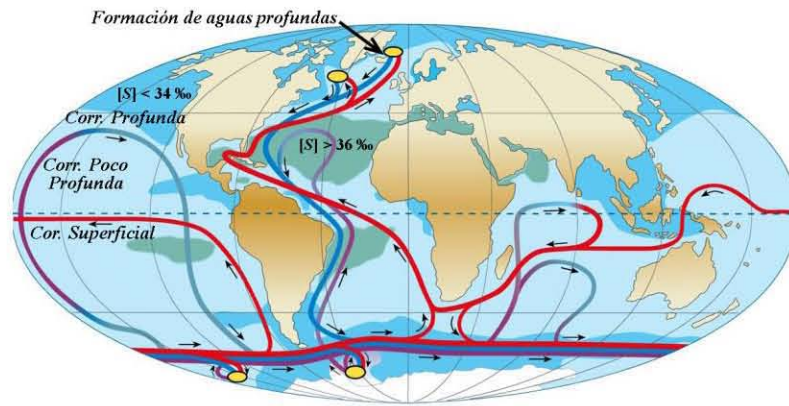


Figura 2.6 Circulación termohalina (tomada del sitio: [fjferreer.webs.ull.es](http://fjferreer.webs.ull.es)).

latitudes más elevadas, a medida que la latitud aumenta, la temperatura disminuye, esto provoca que su densidad aumente de manera significativa. Al volverse más densa se hundirá y será reemplazada por agua templada, este proceso se presenta en los dos polos impulsando un movimiento a gran escala del océano conocido como circulación termohalina<sup>13</sup>. En la circulación termohalina, el agua superficial se calienta en el Océano Pacífico e Índico y llegando a mayores latitudes, se hunde. Varios autores señalan que este recorrido es de aproximadamente 1000 años.

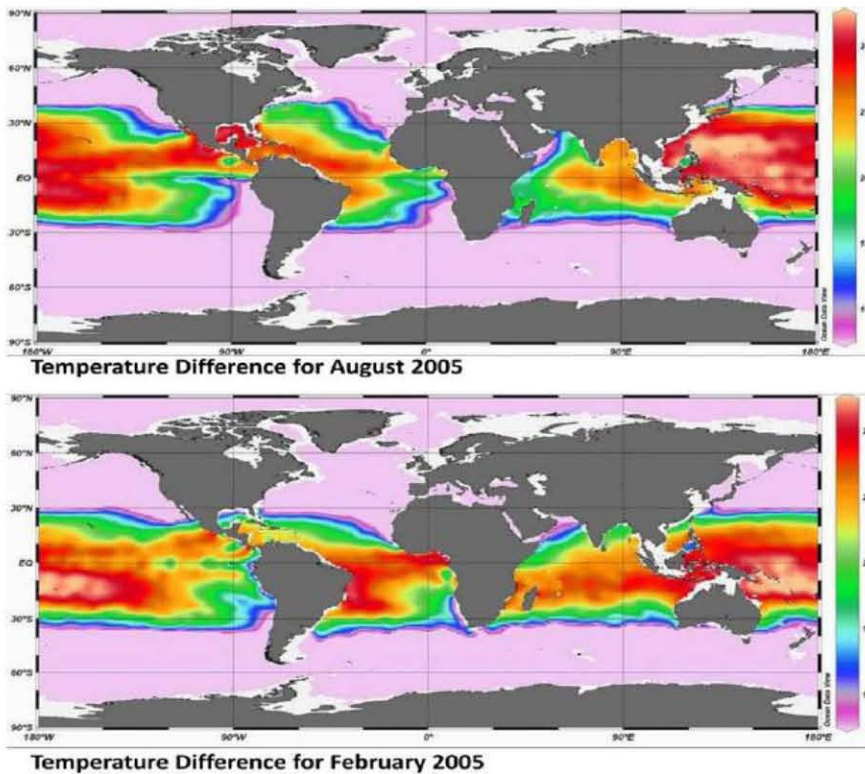


Figura 2.7 Gradiente térmico entre 20 y 1000 m de profundidad (tomada del sitio: <http://www.globalccsinstitute.com>, fuente: HINMREC).

En la figura 2.7 se muestra que la zona ecuatorial representa una de las mejores opciones para lograr un gradiente de temperatura mínimo de  $20^{\circ}\text{C}$  para el buen funcionamiento de una planta OTEC.

Otros aspectos por analizar en el contexto de una posible planta OTEC son la distancia entre las costas y el punto en el cual se encuentra una profundidad mayor a los 700 m para garantizar que en ese punto se ha superado la termoclina y se puede extraer agua con la menor temperatura posible, sin que esta distancia supere los 10 km [Bárceñas, 2014]. Son considerados 10 km para minimizar las pérdidas eléctricas en el transporte.

<sup>13</sup> También llamada cinta transportadora oceánica.



## 2.2.2 Zonas térmicas en mares de México

El estudio de la temperatura del mar en México ha venido aumentando en los últimos años, beneficiando al tema OTEC. En el capítulo anterior se mencionaron los aportes y propuestas para la ubicación de una planta OTEC en mares de México. Las zonas estudiadas son Bahía de San Lucas, Puerto Vallarta y Cozumel por Aviña en 2007, el Mar Caribe por Bárcenas en 2014 y Puerto Ángel por García en 2015.

La bahía de San Lucas se ubica en el Golfo de California. El Golfo de California es una gran cuenca de evaporación que tiene un rango de temperatura superficial que va de los 14°C a los 21°C en el mes de febrero y de los 28°C a los 31°C durante agosto [Roden, 1964]. A partir de los 800 m de profundidad se pueden encontrar temperaturas de 5°C. La variación de temperatura entre el verano y el invierno se debe a la influencia de la corriente de California y el sistema de corrientes ecuatorial [Baumgartner y Christensen, 1985; Álvarez Borrego, 1983]. En la figura 2.8 se muestra un perfil de temperatura del Golfo de California. Podemos ver la diferencia de temperatura dependiendo la época del año.

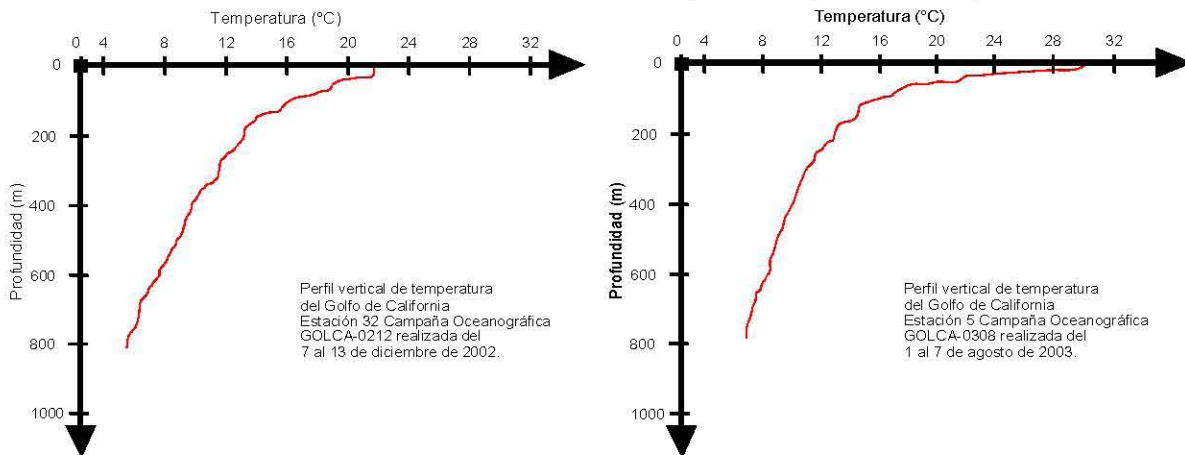


Figura 2.8 Perfil de temperatura del Golfo de California.

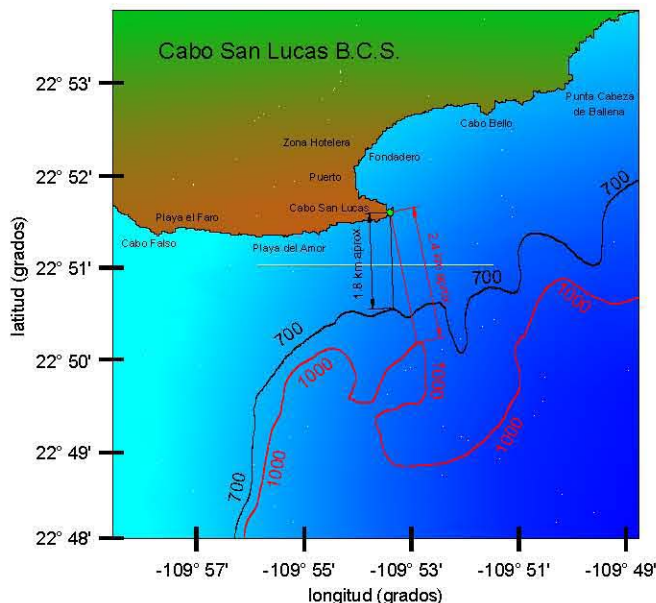


Figura 2.9 Batimetría Cabo San Lucas, basado en SM-352.

De acuerdo a la batimetría de la zona, encontramos que las isobatas de 700 m y de 1000 m que garantizan el haber superado la termoclina se encuentran a una distancia aproximada de dos km. En la figura 2.9 se pueden apreciar estas distancias medidas en línea recta desde Cabo San Lucas.

Por su parte, Bahía de Banderas tiene una temperatura superficial que varía estacionalmente de 23.3°C en el mes de marzo hasta los 30°C en el mes de septiembre [De la Lanza y Cáceres, 1994]. Los vientos del noroeste provocan surgencias al sur de la Bahía durante el invierno y la primavera, provocando descenso en la temperatura, en ocasiones llegando a los 20°C.

Durante el año 1995 el promedio de la temperatura superficial registrada fue de 27.4°C, presentándose la

mínima en abril de 22.2°C y la máxima en agosto con 30.4°C [Solis Gil, 1996].

Un perfil de temperatura tomada en mayo de 2016 durante el crucero oceanográfico "GIOX-POM<sup>14</sup>" muestra que la termoclina comienza a partir de los 100 m aproximadamente y termina después de los 800 m, profundidad a la que ya se alcanzan los 5°C de temperatura. Esta hidrocala fue realizada en la estación número 24 (E24) el día 8 de mayo de 2016 con coordenadas geográficas 20° 20' N y 105° 54' W. De acuerdo a la batimetría de la zona, se puede encontrar una profundidad de 1435 m a una distancia de 3 km aproximadamente desde Cabo Corrientes.

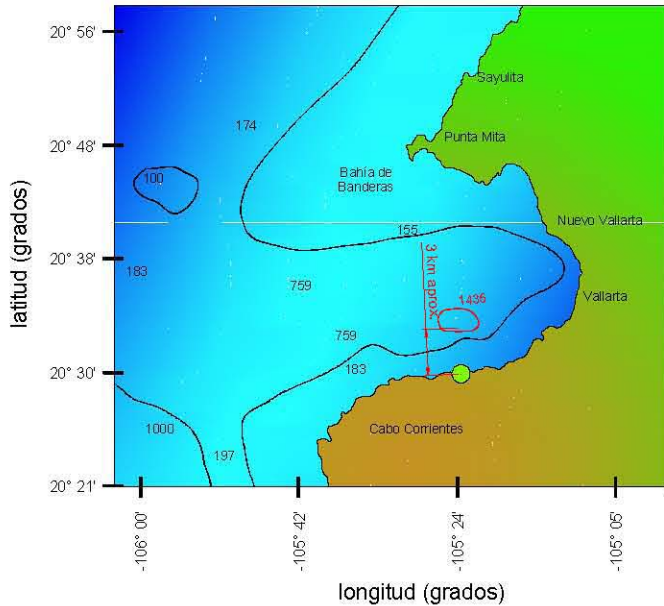


Figura 2.10 Batimetría Bahía de Banderas, basado en SM-421.

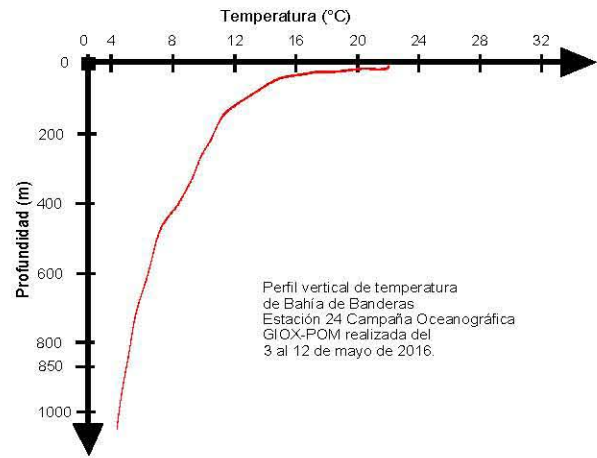


Figura 2.11 Perfil de temperatura estación E24 del crucero GIOX-POM.

Otro sitio interesante para su análisis es el Mar Caribe, está dominado por la corriente del Caribe que va de sur a norte de manera paralela a la costa, ésta se caracteriza por su temperatura cálida y su alta salinidad, al pasar por el Canal de Yucatán recibe el nombre de Corriente de Yucatán [Reyes, 2005].

A partir de los 1,200 m de profundidad el agua del Mar Caribe tiene una temperatura de entre 3.8°C y 4.2°C [Gallegos y Czitrom, 1997].

La temperatura superficial del Mar Caribe mexicano es en promedio 25.5°C en invierno y 28°C en verano [Wilkinson et al., 2009]

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente menciona en su informe del 24 de septiembre de 2001 señala que las aguas cálidas de la superficie del Caribe (aproximadamente a los 30°C) raramente se mezclan con las frías aguas del fondo ricas en nutrientes. La termoclina comienza generalmente alrededor de los 50 m de profundidad. La isobata de 700 m de profundidad se encuentra a una distancia de 4 km y la de 1000 m se encuentra a 6.7 km [Bárceñas, 2014]. La batimetría se puede observar en la figura 2.12.

<sup>14</sup> Este crucero fue realizado dentro de la asignatura "Métodos de Investigación Oceanográfica" impartida por parte del Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM en el semestre 2015-2. La información que aquí se presenta es de carácter únicamente gráfico.

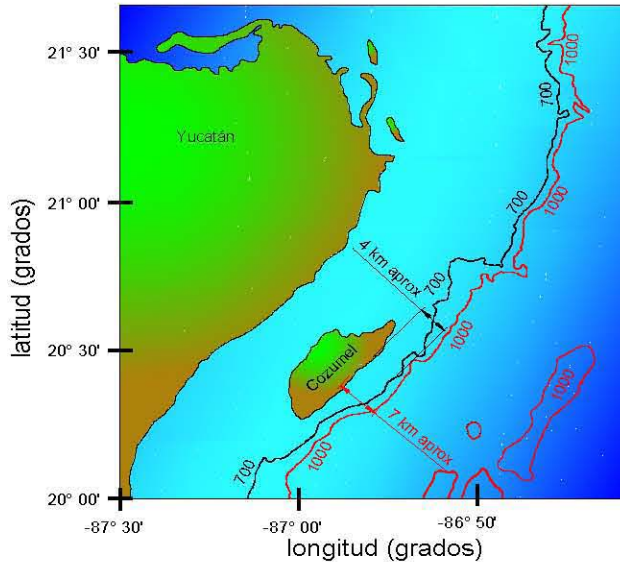


Figura 2.12 Batimetría Mar Caribe, basado en SM-922.

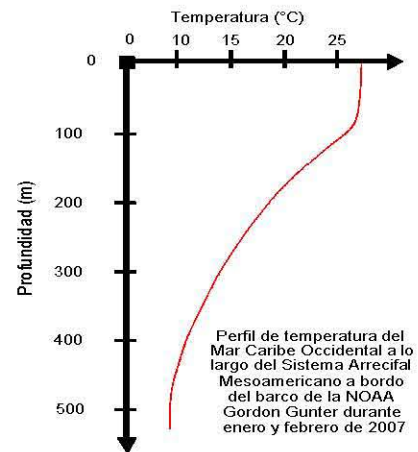


Figura 2.13 Perfil de temperatura crucero J07.

## 2.3 Planta OTEC

Las plantas tipo OTEC funcionan gracias al gradiente de temperatura de al menos 20°C. También es importante la presión de operación y los flujos de agua. Los flujos de agua requeridos dependerán de manera directa de la cantidad de generación eléctrica deseada. A mayor generación, serán necesarios mayores flujos de agua, para lo cual será necesario un sistema de bombeo más robusto que consumirá mayor energía.

### 2.3.1 Principio de funcionamiento

Las plantas de Conversión de la Energía Térmica del Océano (Ocean Thermal Energy Conversion "OTEC"), son plantas que aprovechan el gradiente térmico de la columna de agua, para ello utiliza por una parte la energía térmica almacenada en la superficie del agua oceánica en forma de calor por arriba de los 24°C y la baja temperatura del agua en las profundidades alrededor de los 4 o 5°C. La cantidad de agua cálida y fría es extraída del océano y dirigida a una fase de evaporación y otra fase de condensación, respectivamente, mediante el uso de tuberías y bombas hidráulicas. El gradiente térmico alcanzado con la diferencia de temperaturas entre el agua superficial y la profunda se convierte en energía eléctrica, basando su funcionamiento en el ciclo termodinámico denominado "ciclo Rankine", en honor a William J. M. Rankine<sup>15</sup>. Dicho ciclo es una mejora al "ciclo de Carnot" propuesto por Sadi Carnot<sup>16</sup>.

<sup>15</sup> William John Macquorn Rankine (5 de julio 1820 – 24 de diciembre 1872). Ingeniero y físico escocés, pionero de la termodinámica que desarrolló una teoría completa sobre motores de vapor.

<sup>16</sup> Nicolas Léonard Sadi Carnot (1 de junio 1796 – 24 de agosto 1832). Ingeniero y Físico francés. Se le conoce hoy como padre y fundador de la termodinámica.

La mejora del ciclo de Carnot, que desemboca en el ciclo Rankine, consiste en la consideración de que el fluido motor sea un fluido condensable y que a lo largo de su recorrido se produzcan cambios de fases. El ciclo Rankine emplea el calor para evaporar un fluido de trabajo, dicho vapor acciona una turbina acoplada a un generador para producir energía eléctrica.

De forma simplificada, y considerando un ciclo Rankine simple, el ciclo consta de las siguientes etapas:

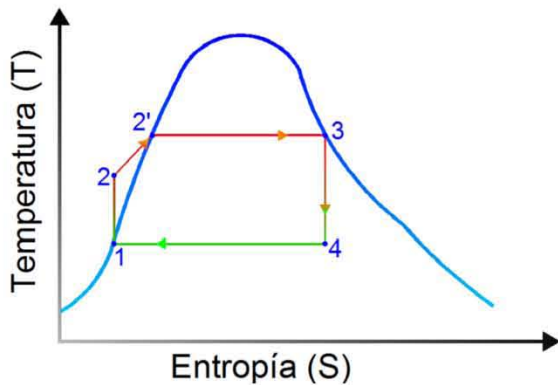


Figura 2.14 Entropía del ciclo Rankine simple.

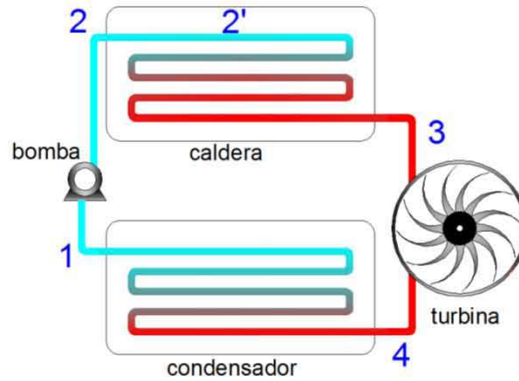


Figura 2.15 Esquema del ciclo Rankine simple.

1. El ciclo comienza en el punto 1 en donde se tiene un fluido de trabajo en estado de líquido saturado, éste ingresa a una bomba para vencer la presión que posteriormente se generará dentro de una caldera.
2. En el punto 2 el fluido, en estado de líquido saturado, se ingresa a la caldera aumentando su presión hasta la presión de la caldera. Aunque la presión aumenta de manera significativa, la temperatura casi no aumenta y la entropía se mantiene constante. Se sigue calentando dentro de la caldera hasta alcanzar su temperatura de ebullición.
3. En el punto 2' el fluido comienza su evaporación, aumenta su entropía mientras la temperatura y presión permanecen constantes mientras se mantiene en estado de líquido subsaturado.
4. En el punto 3 el fluido es ahora vapor saturado, este vapor se dirige hacia la entrada de una turbina generando trabajo. Durante este proceso el fluido, en estado de vapor saturado, comienza a perder temperatura y a subsaturarse. En un proceso ideal se puede suponer que esta etapa es adiabática y sin fricción, lo que nos lleva a un paso de entropía constante.
5. En el punto 4 el fluido, en estado de vapor subsaturado, se ingresa a un condensador en donde es condensado totalmente a temperatura y presión constantes; esto lo lleva a un estado de líquido saturado y, por ende, llega al punto 1 en donde el ciclo comienza de nuevo.

Un análisis matemático mediante las consideraciones termodinámicas pertinentes de este ciclo nos arroja las siguientes conclusiones. En este análisis se han despreciado las variaciones de energía cinética del vapor antes y después de la expansión.

La expansión isentrópica del vapor dentro de la turbina es reversible y adiabática, lo que quiere decir que la transferencia de calor es nula, de acuerdo a la primera ley de la termodinámica el trabajo de la turbina quedaría definido mediante las entalpías involucradas en el proceso.

$$W_{turbina} = h_3 - h_4 ;$$

$$Q = 0$$

Dentro del condensador no se realiza trabajo alguno, pero existe transferencia de calor.

$$Q_{condensador} = h_4 - h_1 ;$$

$$W = 0$$

Dentro de la bomba el proceso de compresión es adiabático.

$$W_{bomba} = h_1 - h_2 ;$$

$$Q = 0$$

Dentro de la caldera se adiciona calor.

$$Q_{caldera} = h_3 - h_2 ;$$

$$W = 0$$

La expresión del calor y el trabajo quedará expresada por:

$$Q + W = \Delta h$$

Utilizando términos netos:

$$(Q_{entrada} - Q_{salida}) + (W_{entrada} - W_{salida}) = (h_{salida} - h_{entrada})$$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se puede expresar como:

$$\eta_{térmico} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}$$

$$\eta_{térmico} = 1 - \frac{Q_{salida}}{Q_{entrada}}$$

$$\eta_{térmico} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Donde:

$$W_{neto} = Q_{entrada} - Q_{salida}$$

$$W_{neto} = W_{turbina,salida} - W_{Bomba,entrada}$$

*Q* : calor

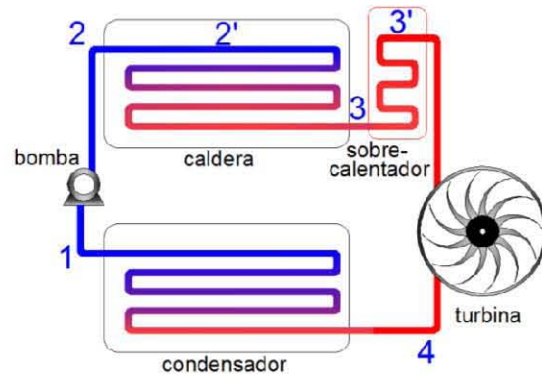
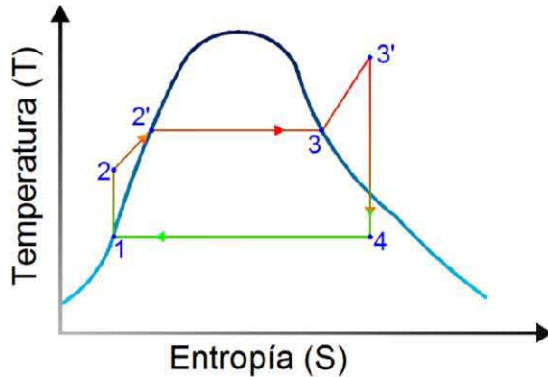
*W*: trabajo

*h*: entalpía

$\eta$ : eficiencia térmica

Uno de los inconvenientes del ciclo Rankine es que el vapor sale bastante húmedo de la caldera, para lo cual es útil el uso de un deshidratador o implementar una etapa de sobrecalentamiento.

Con esta adecuación se le conoce como ciclo Rankine con sobrecalentamiento o ciclo de Hirn. Este ciclo fue propuesto por Gustave Hirn<sup>17</sup> en 1855 [Renvoizé, 2014].



La diferencia más notable entre los dos ciclos es la etapa en la que el fluido, como vapor saturado, se lleva a un sobrecalentamiento. Aquí el vapor eleva su temperatura a presión constante, perdiendo humedad hasta llegar a un estado de vapor sobrecalentado, esto aumenta el trabajo transferido a la turbina, haciendo del ciclo, un ciclo más eficiente.

Sobrecalentar el vapor provocará un aumento en el calor de entrada por lo tanto la eficiencia del ciclo Rankine se ve mejorada.

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}}$$

Cuando:

$$Q_{\text{entrada}} \text{ aumenta}$$

Provoca que:

$$\frac{Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}} \text{ disminuye}$$

Por lo tanto:

$$\eta_{\text{térmico}} \approx 1$$

Otros ciclos propuestos para las plantas OTEC son el ciclo Kalina y el ciclo Uehara.

El ciclo Kalina, ideado en 1987 por el ingeniero ruso Alexander Kalina, consiste en un ciclo Rankine mejorado el cual usa como fluido de trabajo una mezcla de amoníaco y agua con relación de 3 a 2 (60% NH<sub>3</sub> y 40% H<sub>2</sub>O). Debido a que el amoníaco posee un punto de ebullición más bajo, éste tendrá una mayor eficiencia al contacto con temperaturas más bajas como las de la superficie del océano, esto también reduce la cantidad de agua fría necesaria para el condensador,

<sup>17</sup> Gustave Adolphe Hirn (21 de agosto 1815 – 14 de enero 1890). Físico francés dedicado a investigaciones termodinámicas e inventor de diferentes máquinas de vapor.

por lo tanto, la tubería para la extracción de agua fría es de menor diámetro y la bomba empleada para tal fin también es de menor potencia. Otras diferencias del ciclo Kalina con respecto al ciclo Rankine son:

- El punto de vaporización de la mezcla de trabajo es variable, al contrario del fluido de trabajo en el sistema Rankine.
- Las propiedades térmicas de la mezcla pueden ser alteradas a voluntad simplemente con variar la relación amoníaco-agua. Esto permite cambiar la temperatura sin modificar el contenido de calor.

El ciclo Uehara, ideado en 1994 por los ingenieros japoneses Haruo Uehara y Yasuyuki Ikegami, consiste en una mejora al ciclo Kalina adicionando una turbina, un calentador y un condensador. El ciclo consiste en dividir la mezcla calentada en  $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$  vaporizados por una parte y otra parte de  $\text{NH}_2$  como líquido. La mezcla vaporizada se envía a una turbina para hacerla girar y que ésta, a su vez, haga girar a un generador eléctrico acoplado a ella. A la salida de la turbina parte del vapor se lleva a un calentador mientras que el resto pasa a una segunda turbina. El amoníaco líquido absorbe el vapor de la segunda turbina, se enfría y se reenvía para comenzar el ciclo.

Si se importara el ciclo utilizado dentro de una planta de generación eléctrica del tipo OTEC, un diagrama de bloques que nos muestra su funcionamiento general se muestra en la figura 2.18.

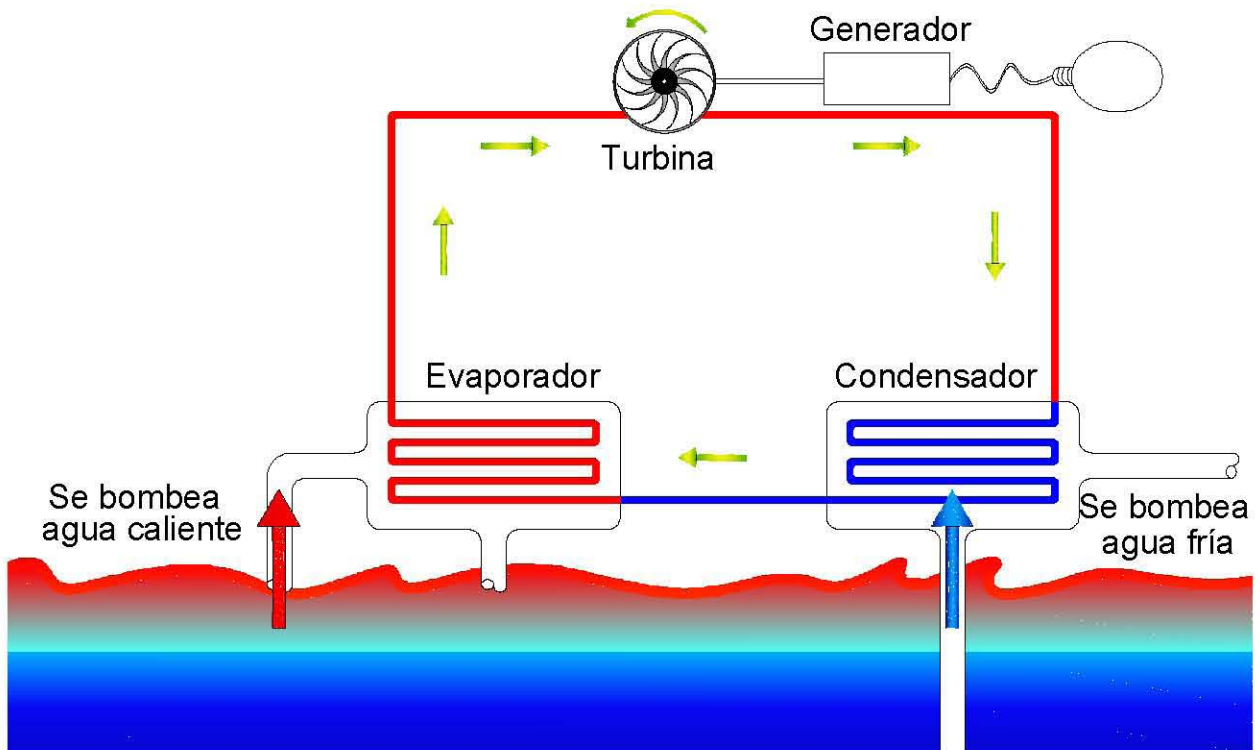


Figura 2.18 Esquema del funcionamiento de una planta OTEC.

## 2.3.2 Ciclos y tipo de planta

Además de los diferentes ciclos que se pueden implementar en el diseño de una planta OTEC, existen 3 tipos diferentes de variantes del ciclo Rankine, ciclo abierto, ciclo cerrado y ciclo híbrido.

### CICLO ABIERTO

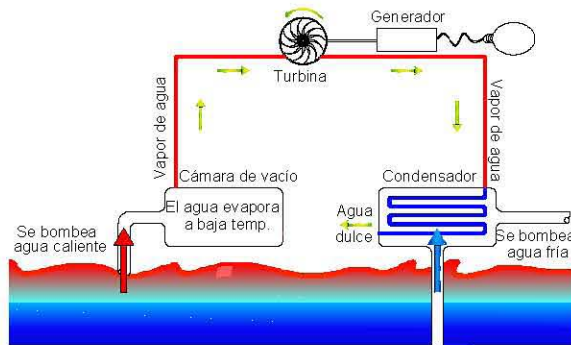


Figura 2.19 Esquema ciclo abierto OTEC.

En este tipo de sistema el fluido de trabajo utilizado es el agua cálida del océano, la cual es introducida en una cámara de baja presión, idealmente al vacío para que el agua llegue a su punto de ebullición a la temperatura que posea<sup>18</sup> al momento de ingresar a dicha cámara. El vapor generado en esta cámara se direcciona hacia la turbina para hacerla girar. Este vapor es condensado con agua fría de la profundidad del océano, el resultado de esta condensación es agua dulce ya que el agua cálida ha perdido las sales disueltas en ella al momento de la evaporación, esta agua dulce es potable. El agua no vuelve a su lugar de inicio ya que el ciclo no se cierra.

### CICLO CERRADO

En este tipo de sistema el fluido de trabajo es un gas, el cual es vaporizado dentro de un evaporador, este evaporador se calienta gracias al suministro de agua oceánica cálida que se le proporciona mediante una bomba hidráulica. El fluido, en estado de vapor, es dirigido hacia la turbina para hacerla rotar y que ésta, a su vez, haga rotar al generador eléctrico. Después de haber accionado a la turbina, el vapor, es enfriado dentro de un condensador que se encuentra en contacto con agua oceánica fría, proporcionada de la misma manera que el agua cálida. En este ciclo el fluido de trabajo se encuentra aislado y únicamente se mueve a lo largo de un circuito. Ya que las temperaturas del evaporador y condensador son relativamente bajas, la presión de vapor del fluido de trabajo debe ser alta con las temperaturas de trabajo.

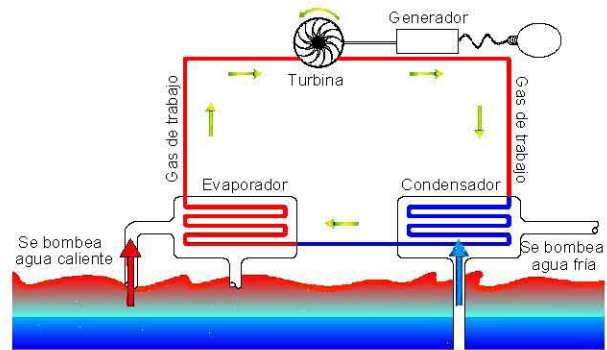


Figura 2.20 Esquema ciclo cerrado OTEC.

### CICLO HÍBRIDO

Como se puede suponer, un sistema híbrido combina las características de funcionamiento de los dos ciclos. Primeramente, el agua oceánica cálida ingresa a la cámara de baja presión para ser evaporada, de forma similar al proceso del ciclo abierto, con la diferencia de que en este caso el calor del vapor obtenido se utiliza para evaporar el fluido de trabajo, de bajo punto de ebullición, el cual circula dentro de un ciclo cerrado.

<sup>18</sup> El punto de ebullición de los fluidos se alcanza al momento de suministrarles calor y llevarlos a una temperatura a la cual sus moléculas pueden vencer la presión a la que están sometidas, generalmente es la presión atmosférica. Al momento de reducir la presión, la temperatura de su punto de ebullición también baja.



El uso de un sistema híbrido nos proporciona tanto las ventajas como las desventajas de los dos sistemas. Las ventajas al utilizar un sistema abierto son:

- El uso del agua oceánica como fluido de trabajo permite emplear materiales más baratos.
- Al terminar el ciclo se produce agua dulce.
- Requiere menores caudales de agua.

Algunos inconvenientes del ciclo abierto son:

- Los efectos corrosivos del agua oceánica cálida en la turbina.
- Se necesita una turbina más grande que en el ciclo cerrado, ya que en el ciclo abierto la presión del fluido es menor.

Por su parte, un sistema híbrido tendrá a su favor la ventaja de generar electricidad y también agua dulce potable.

## **ONSHORE**

Las plantas OTEC tipo onshore o sobre tierra firme, son las que se construyen sobre la costa.

Algunas ventajas para este tipo de planta serían:

- Mayor estabilidad en el terreno
- Se pueden proteger fácilmente ante huracanes
- Fácil acceso a la planta
- Cercanía de la planta para mantenimiento
- Cercanía de la planta a la red de distribución eléctrica

Algunas desventajas serían:

- Erosión del sitio
- Impacto ambiental
- Gran inversión en tuberías

## **OFFSHORE**

Las plantas OTEC tipo offshore o mar adentro, son las que se construyen sobre fuera de la costa y sobre el océano.

Algunas ventajas para este tipo de planta serían:

- Menor inversión en tubería
- Descarga alejada de la costa

Las principales desventajas serían:

- Mayor inversión en el transporte de energía, aunque existe la opción de generar hidrogeno y evitar las largas líneas de transmisión eléctrica.
- Planta alejada para su mantenimiento
- Son más vulnerables ante huracanes
- Su plataforma debe ser tan robusta como la petrolera
- Costo de operación más elevados

## 2.4. Sistemas y métodos de control

Los sistemas de control son un conjunto de dispositivos electrónicos y mecánicos que interaccionan entre ellos de manera previamente estipulada por el usuario, de manera tal que le permitirá conocer en todo momento el comportamiento de las variables de interés que se presentan dentro de un proceso. Además de poder conocer el comportamiento de estas variables, podrá también tener la capacidad de intervenir en el proceso de manera indirecta para modificarlas. Podrá administrarlas, ordenarlas, dirigir y regular su comportamiento para reducir las probabilidades de que se presenten fallas, y obtener los resultados deseados.

Según su estructura, estos sistemas pueden tener dos diferentes métodos de funcionamiento. Control por lazo abierto y control por lazo cerrado.

### LAZO ABIERTO

Un sistema de control cuya estructura de funcionamiento se dice que está en tipo de lazo abierto, es todo aquel sistema en el cual la variable de salida o respuesta del proceso en cuestión, es estudiada, controlada o modificada por el usuario, sin necesidad de tener en cuenta las condiciones de variable de entrada. Aunque la salida obtenida en estos sistemas depende directamente de la entrada, no será necesaria ninguna clase de comparación contra alguna referencia, ni será necesaria toma de decisiones.

Un ejemplo de sistema en lazo abierto aplicado al proceso en una planta OTEC, sería el accionamiento de las bombas de extracción de agua. En esta parte del proceso únicamente se requiere de la puesta en marcha y paro de la bomba, sin necesidad de considerar las condiciones de temperatura, turbidez o cualquier otra variable en las cuales se encuentra el agua.

Un diagrama de bloques para ejemplificar este proceso se muestra en la figura 2.21.

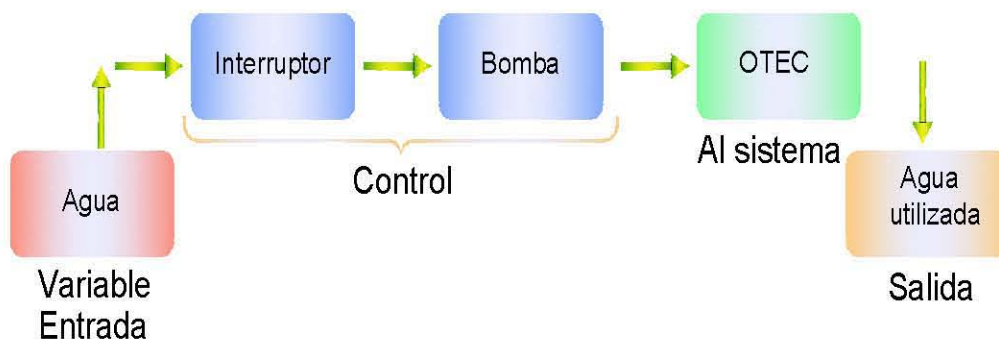


Figura 2.21 Diagrama de bloques de un sistema configurado como lazo abierto.

## LAZO CERRADO

Un sistema de control cuya estructura de funcionamiento se dice que está en tipo de lazo cerrado, es todo aquel sistema en el cual la variable de salida o respuesta del proceso en cuestión, es estudiada, controlada o modificada por el usuario, tomando en cuenta la condición de la variable o variables de entrada para compararlas con un valor de referencia.

Este tipo de funcionamiento requiere de una etapa adicional en la cual se deben realizar los cálculos y comparaciones necesarios para tomar las decisiones pertinentes para el buen funcionamiento del sistema. Esta etapa adicional toma una muestra de la salida, a esta muestra se le realizan las comparaciones necesarias para la toma de decisiones. Esta etapa se conoce con el nombre de realimentación.

Un ejemplo de sistema en lazo cerrado aplicado al proceso de una planta OTEC, sería el accionamiento de las bombas de extracción de agua. En esta parte del proceso se requiere de la puesta en marcha y paro de la bomba, considerando un determinado nivel de agua.

Un diagrama de bloques para ejemplificar este proceso se muestra en la figura 2.22.

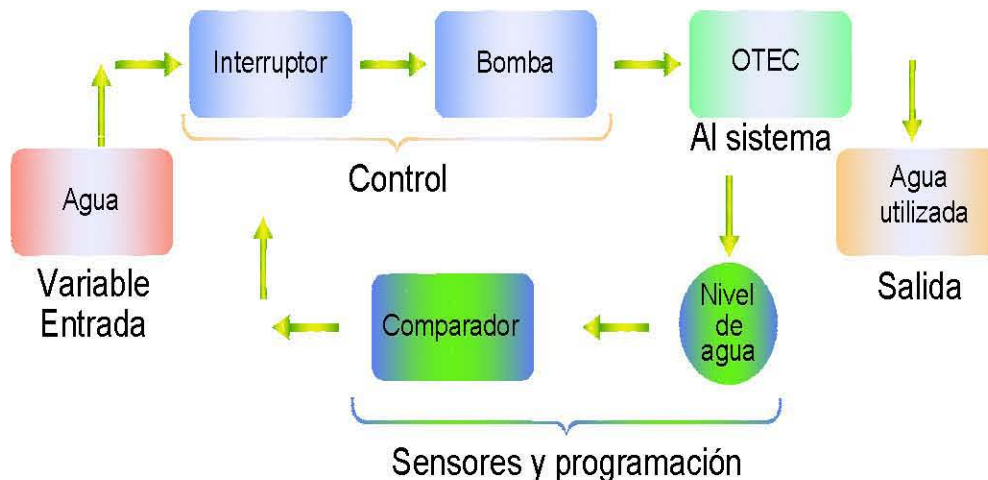


Figura 2.22 Diagrama de bloques de un sistema configurado como lazo cerrado.

## 2.5. Parámetros de control y monitoreo

Dentro de cualquier proceso existen variables que deben ser bien identificadas y estudiadas a detalle para tener un correcto funcionamiento alejado de las fallas que pudieran causar accidentes.

Una planta OTEC tiene parámetros que deben ser controlados y monitoreados tanto dentro del proceso como dentro de la planta y su entorno.

## 2.5.1 Dentro de la planta

El parámetro de mayor interés dentro de una planta OTEC será la temperatura del agua caliente y la temperatura del agua fría. Con estos dos valores se podrá inferir el probable valor que tendrá el flujo del refrigerante de trabajo.

La presión es otro parámetro que debemos conocer. Debido a los altos costos de sensores de presión, en este trabajo se va a calcular la presión del refrigerante haciendo uso de la ecuación del gas ideal, la segunda ley de Gay-Lussac<sup>19</sup> y la ecuación para calcular el número de moles del refrigerante.

La ley de los gases ideales puede ser resumida como la proporcionalidad directa entre la energía cinética de un gas y su temperatura. El estado de una determinada porción de gas se determina por su presión, volumen, temperatura y número de moles.

En términos matemáticos:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde:

*P: Presión absoluta*

*V: Volumen*

*n: Número de moles de gas*

*R: Constante universal de los gases ideales*

*T: Temperatura absoluta*

La segunda ley de Gay-Lussac enuncia que un gas se expande proporcionalmente a su temperatura si la presión se mantiene constante, y que su presión aumenta proporcionalmente a la temperatura si el volumen se mantiene constante.

En términos matemáticos:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{cuando} \quad P = \text{constante}$$

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad \text{cuando} \quad V = \text{constante}$$

Donde:

*V: volumen*

*T: temperatura*

*P: presión*

Por otro lado, sabemos que, el número de moles de un gas es igual a la masa dividida entre su masa molar.

---

<sup>19</sup> Louis Joseph Gay\_Lussac (6 de diciembre de 1778 – 9 de mayo de 1850). Químico y físico francés conocido por su contribución a las leyes de los gases.

En términos matemáticos:

$$n = \frac{m}{M}$$

Donde:

*n*: número de moles

*m*: masa del gas

*M*: masa molar del gas

## 2.5.2 En torno a la planta

Los parámetros oceanográficos que pudieran ser monitoreados en torno a una planta OTEC son diversos. Se pueden mencionar algunos parámetros de interés que podrían ser monitoreados alrededor de una planta OTEC tipo offshore; en el ámbito de las corrientes, podría monitorearse su velocidad y dirección cercana a la planta, el oleaje podría ser para detectar perturbaciones, otro punto podría ser la temperatura para ubicar la mejor zona de descarga.

En esta investigación se trató de desarrollar en lo posible algunos instrumentos para el monitoreo de dichos parámetros.

# CAPÍTULO 3



### 3. PROTOTIPO DE PLANTA OTEC

Dentro del marco experimental, se realizó un primer prototipo en el LTEO con fines didácticos y demostrativos, en



Figura 3.1 Primer prototipo de planta OTEC de laboratorio para este proyecto.



Figura 3.2 Pantalla de control y monitoreo.

el cual se representó cada una de las etapas en funcionamiento de una planta OTEC. Este primer prototipo fue de gran utilidad ya que con éste se pudo desarrollar, en gran medida, la parte del control y la parte de monitoreo, así también se establecieron las ubicaciones de los puntos de interés, tanto para control como para monitoreo. En este primer prototipo, las etapas de condensación y evaporación, se representaron con jeringas convencionales de 60 ml. dentro de las cuales se introdujo un serpentín de manguera de plástico, quedando así, un modelo representativo de intercambiadores de calor. El bombeo de agua, tanto agua fría como agua caliente hacia los intercambiadores de calor, se realizó con la ayuda de un par de bombas para pecera de 10 watts de potencia, ubicadas de manera estratégica para no ser visibles, dentro de unos recipientes plásticos que sirvieron a su vez para ejemplificar de manera visual una columna de agua. Debido a que el fluido de trabajo para este primer prototipo fue agua potable, se tuvo la necesidad de implementar una etapa de evaporación real para el agua; para ello se utilizó una máquina de vapor a base de una caldera con capacidad para 450 ml y con una potencia de 700 watts. A la salida del vapor de la caldera se instaló una turbina tipo Pelton cuya polea se acopló al eje de un motor de corriente directa, conectado de tal manera que su funcionamiento fuera la de un generador. Se midió que la capacidad de generación eléctrica del motor llegó a alcanzar los 25 volts. La figura 3.1 muestra este primer prototipo.

La apertura y cierre de la válvula liberadora del vapor fue realizada con el accionamiento de un servomotor modelo MG995 de la compañía TOWER PRO<sup>20</sup>. El voltaje generado, con carga, se cuantificó con el uso de un voltímetro digital y se detectó mediante un LED conectado al generador. Y la temperatura a la entrada de la turbina se medía con el uso de un sensor de temperatura modelo

<sup>20</sup> Especificaciones técnicas en ANEXO I

LM35 de la compañía TEXAS INSTRUMENTS<sup>21</sup>. En la figura 3.2 se muestra la interfaz gráfica de una aplicación desarrollada con la ayuda de la plataforma web de programación MIT APP INVENTOR 2, compatible con dispositivos Android<sup>22</sup>; la función de esta aplicación fue monitorear el voltaje generado y la temperatura a la entrada de la turbina, accionar las bombas de agua fría y agua caliente, abrir y cerrar la válvula liberadora de vapor y accionar el calentamiento de la caldera. Para toda la comunicación, tanto de monitoreo como de control entre nuestro dispositivo Android y los sensores y mecanismos del prototipo, se utilizaron recursos ARDUINO<sup>23</sup> y la transferencia fue de manera inalámbrica mediante el módulo bluetooth modelo HC-05<sup>24</sup>.

### 3.1. Representación de las etapas

Una vez que se comprobó el buen funcionamiento, tanto de los sensores, motores, bombas y la comunicación circuito/tableta, se decidió que la parte de electrónica estaba lista para su funcionamiento bajo cualquier circunstancia, motivo por el cual el siguiente paso sería reemplazar el primer prototipo por un modelo más aproximado a la realidad. Se sustituyeron completamente los elementos del primer prototipo para crear un modelo cuyo funcionamiento sea semejante al de una planta OTEC real. La caldera y las jeringas fueron sustituidas por un condensador tipo “tubo de cobre-aleta de aluminio” y por un evaporador tipo “tubo aluminio-aleta aluminio”<sup>25</sup>. Estos elementos se muestran en las figuras 3.3 y 3.4 respectivamente. Los dos elementos se pusieron en contacto con agua dentro de un par de recipientes plásticos.

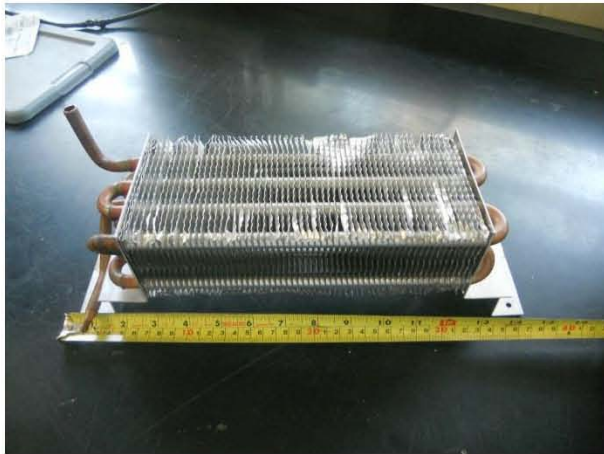


Figura 3.3 Condensador tubo-aleta.



Figura 3.4 Evaporador tubo-aleta.

La parte de la turbina y el generador se sustituyeron por un flujómetro constituido por un cuerpo de plástico, un rotor de agua y un sensor de efecto Hall. Este flujómetro<sup>26</sup> se puede observar en la figura 3.5. Así también, para este modelo fue posible trabajar con el refrigerante R-134a<sup>27</sup> y ya no con el agua potable. Este gas se muestra en la figura 3.6.

<sup>21</sup> Especificaciones técnicas en ANEXO I

<sup>22</sup> Códigos en ANEXO II

<sup>23</sup> Códigos y circuitos en ANEXO II

<sup>24</sup> Especificaciones técnicas en ANEXO I

<sup>25</sup> Características en ANEXO I

<sup>26</sup> Características en ANEXO I

<sup>27</sup> Curvas de respuesta en ANEXO I





Figura 3.5 Fluómetro empleado.



Figura 3.6 Refrigerante R-134a.

El tipo de planta OTEC por el cual se optó para la simulación en laboratorio, fue un sistema de ciclo cerrado. El circuito se completó con tubería de cobre y tubería galvanizada en diferentes diámetros. Para elevar la temperatura del agua en contacto con el evaporador, se utilizó una resistencia eléctrica sumergible. Para bajar la temperatura del agua en contacto con el condensador se utilizó el congelador de laboratorio y una bomba de pecera para reciclar el agua y, con esto, mantener su baja temperatura. En la figura 3.7 se muestra la simulación completa de la planta OTEC.

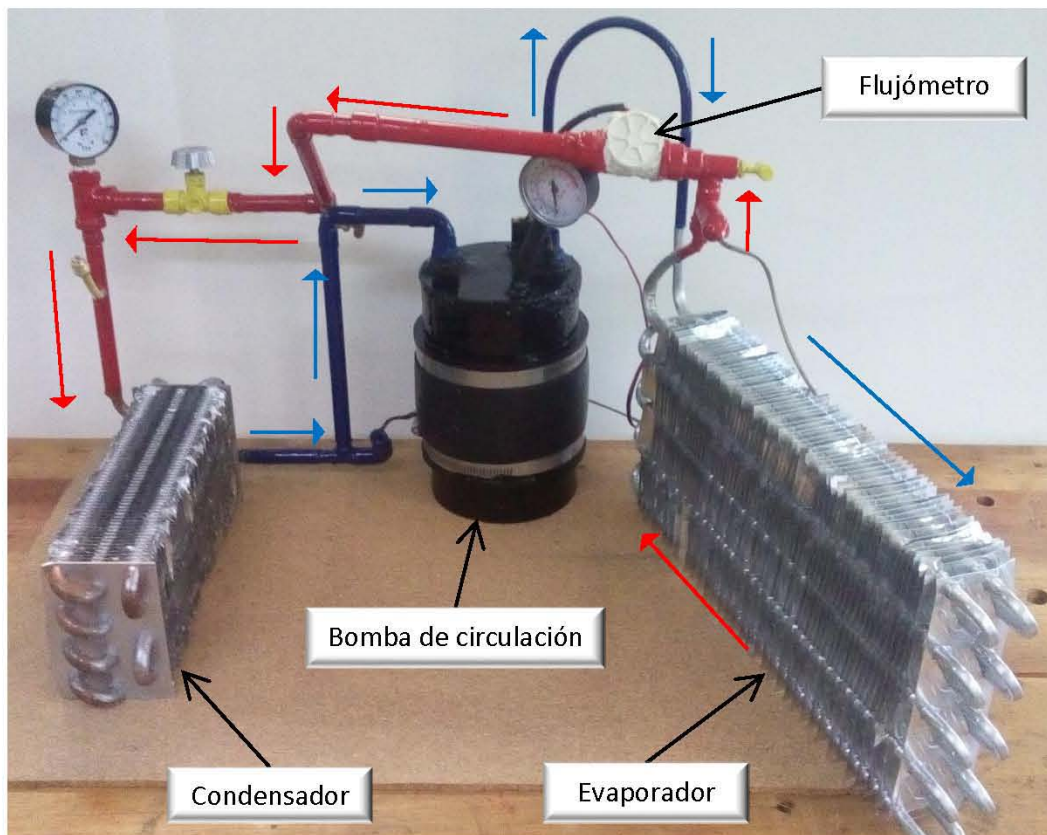


Figura 3.7 Segundo prototipo de planta OTEC de laboratorio para este proyecto.

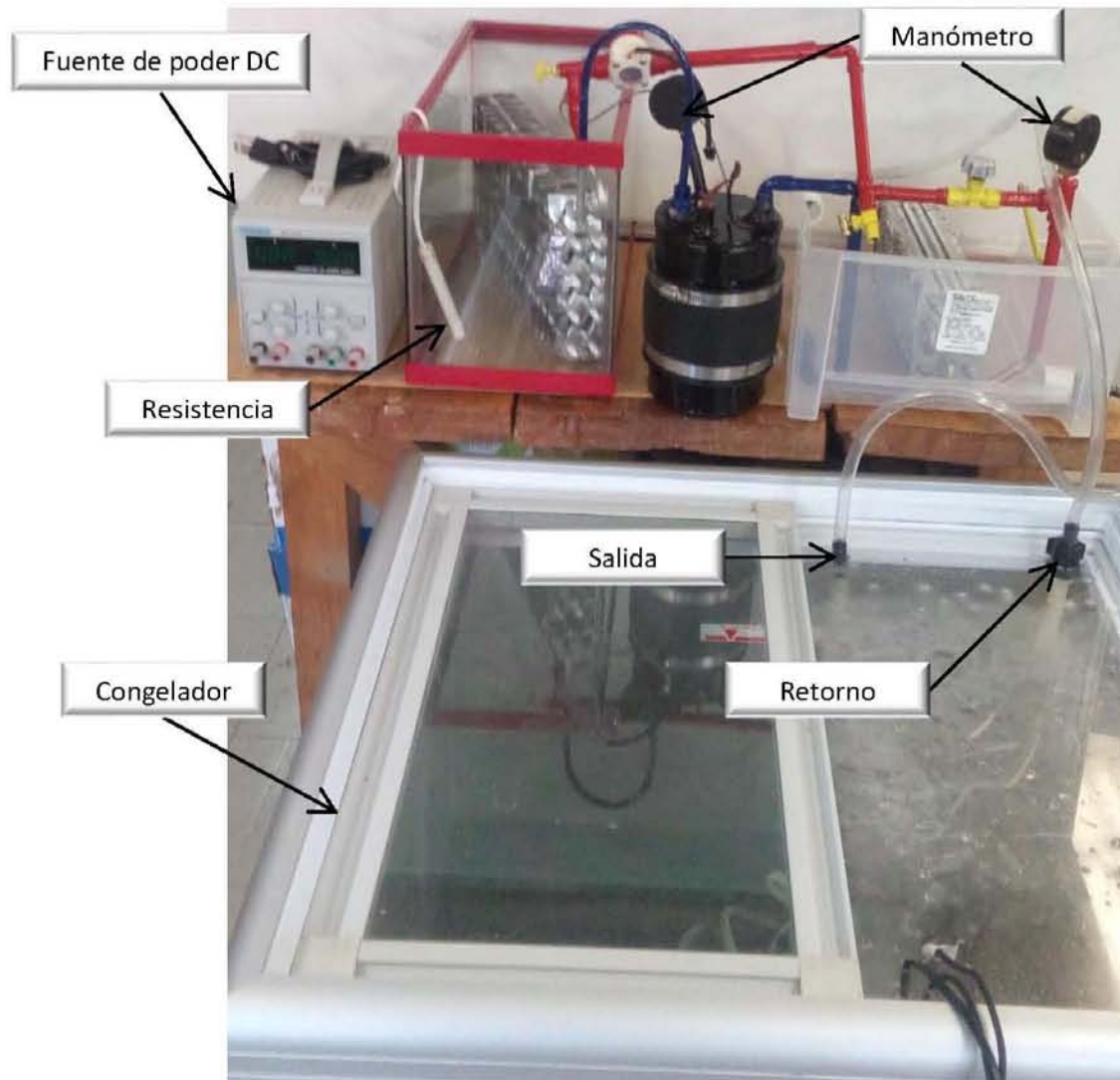


Figura 3.8 Elementos complementarios del segundo prototipo de planta OTEC de laboratorio para este proyecto.

Para el monitoreo de la temperatura se utilizaron sensores termopar tipo J y termopar tipo K, así como el lenguaje Arduino y APPInventor para la comunicación y control.

### 3.2. Ubicación de los puntos de interés

**A**l tratarse de una planta OTEC, la cual utiliza como fuente de energía el gradiente térmico del mar, es la temperatura una de las variables que más nos interesa para monitorear y conocerla en todo momento y de manera constante, ya que es el gradiente térmico el que determinará la velocidad de flujo del gas de trabajo y con ello la potencia de generación.

El prototipo final que se realizó dentro de laboratorio, se muestra en la figura 3.7 y 3.8. A este prototipo se le incorporaron diferentes sensores para conocer su comportamiento.

Los puntos en los que se implementaron los sensores termopar tipo J para conocer las temperaturas en el sistema fueron:

- Agua fría dentro del congelador. Esto con el fin de conocer la mínima temperatura que se le aplicará al condensador.
- Agua fría a la entrada del congelador. Esto con el fin de conocer la temperatura con la cual vuelve el agua al interior del congelador. Haciendo uso de estas dos temperaturas, se conoce la temperatura aproximada<sup>28</sup> que el agua fría ha ganado al hacer contacto con el condensador.
- Agua caliente en contacto con el evaporador. Esto con el fin de conocer la temperatura que se le aplicará al evaporador. La diferencia entre la temperatura al interior del congelador y la temperatura en el evaporador nos dará el gradiente térmico con el cual estará trabajando el sistema OTEC.

Estos puntos se muestran a detalle en la figura 3.9.



*Figura 3.9 Termopar tipo J dentro del congelador (izquierda), termopar tipo J en el retorno de agua al congelador (centro), termopar tipo J en la zona del evaporador (derecha).*

El proveedor de los sensores termopar tipo J ofrece una respuesta lineal de dichos elementos, las tablas completas de respuesta se pueden consultar en el anexo I. Para fines de este trabajo solo se utilizó el rango de 0°C a 80°C para corroborar su comportamiento. Para este rango de temperaturas, la curva de respuesta se muestra en la figura 3.10.

---

<sup>28</sup> Se dice que es aproximada ya que el sistema está en contacto con la temperatura ambiente. Con este contacto existe intercambio de temperatura de acuerdo a la ley cero de la termodinámica, o ley del equilibrio térmico. Para los fines de esta investigación resulta innecesario considerar dicho intercambio.

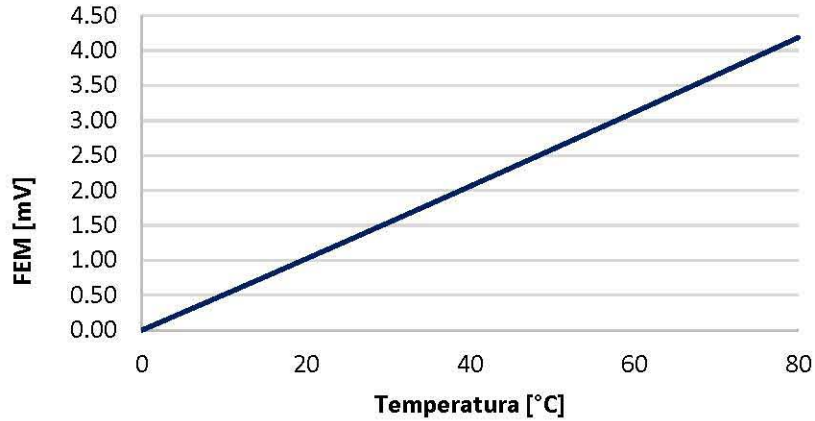


Figura 3.10 Respuesta típica de termopar tipo J.

Utilizando la información de las tablas para este tipo de termopar dentro del rango especificado, se empleó el método de mínimos cuadrados para obtener la ecuación característica de estos elementos. Para este método es necesario conocer la pendiente y la intersección con el eje y, aunque es claro que este último valor es tan próximo a cero que podría despreciarse. El eje  $x$  corresponde a la temperatura, y el eje  $y$  a la respuesta. La letra  $n$  es el número de valores con los que se trabajará. La letra  $m$  representa la pendiente.

$$m = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

Donde:

$$\sum xy = 9027.79$$

$$\sum x = 3240$$

$$\sum y = 167.72$$

$$\sum x^2 = 173880$$

$$(\sum x)^2 = 10497600$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación de la pendiente obtenemos:

$$m = \frac{9027.79 - \frac{(3240)(167.72)}{81}}{173880 - \frac{10497600}{81}}$$

$$m = 0.0524$$

La intersección "b" con el eje y se calcula con  $b = \bar{x} - m \bar{y}$

La media de las temperaturas es  $\bar{x} = 40$

La media de la respuesta es igual a  $\bar{y} = 2.07$

Sustituyendo estos valores  $b = 2.07 - (0.0524)(40)$

$$b = -0.0244$$

Finalmente, para obtener la ecuación de la línea que mejor representa el comportamiento ideal del termopar tipo J se calcula con la ecuación general de la recta:

$$y = mx + b$$

$$y = 0.0524x - 0.0244$$

La calibración de cada termopar que se utilizó en el laboratorio tuvo el siguiente procedimiento:

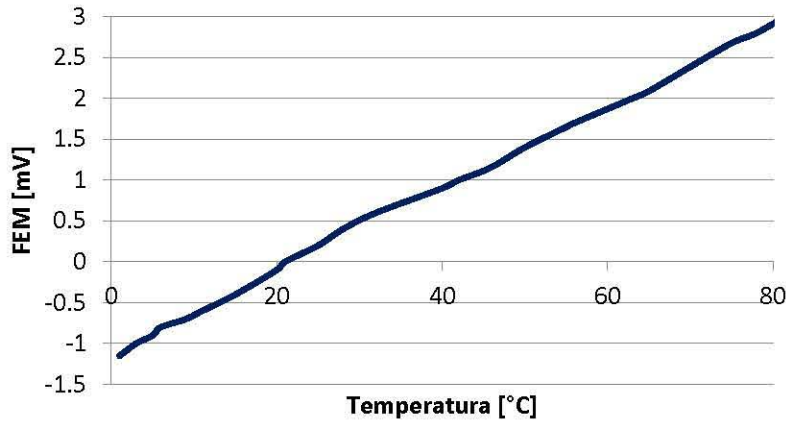
- Cada termopar se puso en contacto con agua a diferentes temperaturas.
- La temperatura se midió con tres termómetros de mercurio, un termómetro industrial y un termómetro digital, el promedio de estas 5 temperaturas se tomó como la temperatura patrón.
- La respuesta en milivolts del termopar tipo J ante esta temperatura, se midió con dos voltímetros digitales. El promedio de estas medidas fue considerado como la respuesta del termopar.

Después de varias lecturas, la tabla de respuesta de cada termopar se muestra a continuación. Cabe mencionar que solo se necesitaran 3 termopares. El termopar "D" es una reserva en caso de que alguno falle, pero es necesario conocer su comportamiento.

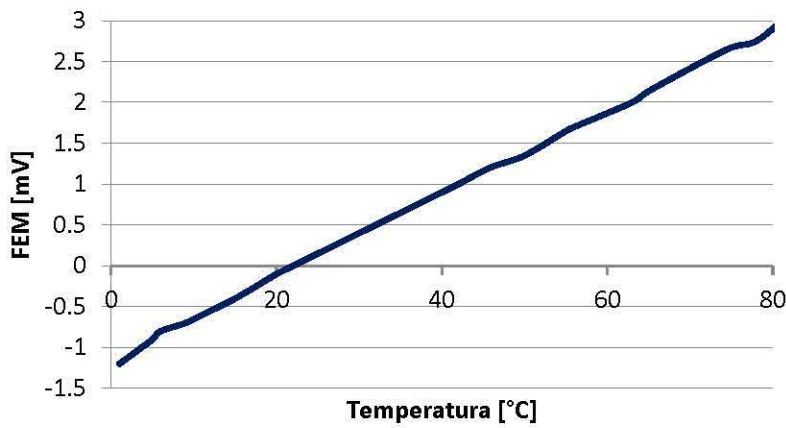
| Temperatura<br>[°C] | Respuesta del termopar [mV] |       |       |       |
|---------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|                     | A                           | B     | C     | D     |
| 1                   | -1.15                       | -1.2  | -1.1  | -1.2  |
| 3                   | -1                          | -1.05 | -1    | -1.05 |
| 5                   | -0.9                        | -0.9  | -0.9  | -0.9  |
| 6                   | -0.8                        | -0.8  | -0.8  | -0.8  |
| 9                   | -0.7                        | -0.7  | -0.7  | -0.7  |
| 11                  | -0.6                        | -0.6  | -0.6  | -0.6  |
| 15                  | -0.4                        | -0.4  | -0.4  | -0.4  |
| 20                  | -0.1                        | -0.1  | -0.1  | -0.1  |
| 21                  | 0                           | -0.05 | -0.05 | 0     |
| 25                  | 0.2                         | 0.15  | 0.15  | 0.1   |
| 28                  | 0.4                         | 0.3   | 0.3   | 0.4   |
| 32                  | 0.6                         | 0.5   | 0.5   | 0.6   |
| 40                  | 0.9                         | 0.9   | 0.9   | 0.9   |
| 42                  | 1                           | 1     | 1     | 1     |
| 45.8                | 1.15                        | 1.2   | 1.15  | 1.15  |
| 50                  | 1.4                         | 1.35  | 1.35  | 1.35  |
| 55                  | 1.65                        | 1.65  | 1.65  | 1.65  |
| 56                  | 1.7                         | 1.7   | 1.65  | 1.65  |
| 63                  | 2                           | 2     | 2     | 2     |
| 65.2                | 2.1                         | 2.15  | 2.1   | 2.1   |
| 74.5                | 2.65                        | 2.65  | 2.6   | 2.6   |
| 78                  | 2.8                         | 2.75  | 2.75  | 2.75  |
| 83.6                | 3.1                         | 3.15  | 3.15  | 3.15  |
| 90.2                | 3.3                         | 3.2   | 3.3   | 3.3   |

Tabla 1.- Respuesta de cada termopar tipo J utilizado.

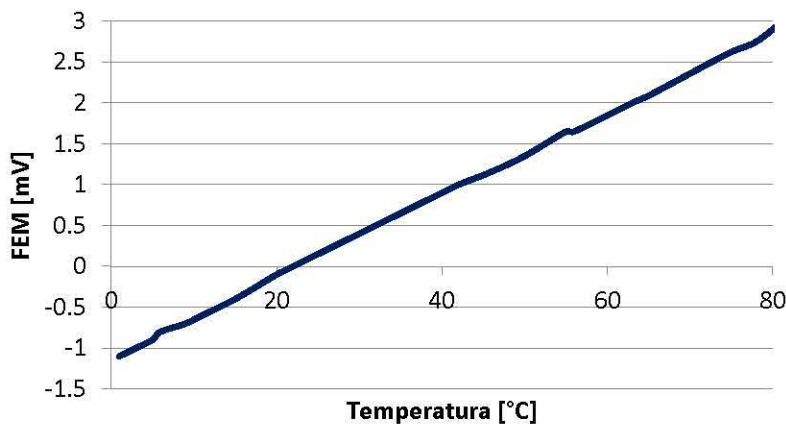
Aplicando el mismo método de mínimos cuadrados para cada termopar se obtuvo la ecuación de cada termopar tipo J. Su curva de respuesta se muestra en la figura 3.11.



$$y_A = 0.0501x_A - 1.113$$



$$y_B = 0.0502x_B - 1.1384$$



$$y_C = 0.05x_C - 1.1261$$

Figura 3.11 Respuesta experimental del termopar A, B y C, con su ecuación lineal.

Comparando las curvas de las ecuaciones lineales obtenidas mediante mínimos cuadrados de cada termopar contra su curva ideal se obtienen los resultados gráficos mostrados en la figura 3.12.

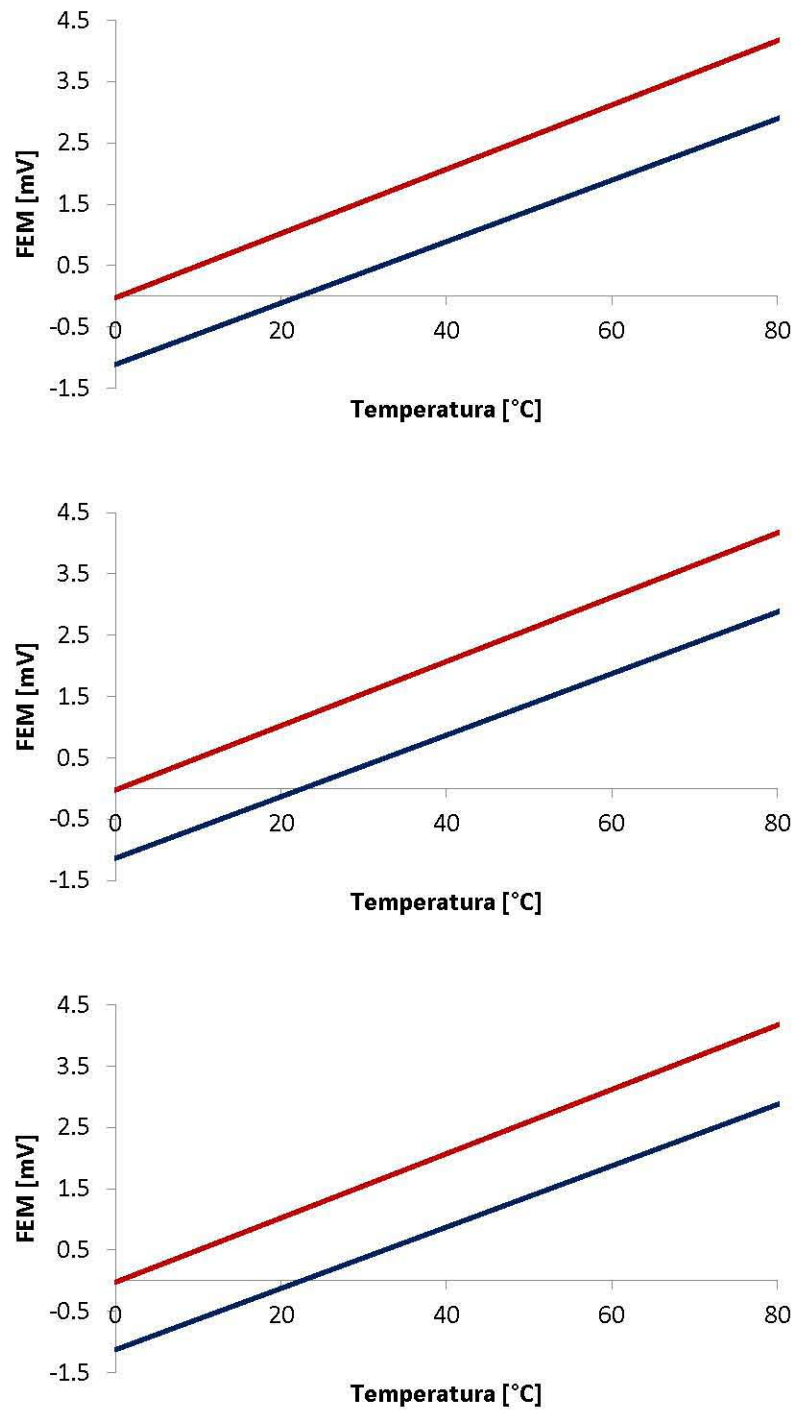


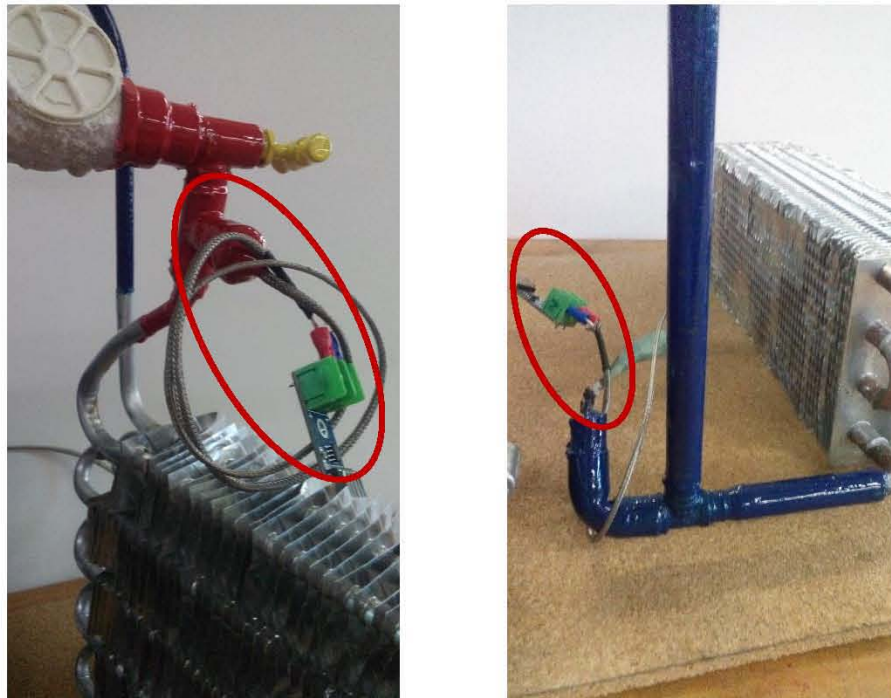
Figura 3.12 Respuesta experimental del termopar A, B y C, ordenados de arriba hacia abajo, curva ideal en rojo, curva de respuesta en azul.

Se puede apreciar que la respuesta se puede considerar lineal, pero desplazada hacia abajo. Esto se debe a que en las mediciones de temperatura que el proveedor realizó, la temperatura de la junta de referencia<sup>29</sup> fue de 0°C, por otro lado, la temperatura de la junta de referencia que se tomó en el laboratorio, fue la temperatura ambiente que osciló entre los 21°C y los 22°C.

Los puntos en los que se implementaron los sensores termopar tipo K para conocer las temperaturas en el sistema fueron:

- A la salida del evaporador. Esto con el fin de conocer la temperatura exacta a la cual salía el gas de trabajo del evaporador.
- A la salida del condensador. Esto con el fin de conocer la temperatura exacta a la cual salía el gas de trabajo del condensador. Empleando estas dos temperaturas se pueden realizar los cálculos pertinentes para conocer las pérdidas y ganancias del sistema a lo largo de sus etapas.

Estos puntos se muestran a detalle en la figura 3.13.



*Figura 3.13 Termopar tipo K a la salida del evaporador (izquierda), termopar tipo K a la salida del condensador (derecha).*

El proveedor de los sensores termopar tipo K ofrece una respuesta lineal de dichos elementos, las tablas completas de respuesta se pueden consultar en el anexo I. Para fines de este trabajo solo se utilizó el rango de 0°C a 80°C. Para este rango de temperaturas, la curva de respuesta se muestra en la figura 3.14.

---

<sup>29</sup> Un termopar tiene 2 juntas, la primera está sometida a la temperatura que se quiere medir y se llama junta de medición, la segunda junta es la unión con el instrumento sometida a una temperatura conocida, a esta se le conoce como la junta de referencia.



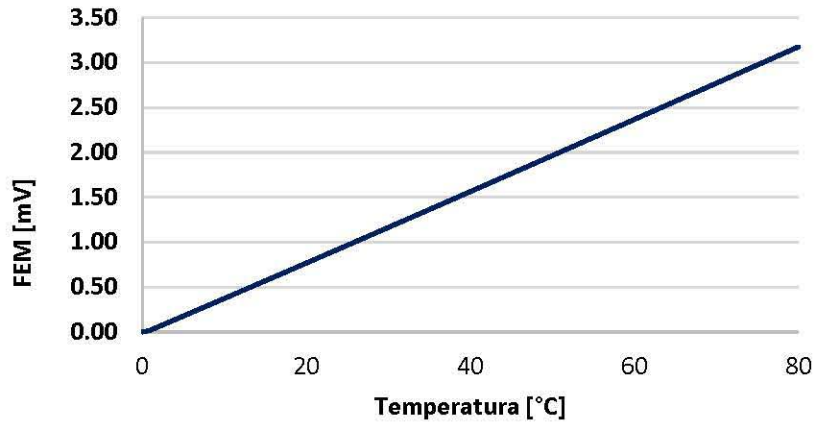


Figura 3.14 Respuesta típica de termopar tipo K.

La ecuación característica para el termopar tipo K se calculó de manera similar que, para el termopar tipo J, mediante el método de mínimos cuadrados. Utilizando dicho método y la ecuación de la recta se llega a la ecuación característica del termopar tipo K.

$$y = 0.0399x - 0.0285$$

Haciendo uso de la librería de Arduino para este termopar tipo K, se realizó la calibración utilizando el mismo procedimiento anterior. Los resultados se muestran en la tabla siguiente.

| Temperatura<br>[°C] | Temperatura de termopar [°C] |      |
|---------------------|------------------------------|------|
|                     | "K1"                         | "K2" |
| 0                   | 0                            | 0    |
| 6                   | 2                            | 2    |
| 11                  | 7                            | 7    |
| 15                  | 11.75                        | 12   |
| 19                  | 18                           | 18.5 |
| 23                  | 24                           | 23   |
| 25                  | 26.5                         | 27   |
| 27                  | 30                           | 30   |
| 30                  | 33                           | 34   |
| 34                  | 40.5                         | 40   |
| 42                  | 52                           | 52   |
| 47                  | 60.75                        | 60.5 |
| 52                  | 68.5                         | 68.5 |
| 55                  | 72                           | 72   |
| 58                  | 77                           | 77   |
| 63                  | 85.5                         | 85   |
| 67                  | 92                           | 92   |
| 70                  | 97                           | 97   |
| 73                  | 101                          | 101  |
| 81                  | 114                          | 113  |
| 89                  | 128                          | 128  |

Tabla 2.- Respuesta de cada termopar tipo K utilizado.

Se puede apreciar que existe una falta de exactitud, pero no de precisión por parte del termopar-librería al momento de hacer las mediciones con respecto a las medidas de los termómetros.

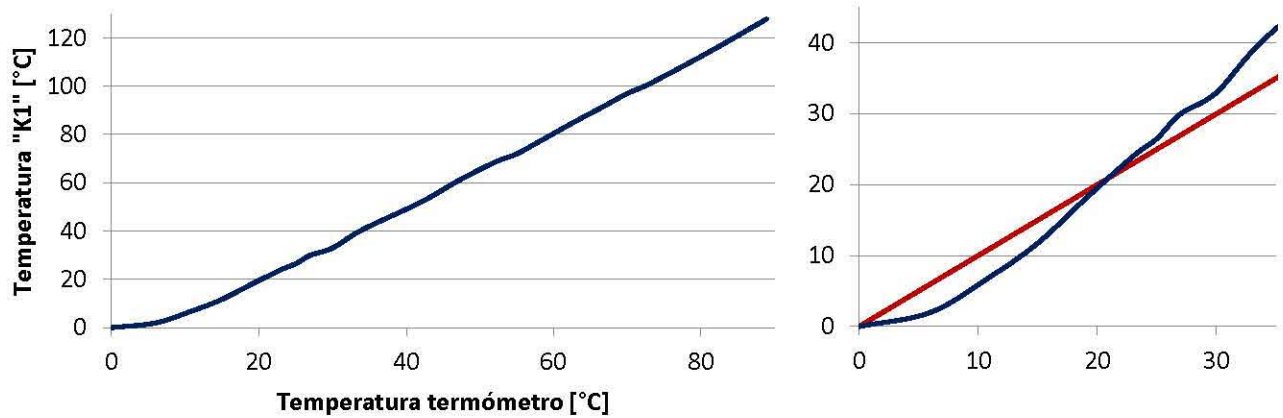


Figura 3.15 Análisis de exactitud de "K1", respuesta de "K1" en azul, patrón de referencia en rojo, rango completo a la izquierda, zoom del lado derecho.

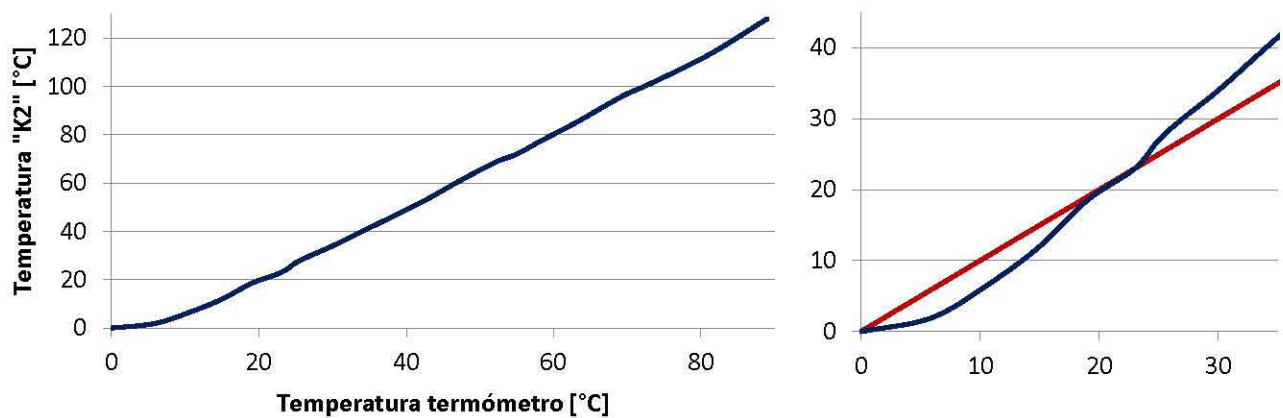


Figura 3.16 Análisis de exactitud de "K2", respuesta de "K2" en azul, patrón de referencia en rojo, rango completo a la izquierda, zoom del lado derecho.

Con ayuda del software Excel se realizó una regresión polinomial en busca de la línea de ajuste para calibrar lo mejor posible cada termopar.

Cabe señalar que, para realizar este ajuste, la variable independiente será el valor que cada termopar arroje al momento de hacer las mediciones. Con este valor de entrada se buscará la ecuación pertinente que nos permita tener un valor más exacto.

Excel arrojó los siguientes polinomios:

$$y = -3E - 10x^6 + 1E - 7x^5 - 2E - 5x^4 + 0.0014x^3 - 0.0575x^2 + 1.7262x + 0.5143$$

$$y = 1E - 8x^5 - 4E - 6x^4 + 0.0005x^3 - 0.0288x^2 + 1.4054x + 1.0573$$

Se graficaron los dos polinomios y se compararon los valores que arroja el termopar, contra los valores que arrojará después del ajuste con cada polinomio.

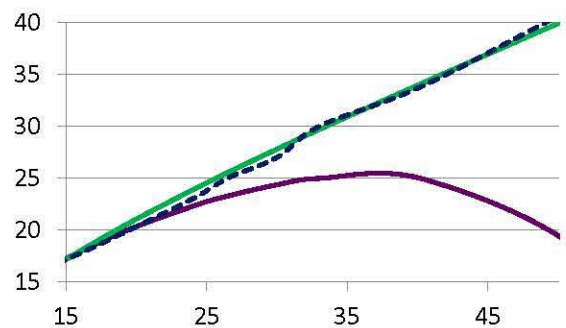
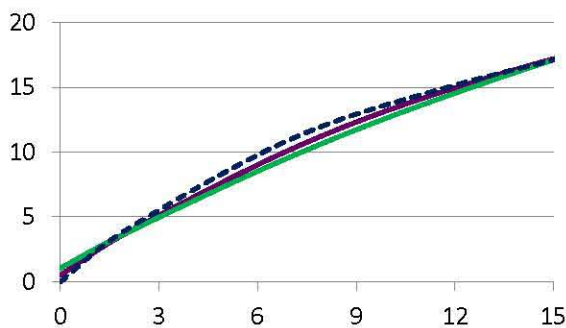
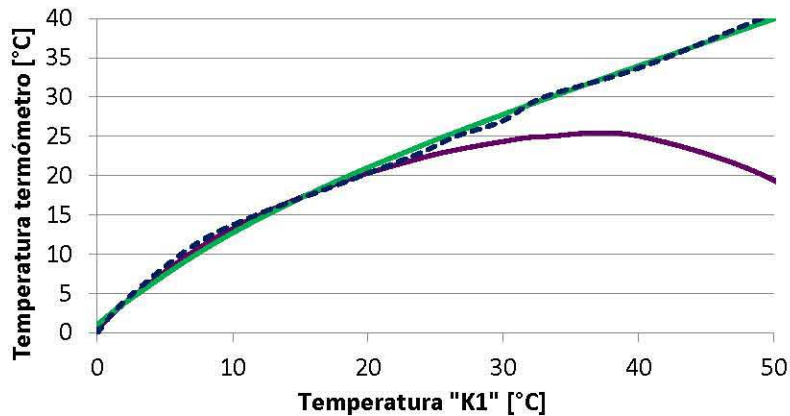


Figura 3.17 Polinomios de ajuste para "K1" grado 5 (verde) y grado 6 (morado), rango completo arriba, zoom a los rangos de interés abajo.

En las gráficas de la figura 3.17 se muestra el tipo de curva que "K1" debería estar arrojando al momento de la medición (línea punteada azul). Se puede apreciar que un polinomio de grado 5 (línea verde) nos dará una mayor exactitud al momento de realizar las mediciones dentro del rango de 0°C a 50°C. Pero al momento de realizar un análisis más a detalle, se observa que el polinomio de grado 6 (línea morada) representa una mejor opción para ajustar las mediciones de "K1" dentro del rango de temperaturas de 0°C a 12°C, y el polinomio de grado 5 (línea verde) para el ajuste de mediciones de temperaturas de 15°C a 50°C.

Luego de obtener los polinomios para la calibración de "K1", se optó por definir una frontera a los 15°C para conmutar entre los polinomios. Se tomó la señal enviada por "K1" como entrada y se le aplicaron los polinomios correspondientes para tener lecturas exactas. La calibración de "K1" quedó definida de la siguiente forma:

$$T_{K1} = \begin{cases} -3E - 10x_{K1}^6 + 1E - 7x_{K1}^5 - 2E - 5x_{K1}^4 + 0.0014x_{K1}^3 - 0.0575x_{K1}^2 + 1.7262x_{K1}^1 + 0.5143 & \text{si } 0 \leq x < 15 \\ 1E - 8x_{K1}^5 - 4E - 6x_{K1}^4 + 0.0005x_{K1}^3 - 0.0288x_{K1}^2 + 1.4054x_{K1}^1 + 1.0573 & \text{si } 15 \leq x < 50 \end{cases}$$

Se realizó el mismo procedimiento para la calibración de "K2".

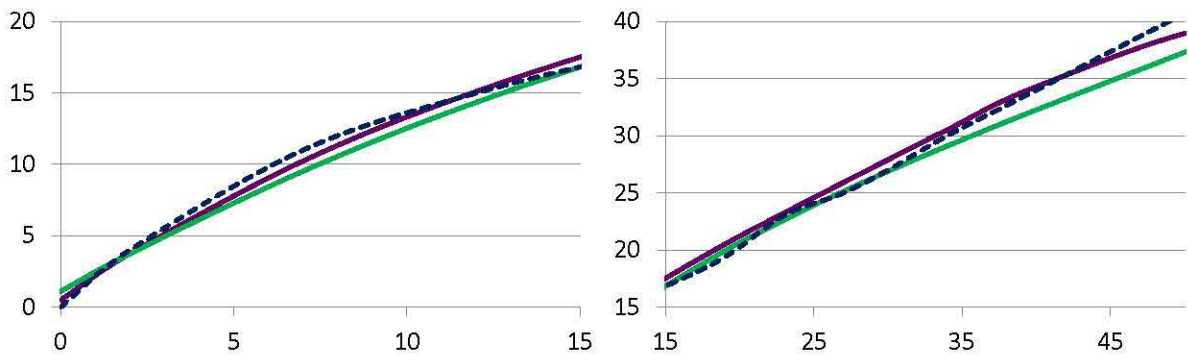
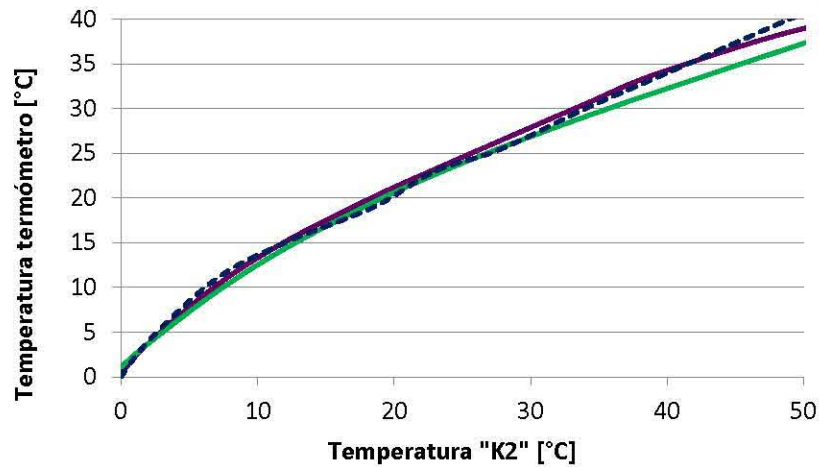


Figura 3.18 Polinomios de ajuste para "K2" grado 5 (verde) y grado 6 (morado), rango completo arriba, zoom a los rangos de interés abajo.

Para este caso bastó con el polinomio de grado 6 para ajustar las lecturas de "K2". Quedó definida de la siguiente forma:

$$T_{k2} = \begin{cases} -3E - 10x_{K2}^6 + 1E - 7x_{K2}^5 - 2E - 5x_{K2}^4 + 0.0016x_{K2}^3 - 0.06x_{K2}^2 + 1.74x_{K2}^1 + 0.4913 \\ \text{cuando } 0 \leq x < 50 \end{cases}$$

Otro punto de interés fue el referente al desplazamiento que se le provocó al gas de trabajo al momento de someter al sistema a diferentes gradientes de temperatura. Para este fin se utilizó el flujómetro tipo YF-S201.

Uno de los datos más importantes que se deben tomar en cuenta, es el número de pulsos que este flujómetro genera con el paso del fluido, ya que con este número podremos saber si el gradiente de temperatura aplicado puede producir movimiento del gas dentro del sistema, y cuánto flujo del mismo estará provocando.

El proveedor del flujómetro YF-S201 señala que se estarán generando 450 pulsos por litro de agua con un  $\pm 10\%$  de exactitud, es decir que por cada litro de agua que corre a través del flujómetro, éste enviará entre 400 y 500 pulsos aproximadamente. Este dato del proveedor queda sin relevancia para este trabajo, ya que, en este caso el fluido que

correrá a través del flujómetro, no es agua sino el compuesto químico Tetrafluoroetano. Este compuesto es un refrigerante conocido como R-134a.

El refrigerante R-134a tiene notables diferencias con respecto al agua. La densidad del refrigerante en estado gaseoso a una temperatura de 15°C es de 4.25 kg/m<sup>3</sup> sometido a presión atmosférica, mientras que la densidad del agua en las mismas condiciones es de 999.19 kg/m<sup>3</sup>.

Con la finalidad de obtener el caudal del gas, se calibró el flujómetro para funcionar con el paso del refrigerante R-134a. Esto se realizó de la siguiente manera:

- Se pesó el cartucho de refrigerante con el que se disponía para experimentar con una pequeña báscula con rango de medición de 0 kg a 2 kg. Y se tomó este valor como el peso inicial. El cartucho se dejó sobre la báscula durante todo este procedimiento.
- Mediante una serie de conexiones de cobre se implementó un sistema para conectar el cartucho de refrigerante con la entrada del flujómetro, teniendo la precaución de no dejar fugas que pudieran alterar las mediciones.
- Antes de la conexión del flujómetro se hizo una derivación para conectar un manómetro y conocer la presión aproximada del gas en el interior del cartucho.
- A la salida del flujómetro se conectó una llave de cierre lento para poder aumentar o disminuir el paso del refrigerante a través del flujómetro.
- El peso del cartucho se monitoreaba constantemente y se capturaba tanto el peso del cartucho como el número de vueltas que el flujómetro había dado. Esto se hizo cada que se disminuía en 0.5 gramos aproximadamente el peso del cartucho.
- Una vez que se cuantificaron 4 gramos se decidió que se disponía de un rango representativo para nuestros fines, esto debido a la escala del prototipo y a la cuestión ambiental, a pesar de que el fabricante señala que no es un gas contaminante.

La figura 3.19 muestra el sistema empleado para la calibración del flujómetro.

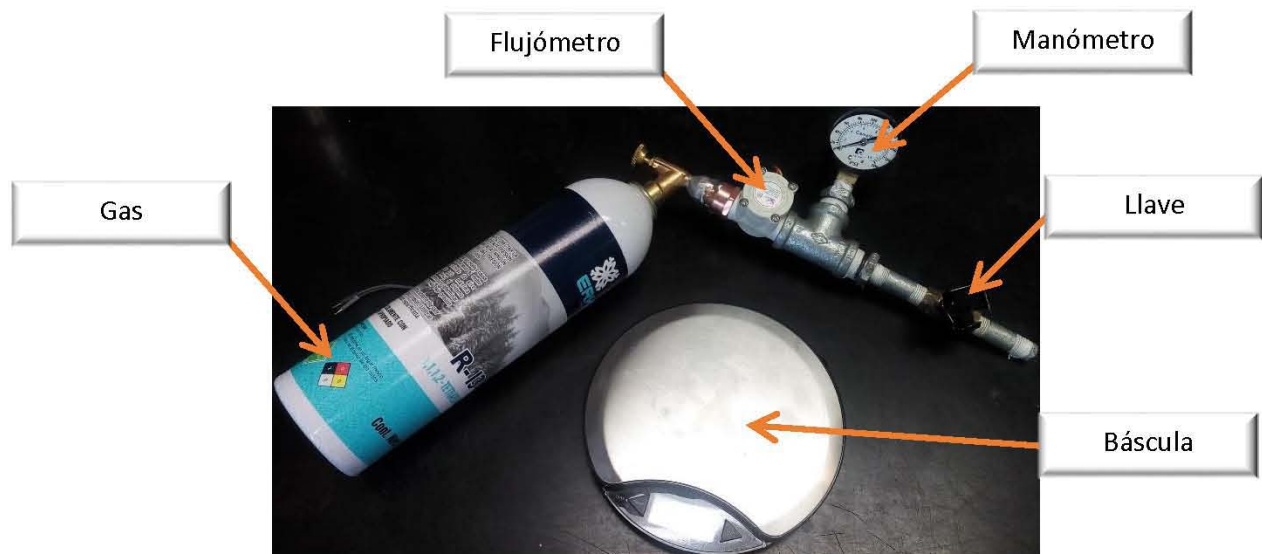


Figura 3.19 Conexiones para calibrar la respuesta del flujómetro ante el paso del R-134a.

Las condiciones para la calibración se muestran en la tabla siguiente.

| Condiciones iniciales |           | Condiciones finales |           |
|-----------------------|-----------|---------------------|-----------|
| Presión               | 84 PSI    | Presión             | 68 PSI    |
| Volumen               | 850 ml    | Volumen             | 850 ml    |
| Temperatura           | 22 °C     | Temperatura         | 22 °C     |
| Peso molecular        | 102 g/mol | Peso molecular      | 102 g/mol |
| Pulsos                | 0         | Pulsos              | 30000     |

Tabla 3.- Condiciones del gas R-134a para el experimento.

Con los datos iniciales de la tabla y, haciendo uso de la ley de los gases ideales podemos determinar la cantidad de gas inicial dentro del recipiente.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde:

$$P: \text{Presión absoluta} = 84 \text{ [PSI]} = 5.71 \text{ [atm]}$$

$$V: \text{Volumen} = 850 \text{ [ml]} = 0.85 \text{ [L]}$$

$n$ : Número de moles de gas = incógnita a determinar

$$R: \text{Constante universal de los gases ideales} = 0.08205746 \left[ \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

$$T: \text{Temperatura absoluta} = 22 \text{ [°C]} = 295 \text{ [K]}$$

Despejando  $n$ .

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}$$

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{5.71 \cdot 0.85}{0.08205746 \cdot 295} = \frac{4.8535}{24.20} = 0.20 \text{ [mol]}$$

$$\text{Expresado en gramos } n = 20.45 \text{ [g]}$$

Aplicando el mismo procedimiento para las condiciones finales y, observando que el volumen y la temperatura permanecen constantes.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde:

$$P: \text{Presión absoluta} = 68 \text{ [PSI]} = 4.62 \text{ [atm]}$$

$$V: \text{Volumen} = 850 \text{ [ml]} = 0.85 \text{ [L]}$$

$n$ : Número de moles de gas = incógnita a determinar

$$R: \text{Constante universal de los gases ideales} = 0.08205746 \left[ \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

$$T: \text{Temperatura absoluta} = 22 \text{ [°C]} = 295 \text{ [K]}$$

Despejando  $n$ .

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}$$

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{4.62 \cdot 0.85}{0.08205746 \cdot 295} = \frac{3.927}{24.20} = 0.16[\text{mol}]$$

Expresado en gramos  $n = 16.54 [g]$

Una vez que se conoce la cantidad inicial y final del gas, se puede calcular de manera aproximada cuánto gas circuló a través del flujómetro. La cantidad de gas que circuló fue de  $3.91 [g]$ , dicha cantidad de gas provocó el giro del flujómetro reflejándose en un total de 30,000 pulsaciones.

Podemos decir que se generan aproximadamente 7,670 pulsos por cada gramo de gas R-134a.

La siguiente tabla y gráfico muestran los datos capturados para la calibración y, confirman el número de pulsos provocados por gramo de gas.

| Peso [gramos] | Gas liberado [gramos] | Pulsos |
|---------------|-----------------------|--------|
| 1600          | 0                     | 0      |
| 1599.5        | 0.5                   | 3600   |
| 1599          | 1                     | 7200   |
| 1598.5        | 1.5                   | 11000  |
| 1598          | 2                     | 16000  |
| 1597.5        | 2.5                   | 19000  |
| 1597          | 3                     | 22500  |
| 1596.5        | 3.5                   | 26500  |
| 1596          | 4                     | 30000  |

Tabla 4.- Pulsos por flujo de gas.

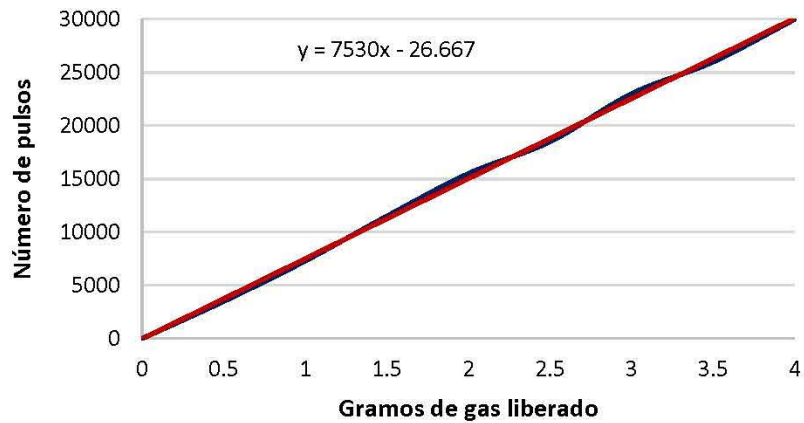


Figura 3.20 Curva de calibración del flujómetro.

Dentro del prototipo, el flujómetro está ubicado a la salida del evaporador, ya que termodinámicamente es el punto en el cual se cuenta con la mayor presión y temperatura posibles en el circuito de trabajo. La ubicación del flujómetro se muestra más a detalle en la figura 3.21.



Figura 3.21 Flujómetro a la salida del evaporador.

### 3.2.1. Puntos de monitoreo

El monitoreo del proceso se centró en la temperatura del agua, tanto fría como caliente, y la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador y a la salida del condensador. Puntualmente, los puntos de monitoreo son:

- Agua fría dentro del congelador
- Agua fría de retorno al congelador
- Agua caliente en la zona del evaporador
- Temperatura del fluido a la salida del evaporador
- Temperatura del fluido a la salida del condensador
- Pulsos generados e interpretados en revoluciones por minuto

Los valores de cada temperatura y de los pulsos eran registrados mediante el puerto serie de comunicación Arduino y exportados a un archivo con extensión \*.csv para tener un manejo de datos más sencillo.

### 3.2.2. Puntos de control

Los puntos de control para este prototipo final fueron tres.

Uno de los puntos de control es la activación y desactivación del sistema de bombeo de agua fría. Una vez que se alcanzaba la temperatura de 5°C dentro del congelador, se pone en funcionamiento la bomba de agua que se encuentra al interior de éste para que bombee el agua fría hasta el depósito del condensador.

El segundo punto de control es el encendido y apagado de la resistencia incorporada al evaporador para mantener dentro de su depósito una temperatura de 25°C.

El tercer punto de control es la activación y desactivación de la bomba de circulación.

Estos tres puntos son controlados desde el dispositivo Android vía bluetooth empleando el lenguaje de programación ARDUINO y APP INVENTOR.

### 3.2.3. Respuesta y funcionamiento del sistema

Una vez que el prototipo quedó completo (fig. 3.7), se realizaron los experimentos y simulaciones pertinentes para caracterizar al sistema y comprobar cómo su eficiencia varía de manera proporcional al gradiente térmico al que es sometido. De acuerdo a la temperatura y presión medidas en cada punto, y con ayuda de la curva característica del refrigerante R-134a proporcionado por el fabricante, se obtuvieron los valores de entalpía, entropía y estado de dicho refrigerante para el cálculo de la eficiencia. Se realizó un ajuste en el programa con los polinomios calculados para obtener un termopar más exacto. Luego de las modificaciones pertinentes se repitieron las medidas y las lecturas fueron más exactas, así como se muestra en la tabla siguiente.



| Temperatura<br>[°C] | Temperatura de termopar [°C] |      |
|---------------------|------------------------------|------|
|                     | "K1"                         | "K2" |
| 0                   | 0.5                          | 0.5  |
| 1                   | 1.3                          | 1.5  |
| 2                   | 3.5                          | 3    |
| 3                   | 5                            | 5    |
| 4                   | 6.5                          | 6    |
| 5                   | 7.5                          | 7    |
| 6                   | 9                            | 9    |
| 7                   | 10                           | 10   |
| 8                   | 11                           | 11   |
| 9                   | 12                           | 12   |
| 10                  | 13                           | 13   |
| 20                  | 21                           | 21   |
| 21                  | 22                           | 22   |
| 22                  | 22.5                         | 22.5 |
| 23                  | 23                           | 23.5 |
| 24                  | 24                           | 24   |
| 25                  | 24.5                         | 25   |
| 26                  | 25                           | 25.5 |
| 27                  | 26                           | 26   |
| 28                  | 26.5                         | 26.5 |
| 29                  | 27                           | 27   |
| 30                  | 28                           | 28   |
| 35                  | 31                           | 32   |

Tabla 5.- Respuesta calibrada de cada termopar tipo K.

También se ajustó el programa para relacionar el número de pulsos, entregados por el flujómetro, con una medida de revoluciones por minuto.

### 3.3. Etapa de experimentación

Como primer paso se trabajó el prototipo sin gradiente térmico con la intención de conocer el efecto real que la bomba de circulación tiene sobre el sistema.

Para el funcionamiento sin gradiente térmico entre evaporador y condensador, el número de pulsos que el flujómetro arrojó, fueron 55 revoluciones por minuto más menos 1 revolución<sup>30</sup>. De acuerdo a la calibración que se le realizó al flujómetro en el punto 3.2 y cuyos resultados se pueden apreciar en la tabla 4, el valor de  $55 \pm 1$  revoluciones por minuto quiere decir que la bomba de circulación desplaza cerca de 11 miligramos de gas por minuto. Cabe mencionar que la bomba de circulación fue alimentada de manera constante con 6 volts en corriente directa por una fuente de poder Matrix MPS-3003D.

<sup>30</sup> Captura de pantalla de las mediciones realizadas para contabilizar las RPM sin gradiente en ANEXO II

Dentro de esta etapa también se verificó que el sistema estuviera libre de fugas y que la resistencia del evaporador tuviera la suficiente potencia para elevar la temperatura del agua adyacente.

Se verificaron las conexiones electrónicas, así como la comunicación inalámbrica.

### 3.3.1. Funcionamiento con gradiente térmico mínimo

El primer gradiente térmico que se le aplicó fue de 20°C, es decir, 25°C en la parte de evaporación contra 5°C en el condensador.

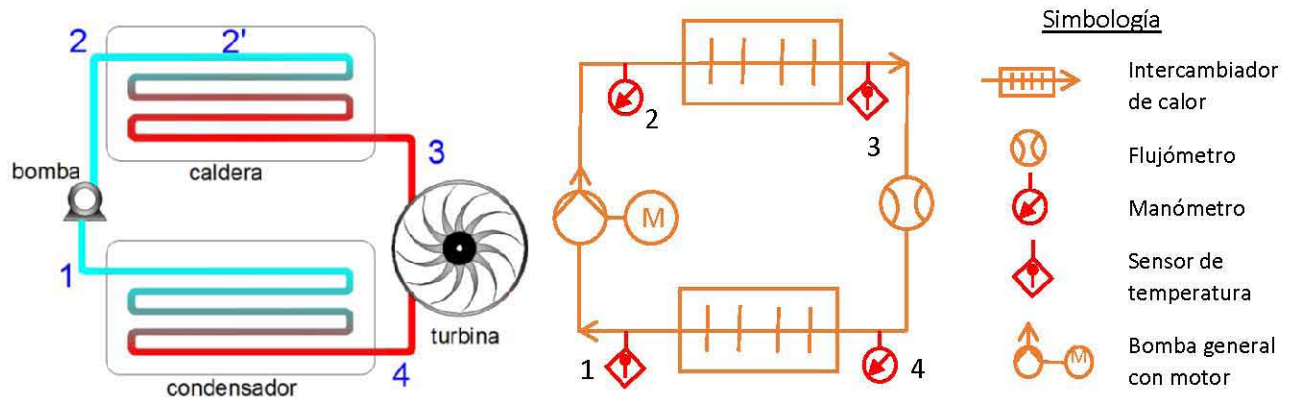


Figura 3.22 Representación en diagrama unifilar del prototipo de planta OTEC y sus puntos de medición. Simbología normalizada ISO 1219. Se omiten las válvulas de cierre, llenado, estrangulamiento y los cambios en el diámetro y tipo de la tubería, ya que para este estudio se despreciaron sus efectos.

El procedimiento para conocer las características termodinámicas del refrigerante R-134a dentro de este experimento fue el siguiente:

1. Se registraron las temperaturas en los 4 puntos del ciclo, así como la presión en dos puntos, ya que se suponen presiones constantes de 4-1 y de 2-3. Fue necesario hacer la conversión de unidades de la presión. Se convirtieron PSI a kPa.
2. Con estos dos valores y con la ayuda online de la página de internet <http://thermodynamik.hszg.de> se encontraron los valores de entalpía para cada punto. Cabe mencionar que, para los casos con gradiente de 20°C, 40°C y 49°C se corroboraron los valores de Entalpía obtenidos de la red, contra los valores obtenidos mediante el empleo de las tablas termodinámicas propias del refrigerante R-134a.
3. Se graficaron los 4 puntos con sus valores de Presión y Entalpía sobre el diagrama de Mollier del refrigerante R-134a, esto con la finalidad de determinar el estado en el que estaba trabajando el refrigerante dentro de nuestro circuito.
4. Con la ayuda del diagrama de Mollier, también podemos determinar la Entropía de nuestro refrigerante.
5. Se ordenaron todos estos datos dentro una tabla.
6. Se realizó un bosquejo de las gráficas  $T$  Vs  $S$  y  $P$  Vs  $h$ . En las cuales se representan de manera general los puntos de estudio de nuestro ciclo de trabajo.
7. Se calculó de manera algebraica la eficiencia térmica de nuestro ciclo Rankine simple, empleando la ecuación  $\eta_{t\acute{e}rmico} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$ .

El primer caso de estudio, como ya se mencionó, fue con gradiente térmico de 20°C. Los resultados son los siguientes.

| Características termodinámicas R-134a con gradiente térmico de 20°C |                         |                      |                         |                          |                      |
|---|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Punto   | Temperatura<br>$T$ [°C] | Presión<br>$P$ [kPa] | Entalpía<br>$h$ [kJ/kg] | Entropía<br>$s$ [kJ/kgK] | Estado               |
| 1   | 5                       | 103.421              | 407.746                 | 1.837                    | Vapor sobrecalentado |
| 2   | 5.5                     | 124.106              | 407.683                 | 1.805                    | Vapor sobrecalentado |
| 3   | 25                      | 124.106              | 424.104                 | 1.892                    | Vapor sobrecalentado |
| 4   | 24.5                    | 103.421              | 424.061                 | 1.898                    | Vapor sobrecalentado |

Tabla 6.- Características termodinámicas R-134a. Gradiente 20°C. Resultados corroborados mediante el empleo de tablas.

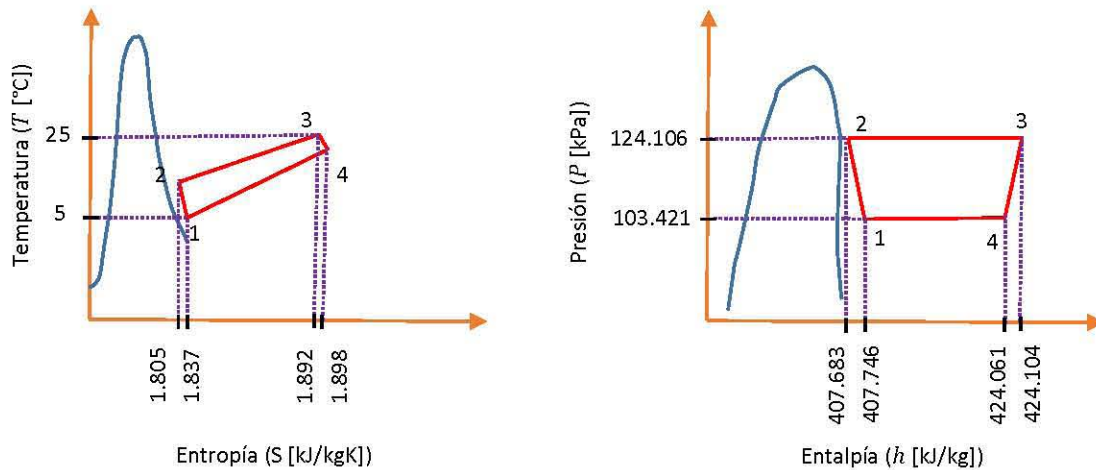


Figura 3.23 Bosquejo de gráficas, gradiente térmico de 20°C.

Sustituyendo valores en

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad \eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{424.061 - 407.746}{424.104 - 407.683} = 6.455 \times 10^{-3}$$

Expresando este resultado en porcentaje

$$\eta_{\text{térmico}} = 0.65\%$$

### 3.3.2. Modificaciones controladas del gradiente térmico

Se modificó la temperatura del agua del evaporador y se fueron analizando los pulsos generados al ir aumentando gradualmente la temperatura del evaporador.

Se elevó la temperatura del evaporador hasta los 27°C, es decir, un gradiente de 22°C. Los resultados son los siguientes.

| Características termodinámicas R-134a con gradiente térmico de 22°C |                         |                      |                         |                          |                      |
|---|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Punto   | Temperatura<br>$T$ [°C] | Presión<br>$P$ [kPa] | Entalpía<br>$h$ [kJ/kg] | Entropía<br>$s$ [kJ/kgK] | Estado               |
| 1   | 5                       | 103.421              | 407.746                 | 1.837                    | Vapor sobrecalentado |
| 2   | 5.6                     | 124.106              | 407.766                 | 1.805                    | Vapor sobrecalentado |
| 3   | 27                      | 124.106              | 425.818                 | 1.898                    | Vapor sobrecalentado |
| 4   | 26.6                    | 103.421              | 425.851                 | 1.904                    | Vapor sobrecalentado |

Tabla 7.- Características termodinámicas R-134a. Gradiente 22°C.

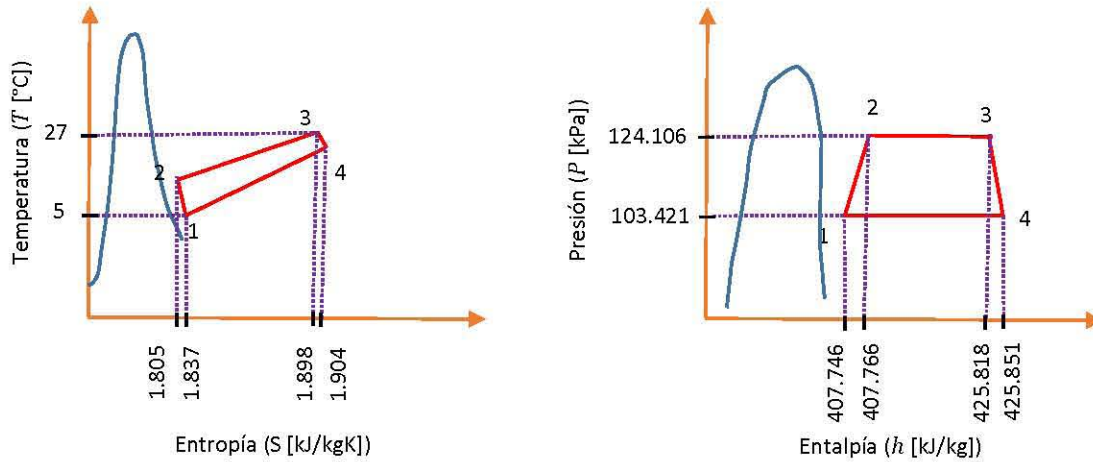


Figura 3.24 Bosquejo de gráficas, gradiente térmico de 22°C.

Sustituyendo valores en

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad \eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{425.851 - 407.746}{425.818 - 407.766} = -2.936 \times 10^{-3}$$

Expresando este resultado en porcentaje

$$\eta_{\text{térmico}} = -0.3\%$$

Se elevó la temperatura del evaporador hasta los 33°C, es decir, un gradiente de 28°C. Los resultados son los siguientes.

| Características termodinámicas R-134a con gradiente térmico de 28°C |                         |                      |                         |                          |                      |
|---|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Punto   | Temperatura<br>$T$ [°C] | Presión<br>$P$ [kPa] | Entalpía<br>$h$ [kJ/kg] | Entropía<br>$s$ [kJ/kgK] | Estado               |
| 1   | 5                       | 103.421              | 407.746                 | 1.837                    | Vapor sobrecalentado |
| 2   | 5.6                     | 124.106              | 407.766                 | 1.805                    | Vapor sobrecalentado |
| 3   | 33                      | 124.106              | 430.994                 | 1.915                    | Vapor sobrecalentado |
| 4   | 32                      | 103.421              | 430.485                 | 1.920                    | Vapor sobrecalentado |

Tabla 8.- Características termodinámicas R-134a. Gradiente 28°C.

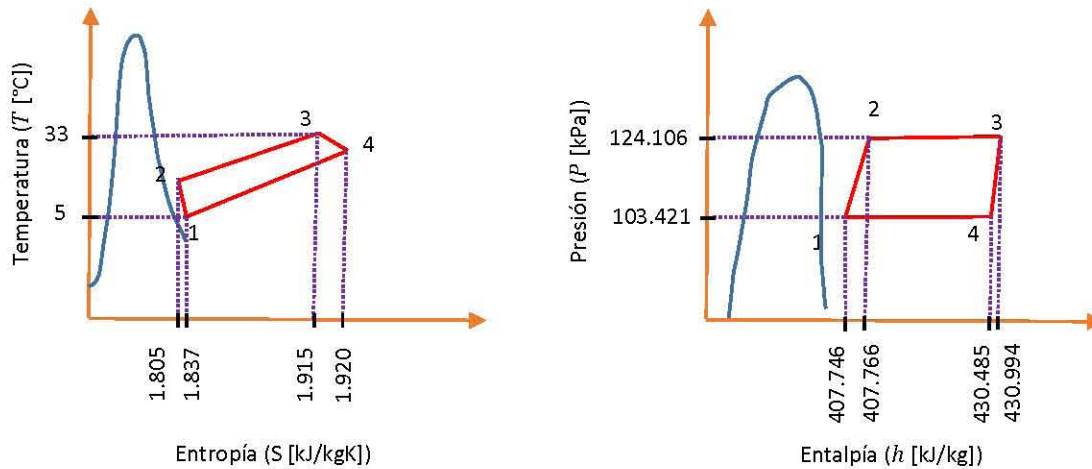


Figura 3.25 Bosquejo de gráficas, gradiente térmico de 28°C.

Sustituyendo valores en

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad \eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{430.485 - 407.746}{430.994 - 407.766} = 0.0210$$

Expresando este resultado en porcentaje

$$\eta_{\text{térmico}} = 2.1\%$$

Se elevó la temperatura del evaporador hasta los 40°C, es decir, un gradiente de 35°C. Los resultados son los siguientes.

| Características termodinámicas R-134a con gradiente térmico de 35°C |                         |                      |                         |                          |                      |
|---|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Punto   | Temperatura<br>$T$ [°C] | Presión<br>$P$ [kPa] | Entalpía<br>$h$ [kJ/kg] | Entropía<br>$s$ [kJ/kgK] | Estado               |
| 1   | 5                       | 103.421              | 407.746                 | 1.837                    | Vapor sobrecalentado |
| 2   | 5.6                     | 124.106              | 407.766                 | 1.805                    | Vapor sobrecalentado |
| 3   | 40                      | 124.106              | 437.101                 | 1.935                    | Vapor sobrecalentado |
| 4   | 38                      | 103.421              | 435.686                 | 1.937                    | Vapor sobrecalentado |

Tabla 9.- Características termodinámicas R-134a. Gradiente 35°C. Resultados corroborados mediante el empleo de tablas.

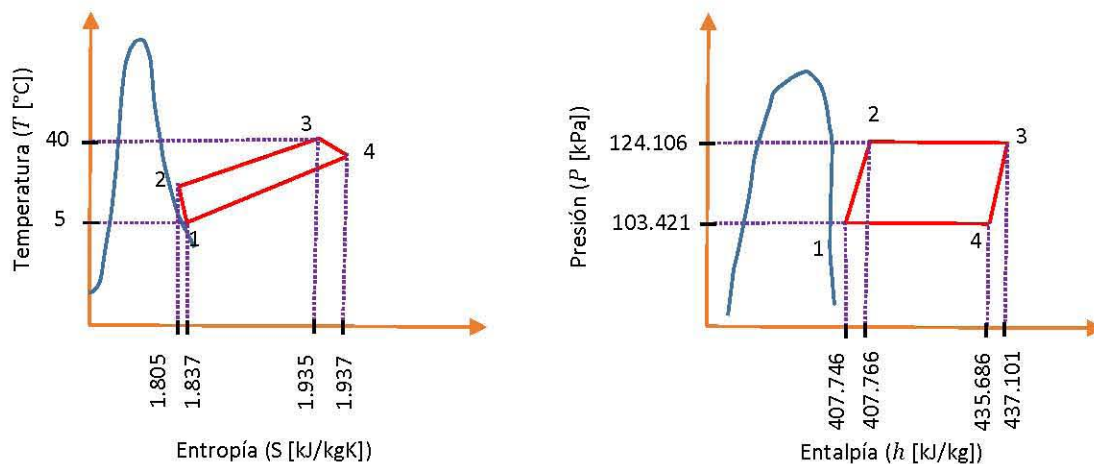


Figura 3.26 Bosquejo de gráficas, gradiente térmico de 35°C.

Sustituyendo valores en

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad \eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{435.686 - 407.746}{437.101 - 407.766} = 0.047$$

Expresando este resultado en porcentaje

$$\eta_{\text{térmico}} = 4.7\%$$

Se elevó la temperatura del evaporador hasta los 43°C, es decir, un gradiente de 38°C. Los resultados son los siguientes.

| Características termodinámicas R-134a con gradiente térmico de 38°C |                         |                      |                         |                          |                      |
|---|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Punto   | Temperatura<br>$T$ [°C] | Presión<br>$P$ [kPa] | Entalpía<br>$h$ [kJ/kg] | Entropía<br>$s$ [kJ/kgK] | Estado               |
| 1   | 5                       | 103.421              | 407.746                 | 1.837                    | Vapor sobrecalentado |
| 2   | 5.6                     | 124.106              | 407.766                 | 1.805                    | Vapor sobrecalentado |
| 3   | 43                      | 124.106              | 439.740                 | 1.943                    | Vapor sobrecalentado |
| 4   | 40.5                    | 103.421              | 437.869                 | 1.944                    | Vapor sobrecalentado |

Tabla 10.- Características termodinámicas R-134a. Gradiente 38°C.

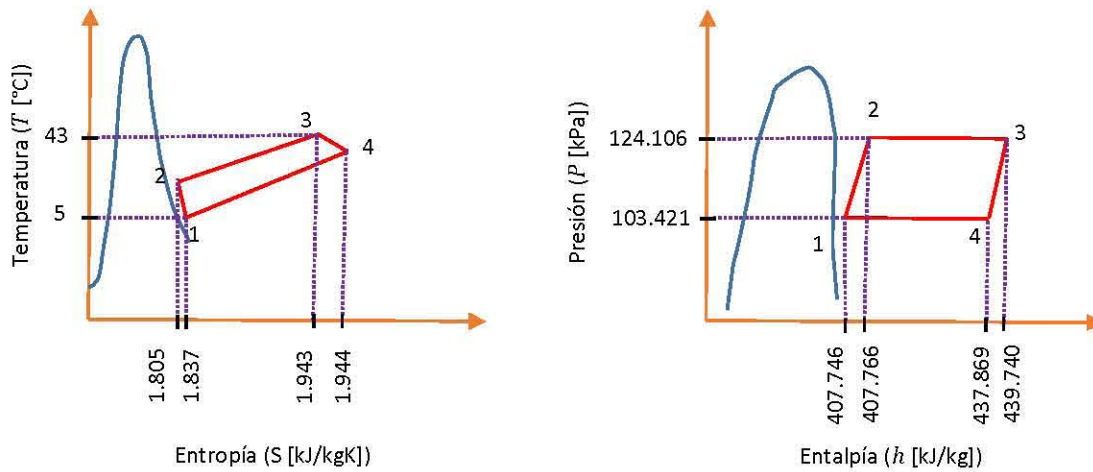


Figura 3.27 Bosquejo de gráficas, gradiente térmico de 38°C.

Sustituyendo valores en

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad \eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{437.869 - 407.746}{439.740 - 407.766} = 0.057$$

Expresando este resultado en porcentaje

$$\eta_{\text{térmico}} = 5.7\%$$

Se elevó la temperatura del evaporador hasta los 46°C, es decir, un gradiente de 41°C. Los resultados son los siguientes.

| Características termodinámicas R-134a con gradiente térmico de 41°C |                         |                      |                         |                          |                      |
|---|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Punto   | Temperatura<br>$T$ [°C] | Presión<br>$P$ [kPa] | Entalpía<br>$h$ [kJ/kg] | Entropía<br>$s$ [kJ/kgK] | Estado               |
| 1   | 5                       | 103.421              | 407.746                 | 1.837                    | Vapor sobrecalentado |
| 2   | 6                       | 124.106              | 408.098                 | 1.807                    | Vapor sobrecalentado |
| 3   | 46                      | 124.106              | 442.393                 | 1.951                    | Vapor sobrecalentado |
| 4   | 43                      | 103.421              | 440.062                 | 1.951                    | Vapor sobrecalentado |

Tabla 11.- Características termodinámicas R-134a. Gradiente 41°C.

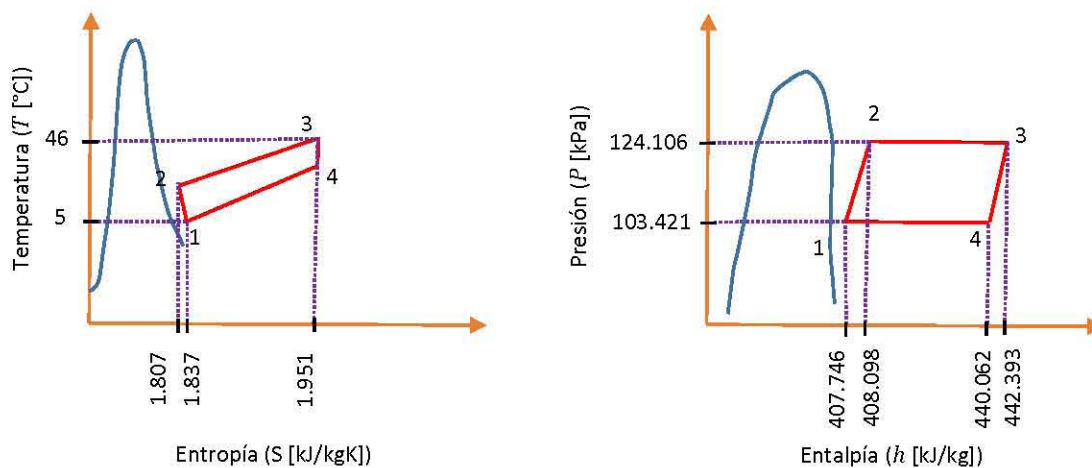


Figura 3.28 Bosquejo de gráficas, gradiente térmico de 41°C.

Sustituyendo valores en

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad \eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{440.062 - 407.746}{442.393 - 408.098} = 0.057$$

Expresando este resultado en porcentaje

$$\eta_{\text{térmico}} = 5.7\%$$

Se elevó la temperatura del evaporador hasta los 49°C, es decir, un gradiente de 44°C. Los resultados son los siguientes.

| Características termodinámicas R-134a con gradiente térmico de 44°C |                         |                      |                         |                          |                      |
|---|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Punto   | Temperatura<br>$T$ [°C] | Presión<br>$P$ [kPa] | Entalpía<br>$h$ [kJ/kg] | Entropía<br>$s$ [kJ/kgK] | Estado               |
| 1   | 5                       | 103.421              | 407.746                 | 1.837                    | Vapor sobrecalentado |
| 2   | 6                       | 124.106              | 408.098                 | 1.807                    | Vapor sobrecalentado |
| 3   | 49                      | 124.106              | 445.059                 | 1.960                    | Vapor sobrecalentado |
| 4   | 45                      | 103.421              | 441.823                 | 1.956                    | Vapor sobrecalentado |

Tabla 12.- Características termodinámicas R-134a. Gradiente 44°C. Resultados corroborados mediante el empleo de tablas.

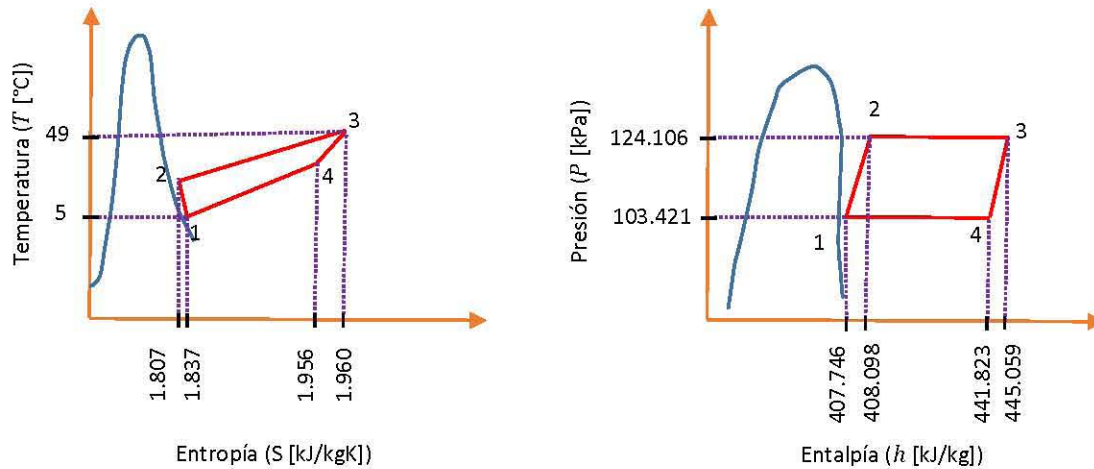


Figura 3.29 Bosquejo de gráficas, gradiente térmico de 44°C.

Sustituyendo valores en

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad \eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{441.823 - 407.746}{445.059 - 408.098} = 0.078$$

Expresando este resultado en porcentaje

$$\eta_{\text{térmico}} = 7.8\%$$

### 3.3.3. Modificaciones al segundo prototipo

En este punto se optó por realizar modificaciones estéticas al prototipo y que éste simulara una planta OTEC real. Se pintó la tubería de color rojo y azul para visualizar la zona cálida y la zona fría respectivamente. Se colocó el prototipo junto a una pecera, la cual se llenó con agua azul y alcohol étílico rojo. Se colocaron mangueras igualmente pintadas de rojo y azul. La visualización del prototipo se muestra en la figura.

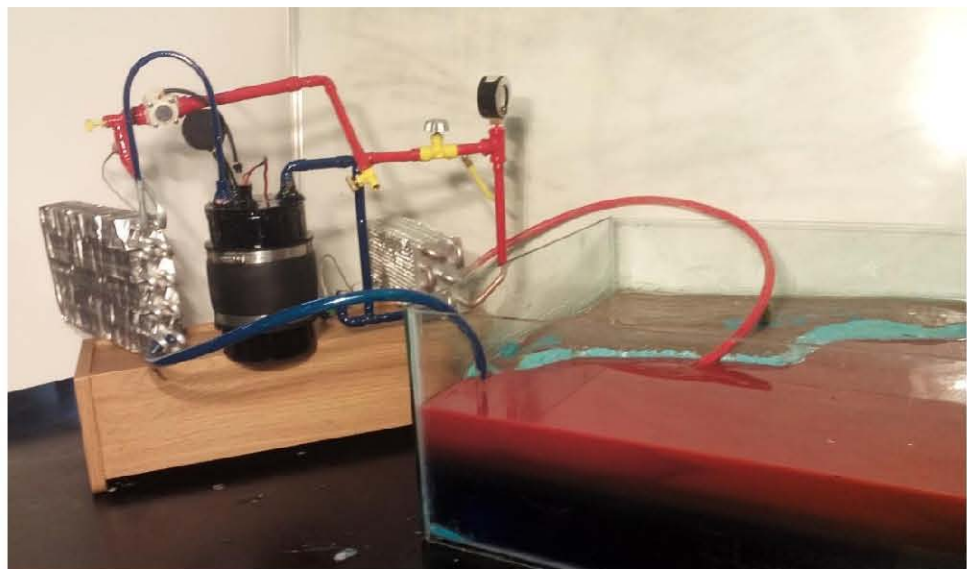


Figura 3.30 Prototipo completo de planta OTEC.



### 3.4. Estudio de los resultados observados

Para este estudio se tomó como primer dato, las rpm que se generaban dentro del sistema al momento de trabajarlo sin gradiente térmico, es decir 55 rpm.

Dentro del Anexo II, se agregan las capturas de pantalla mostrando el número de rpm obtenidos mediante componentes y programación Arduino para cada gradiente trabajado de manera experimental. Los resultados se incluyen en la tabla 13.

| Gradiente Térmico [°C] | Eficiencia teórica |       | Eficiencia experimental |       |
|------------------------|--------------------|-------|-------------------------|-------|
|                        | %                  | rpm   | rpm                     | %     |
| 20                     | 0.65               | 0.36  | 0.4                     | 0.72  |
| 22                     | -0.3               | -0.17 | -1.0                    | -1.81 |
| 28                     | 2.1                | 1.16  | 0.6                     | 1.09  |
| 35                     | 4.7                | 2.59  | 2.2                     | 4.00  |
| 38                     | 5.7                | 3.14  | 2.4                     | 4.36  |
| 41                     | 5.7                | 3.14  | 2.6                     | 4.72  |
| 44                     | 7.8                | 4.29  | 4.4                     | 8.00  |

Tabla 13.- Eficiencia teórica y experimental de cada gradiente.

De acuerdo a la tabla 13 se puede concluir que el efecto experimental que los gradientes ejercen sobre la eficiencia, es mínimo.

La eficiencia obtenida de manera experimental con un gradiente de 20°C queda por debajo de la eficiencia que Claude obtuvo en Matanzas con un gradiente de 14°C, como se mencionó en el capítulo I.

Graficando los resultados obtenidos se puede apreciar que el comportamiento del experimento realizado dentro del laboratorio, con las condiciones propias tanto del laboratorio como del prototipo empleado, se asemeja al comportamiento teórico.

Utilizando Excel para obtener la línea de tendencia de cada curva corroboramos que el comportamiento del prototipo es semejante al teórico. Figura 3.31.

Se presentó un comportamiento inesperado en la realización del experimento; dentro del rango de gradiente teórico de 21°C a 23°C se obtiene una eficiencia negativa. Esta misma eficiencia negativa se presentó al momento de recabar las mediciones del flujómetro, pero dentro de un rango más amplio de

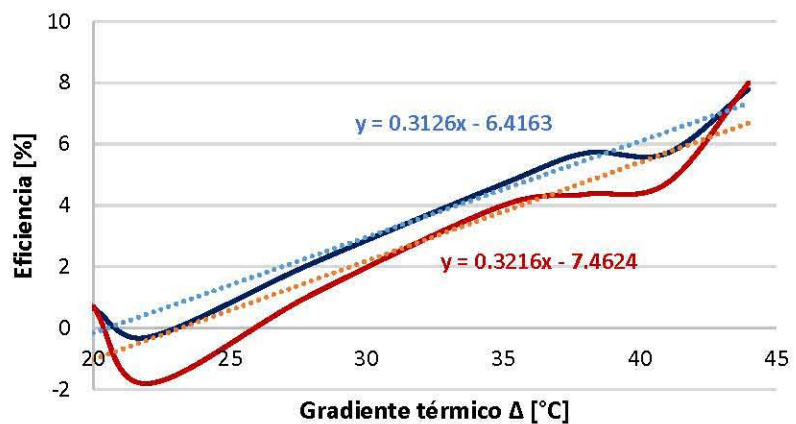


Figura 3.31 Curvas de eficiencia. Teórica en azul. Experimental en rojo.

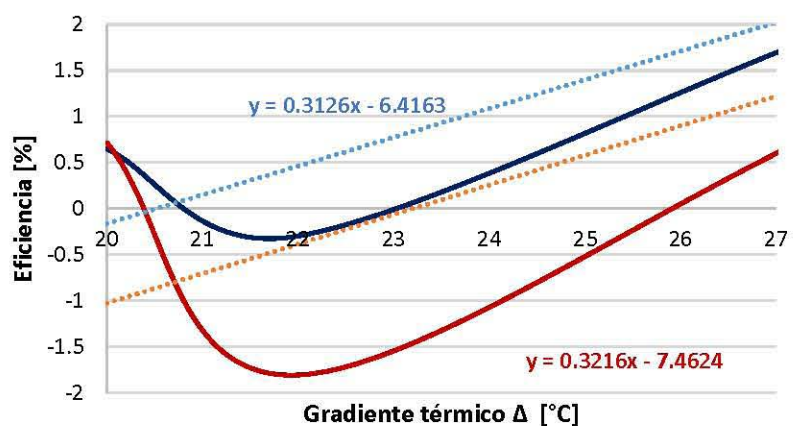


Figura 3.32 Eficiencia negativa. Teórica en azul. Experimental en rojo.

gradiente, de 20.5°C a 26°C. Además de que la eficiencia negativa llegó a alcanzar un valor más alto que en los datos teóricos. Teóricamente la eficiencia alcanzaría un valor negativo del -0.3%, sin embargo, en la experimentación se alcanzó casi el -2% de eficiencia. La máxima eficiencia negativa se alcanzó con el gradiente de 22°C<sup>31</sup>, tanto para el análisis teórico como para el experimental.

Estas eficiencias negativas representan un tema de estudio a profundidad en el que las variables involucradas dentro del experimento sean definidas y delimitadas con una mayor precisión que con la que fueron definidas para este estudio, y con ello poder descartar que la eficiencia negativa obtenida sea el resultado de errores sistemáticos o aleatorios, errores en los instrumentos de medición, errores a causa de efectos ambientales o errores del propio operador. Debido a que el estudio y perfeccionamiento del ciclo de trabajo para una planta OTEC queda fuera de los objetivos de esta investigación, se decidió no ahondar en el análisis de la eficiencia negativa obtenida al momento de experimentar.

### 3.5. Consideraciones para el desarrollo del prototipo

En el transcurso de esta investigación y, concretamente, para el desarrollo del prototipo final, se presentaron diversos contratiempos y dificultades que impedían el análisis adecuado del sistema. Para solucionarlos se hicieron múltiples consideraciones y modificaciones que permitieron llegar a un prototipo funcional, estas modificaciones podrían utilizarse como antecedente en la planificación de una planta OTEC y su tipo de ciclo de trabajo.

Un primer intento de representación de planta OTEC se muestra en la figura 3.33. En éste, se pudo observar que el efecto de reducir el diámetro de la tubería en busca de aumentar la presión y la eficiencia, resulta nulo.



Figura 3.33 Diámetros diferentes.

<sup>31</sup> El experimento, con los gradientes mencionados, se repitió 3 veces obteniendo prácticamente los mismos valores con variaciones sin efectos considerables.

# CAPÍTULO 4



## 4. DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN

Como se mencionó en el capítulo I, la instrumentación en México es un campo en proceso de desarrollo. A esto se le suma la escasa interacción entre los campos que necesitan instrumentos y los potenciales campos de desarrollo instrumental.

Uno de los objetivos dentro de esta investigación es el desarrollo de instrumentación propia y de bajo costo, empleando en lo posible los estuches, carcasas o contenedores de los instrumentos discontinuados. Con este desarrollo se pretende dejar un antecedente en el desarrollo instrumental en México dirigido a la oceanografía y, sobre todo, contribuir al vínculo entre la ingeniería electrónica y la oceanografía física.

Una de las limitantes de los primeros instrumentos era la poca memoria que tenían para guardar los datos, este punto se ve superado con el uso de memorias usb, sd, micro sd, etc. Otra limitante era la capacidad que tenían las baterías, las baterías alcalinas ofrecen una capacidad típica alrededor de los 1500 mAh, mientras que las baterías más recientes de ion litio llegan a 3500 mAh de capacidad. Estas son capacidades típicas y conocidas para baterías de tamaño AA.

Debido a la poca capacidad que los componentes tenían en su momento, esto provocaba que las dimensiones de cada instrumento fueran, hasta cierto punto, incómodas. Con el desarrollo tecnológico se consiguen componentes cada vez más pequeños y cada vez más capaces, los cuales son usados para el desarrollo de esta investigación.

### 4.1. Variables oceanográficas de interés para monitorear en torno a una planta OTEC

Para una planta tipo OTEC la variable de mayor interés es la temperatura, la cual ya se tiene monitoreada en varios puntos dentro del sistema de operación.

En general, se puede decir que las variables involucradas dentro del funcionamiento de una planta OTEC ya se tienen monitoreadas con sensores de bajo precio y de buen funcionamiento, debido a esto se optó por desarrollar instrumentación para el monitoreo de las variables oceanográficas en torno a una planta OTEC.

Una vez que tanto el agua caliente ha entrado en contacto con el evaporador para calentar al fluido de trabajo y, por otra parte, el agua fría ha entrado en contacto con el condensador para enfriar al fluido de trabajo, estas dos aguas no permanecen dentro del sistema, sino que son descargadas en una sola mezcla a la profundidad más conveniente.

La elección de la profundidad para descargar el agua se basa en la consideración de su temperatura y su densidad, para evitar las posibles alteraciones en la zona en la cual es descargada, García [2016].

Dependiendo de la profundidad a la cual es descargada la mezcla de las aguas, ésta se encontrará con diferentes condiciones propias de la zona en la cual se descarga.

Una variable que nos interesa conocer, es la velocidad de la corriente, tanto en magnitud como en sentido.

Se eligió entonces desarrollar un correntómetro para conocer las componentes de la corriente en la zona de descarga y con ello poder inferir el recorrido y el destino del agua de descarga.

## 4.2. Implementación de sensores y estructura instrumental para el monitoreo en torno a una planta OTEC

Se contaba en el laboratorio con un correntómetro SENSOR DATA SD-4 (figura 4.1), del cual se utilizó su carcasa y sus componentes mecánicos para implementar la estructura y soporte de nuestro instrumento.

El funcionamiento de este correntómetro constaba de dos partes, una primera para medir la magnitud de la velocidad de la corriente, y la segunda para medir la dirección de la corriente.

Para realizar las mediciones de la magnitud de la velocidad, el correntómetro basaba su principio de funcionamiento en la inducción magnética. Esta inducción activa y desactiva un interruptor magnético situado al interior del correntómetro, la inducción magnética es provocada por la rotación de la punta magnetizada de la hélice situada al exterior del correntómetro. Dicha rotación se debe al flujo del agua que empuja las aspas que conforman la hélice. La velocidad de conmutación del interruptor entre activado y desactivado, depende de manera directa de la velocidad de la rotación de la hélice; esta conmutación era leída e interpretada por la electrónica del correntómetro y expresada a manera de velocidad de la corriente. Sin importar el sentido del movimiento del agua, la hélice giraba siempre en la misma dirección debido a la geometría cóncava de sus aspas.

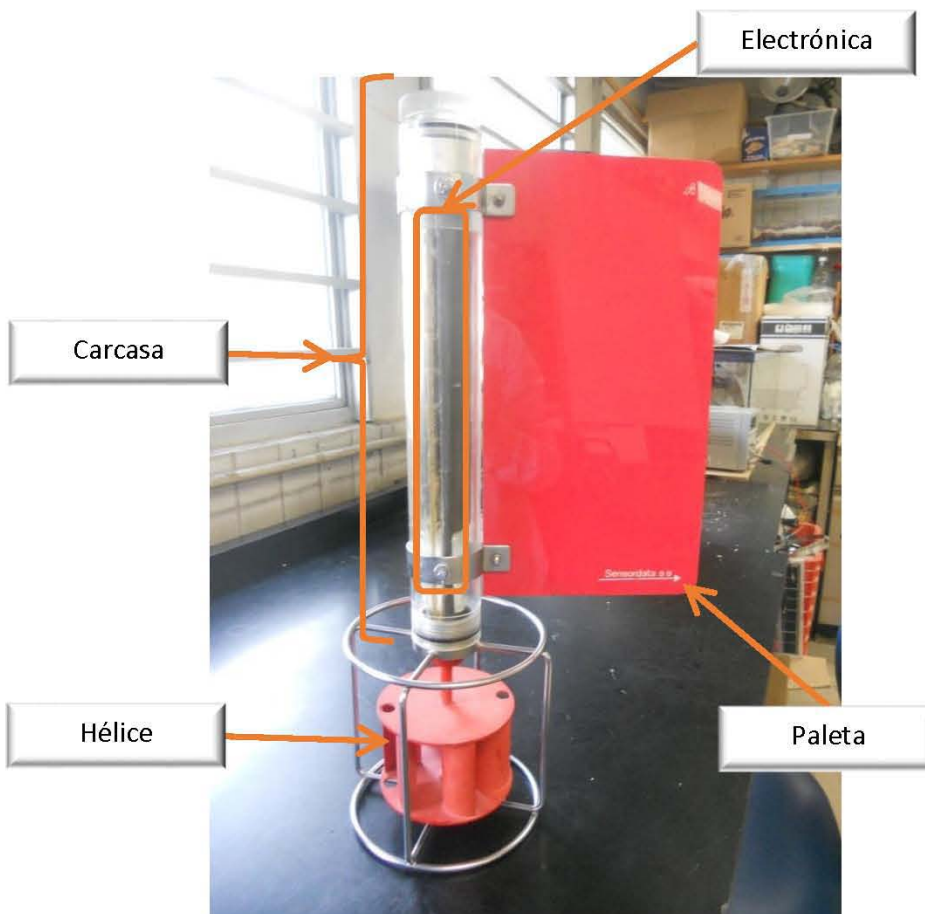


Figura 4.1 Correntómetro SENSOR DATA SD-4 y sus partes.

Para realizar la medición de la dirección de la corriente, el correntómetro contaba con una paleta que se orientaba en dirección de la corriente debido al empuje del agua sobre ella. El correntómetro tenía en su interior una brújula que, dependiendo de su orientación, hacía contacto con dos láminas para cerrar un circuito y que éste fuera leído e interpretado por la electrónica y expresado a manera de grados de rotación respecto al norte magnético terrestre. La resolución de este correntómetro para la orientación de la corriente, era de  $15^\circ$ .

La electrónica del correntómetro (figura 4.2) se sustituyó por nuevos sensores acoplados a una memoria ATMEGA328<sup>32</sup> previamente programada mediante el lenguaje ARDUINO<sup>33</sup>. Se conservó el principio de funcionamiento de la inducción magnética para conocer la velocidad de la corriente, incluso fue posible reutilizar el mismo interruptor magnético con el que se contaba. La brújula fue reemplazada por un sensor de orientación HMC5883L<sup>34</sup>, este sensor tiene una resolución de 0.5 grados. Se implementó un módulo portador de micro SD para almacenar los datos, ya que no es un aparato de monitoreo en tiempo real, sino un aparato registrador. Se consideró espacio para baterías de ion litio.

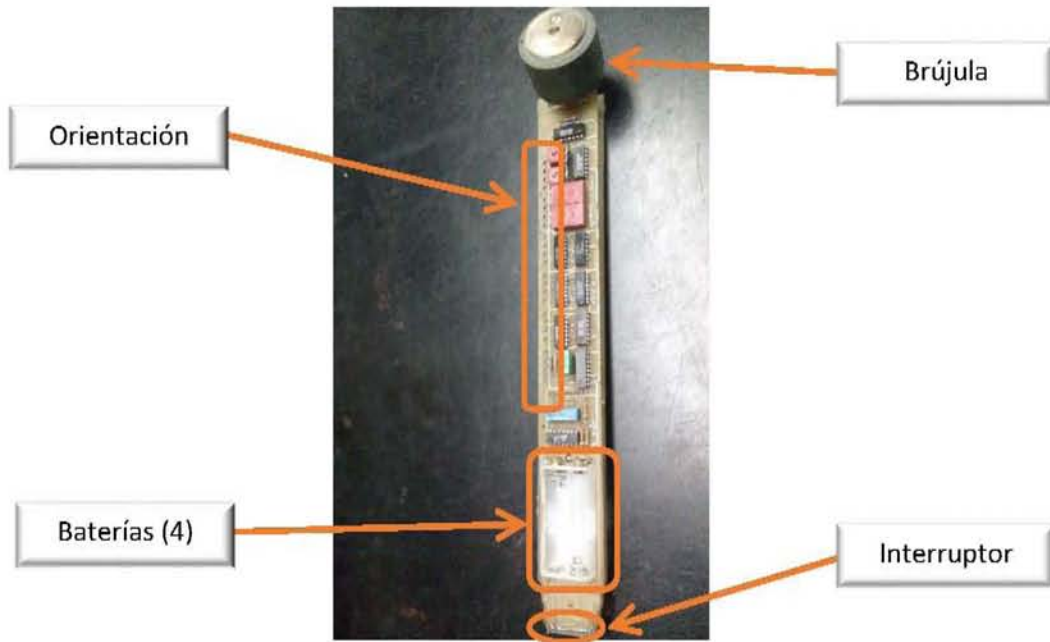


Figura 4.2 Componentes electrónicos.

Supongamos un caso hipotético en el cual se instala una planta OTEC tipo offshore de ciclo cerrado en la zona de la zona de Los Cabos sobre la isobata de 1000 m. Se quiere conocer el comportamiento de la corriente en la zona del agua de descarga, para dicho fin se está monitoreando de manera constante la corriente que se presenta en la desembocadura del agua de descarga, considerada a 60 m de profundidad para este ejemplo. En caso de que las mediciones sean realizadas con un correntómetro similar al discontinuado, cuya resolución es de 15°, estas mediciones nos llevarían a la conclusión de que el agua de descarga tendría un destino próximo a cualquier punto dentro de la franja de achurado verde (ver figura 4.3); por el contrario, usando un correntómetro con resolución de 0.5°, la conclusión en este caso hipotético es que el destino del agua de descarga será algún punto dentro de la línea roja, específicamente, Playa Divorcio. Esto bajo la consideración, improbable, de no encontrar corrientes en el camino.

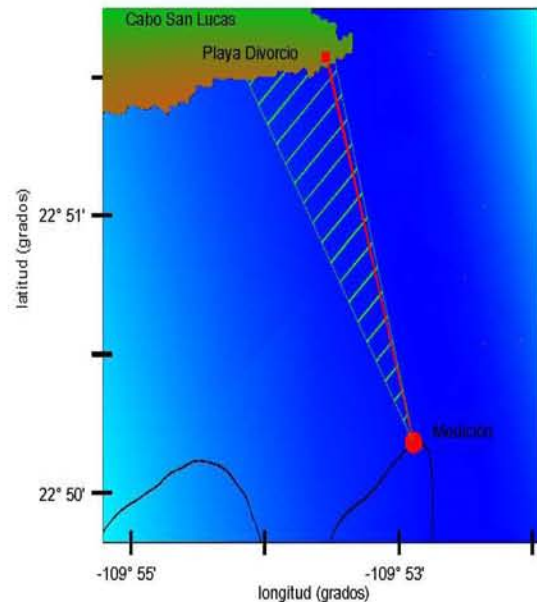


Figura 4.3 Destino hipotético del agua de descarga.

<sup>32</sup> Especificaciones técnicas en ANEXO I

<sup>33</sup> Código fuente de programación en ANEXO II

<sup>34</sup> Especificaciones técnicas en ANEXO I

### 4.3. Simulación y pruebas al correntómetro desarrollado

La simulación y pruebas del instrumento se realizaron dentro del laboratorio.

Se corroboró el buen funcionamiento de la brújula y del interruptor magnético.

La brújula presentó una pequeña diferencia de  $1^\circ$  en las medidas con respecto a otra brújula. Esta diferencia se mantuvo constante en todas las mediciones, así que únicamente se restó un grado a las mediciones para corregirlas.



Figura 4.4 Captura de pantalla de la aplicación para comunicarse con el correntómetro.

Por su parte, el interruptor magnético se calibró para realizar mediciones cada segundo, contando los pulsos magnéticos recibidos dentro de ese segundo. Las primeras pruebas consistieron en hacer girar el molinete del correntómetro de manera manual con pocas revoluciones (1 por segundo) y con muchas revoluciones (alrededor de 25 por segundo), verificando la existencia del archivo "datos.txt" en la memoria micro SD de 8 gigas. En dicho archivo se guardan los datos de la orientación, las revoluciones por segundo y el tiempo, en milisegundos, transcurrido desde la puesta en marcha del bucle hasta el momento de captura de los valores.

Para poder monitorear el funcionamiento del correntómetro en tiempo real, se agregó un módulo de comunicación por bluetooth HC-05 enlazado a una Tableta, la cual contenía una aplicación para plataforma Android desarrollada con ayuda de la herramienta MIT App Inventor 2. Los datos de orientación y revoluciones por segundo eran enviados y visualizados en la pantalla de la tableta. En la figura 4.4 se muestra la pantalla de visualización de datos, ambientada en la isla de Cozumel.

### 4.4. Funcionamiento del correntómetro en un ambiente acuático

El experimento se realizó en una alberca y el procedimiento para estudiar el funcionamiento del correntómetro fue el siguiente:

- Se comprobó la hermeticidad de la carcasa, así como su flotabilidad
- Se comprobó la comunicación bluetooth
- Se midió la orientación marcada por el correntómetro fuera del agua
- Se midieron las distancias que recorrería el correntómetro
- Se colocó una boya para mantener el correntómetro a media agua
- Se amarraron un par de cabos para arrastrar el correntómetro de una orilla a otra
- Se tomó el tiempo de recorrido para calcular la velocidad de arrastre y compararlo con los datos

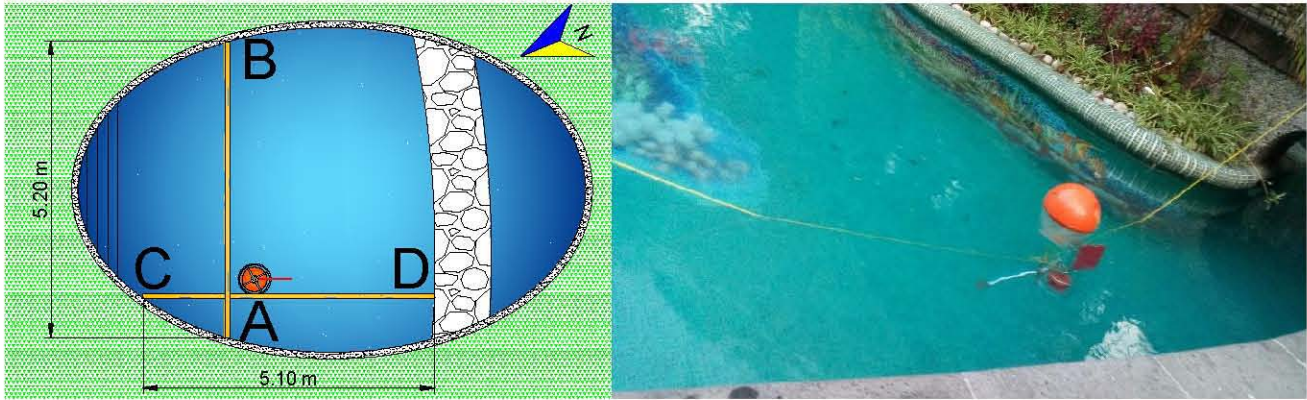


Figura 4.5 Recorridos del correntómetro.

## 4.5. Resultados observados de las pruebas al correntómetro

Una vez que el correntómetro se sumergió dentro del agua, se perdió la comunicación bluetooth, a pesar de que las ondas de este tipo pueden viajar a través del agua.

La pérdida de señal puede ser provocada por el cambio de medios que la señal debe traspasar. La fuente de la señal se encuentra dentro del correntómetro, aquí el primer medio es el aire contenido dentro de la carcasa, el segundo medio es el acrílico de la propia carcasa, el tercer medio es el agua de la alberca y el cuarto medio es el aire del medio ambiente. Estos cambios de medio modifican la frecuencia de una señal, así como su velocidad y ángulo. Esta puede ser la razón de que el receptor bluetooth no reconozca la señal emitida por la fuente. Una opción para mantener la comunicación podría ser la implementación de una antena emisora en contacto directo con el agua y una bocina receptora en contacto directo con el agua para que la señal no cruce varios medios de propagación, sino que toda la comunicación se efectúe por un medio líquido. Otra opción podría ser, el utilizar a la boya como antena emisora y trabajar con las señales propagándose por el aire. Este análisis queda fuera de los alcances de esta investigación, no obstante, representa un nuevo reto para solucionarse y obtener un instrumento de mayor innovación.

Una vez dentro del agua, el experimento se realizó primeramente de D a C y después de C a D. En la tabla se muestran estos datos y sus tiempos de recorrido. Cabe señalar que el correntómetro está programado para guardar datos cada 5 segundos.

|   | Transecto | Distancia [m] | Tiempo [s] | Velocidad [m/s] |
|---|-----------|---------------|------------|-----------------|
| 1 | C-D       | 5.1           | 15.52      | 0.33            |
| 2 | D-C       | 5.1           | 23.08      | 0.22            |
| 3 | C-D       | 5.1           | 17.59      | 0.29            |
| 4 | D-C       | 5.1           | 20.97      | 0.24            |
| 5 | C-D       | 5.1           | 14.29      | 0.36            |
| 6 | D-C       | 5.1           | 34.13      | 0.15            |

Tabla 14.- Tiempo de arrastre por transecto, velocidad teórica.



| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 1         | 23              | 0   | 90025                 |
|           | 20              | 0   | 95027                 |
|           | 19              | 1   | 100027                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 3         | 30              | 0   | 160043                |
|           | 33              | 1   | 165043                |
|           | 32              | 0   | 170045                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 5         | 15              | 0   | 210054                |
|           | 18              | 1   | 215055                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 2         | 217             | 0   | 120032                |
|           | 217             | 0   | 125034                |
|           | 216             | 0   | 130034                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 4         | 222             | 0   | 180047                |
|           | 228             | 0   | 185050                |
|           | 227             | 0   | 190050                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 6         | 224             | 0   | 225064                |
|           | 224             | 0   | 230065                |
|           | 217             | 0   | 235067                |
|           | 236             | 0   | 240067                |
|           | 234             | 0   | 245069                |
|           | 225             | 0   | 250070                |

Tabla 15.- Datos capturados en memoria SD de cada transecto.

Para filtrar los datos se eliminaron los primeros 10 segundos de medición ya que fue el tiempo aproximado transcurrido desde el inicio del programa hasta el primer arrastre. También se eliminó el intervalo de tiempo mientras se le daba vuelta al correntómetro para arrastrarlo hacia la dirección contraria.

Luego de este primer experimento, se cambió la dirección de arrastre de A a B y después de B a A. En la siguiente tabla se muestran estos datos y sus tiempos de recorrido.

| Transecto |     | Distancia [m] | Tiempo [s] | Velocidad [m/s] |
|-----------|-----|---------------|------------|-----------------|
| 7         | A-B | 5.2           | 23.00      | 0.23            |
| 8         | B-C | 5.2           | 35.11      | 0.15            |
| 9         | A-B | 5.2           | 21.98      | 0.24            |
| 10        | B-C | 5.2           | 29.31      | 0.18            |
| 11        | A-B | 5.2           | 18.38      | 0.28            |
| 12        | B-C | 5.2           | 37.97      | 0.14            |

Tabla 16.- Tiempo de arrastre por transecto, velocidad teórica.

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 7         | 304             | 0   | 360099                |
|           | 307             | 0   | 365101                |
|           | 305             | 0   | 370102                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 9         | 309             | 0   | 415111                |
|           | 309             | 0   | 420111                |
|           | 311             | 0   | 425112                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 11        | 295             | 0   | 470126                |
|           | 298             | 1   | 475126                |
|           | 295             | 0   | 480128                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 8         | 122             | 0   | 385104                |
|           | 120             | 0   | 390106                |
|           | 123             | 0   | 395106                |
|           | 125             | 0   | 400108                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 10        | 116             | 0   | 440119                |
|           | 118             | 0   | 445120                |
|           | 119             | 0   | 4501121               |
|           | 115             | 0   | 455122                |

| Transecto | Orientación [°] | RPS | Tiempo acumulado [ms] |
|-----------|-----------------|-----|-----------------------|
| 12        | 106             | 0   | 500131                |
|           | 117             | 0   | 505131                |
|           | 113             | 0   | 510134                |
|           | 117             | 0   | 515134                |
|           | 115             | 0   | 520135                |
|           | 120             | 0   | 525137                |

Tabla 17.- Datos capturados en memoria SD de cada transecto.

Analizando los datos se pudo comprobar que la brújula presenta un buen funcionamiento sin interferencia por estar debajo del agua. Por el contrario, debe calibrarse el interruptor magnético para funcionar a bajas velocidades, ya que los resultados muestran que solo percibe las velocidades mayores a los 0.28 m/s. Debido a esto, se realizó otro experimento para comprobar el funcionamiento de la programación para velocidades mayores.

El experimento consistió en arrastrar el correntómetro alrededor de la alberca, del punto E al F y del F al E, con una mayor velocidad. La distancia que recorrió el correntómetro en este nuevo experimento fue de 13 m.

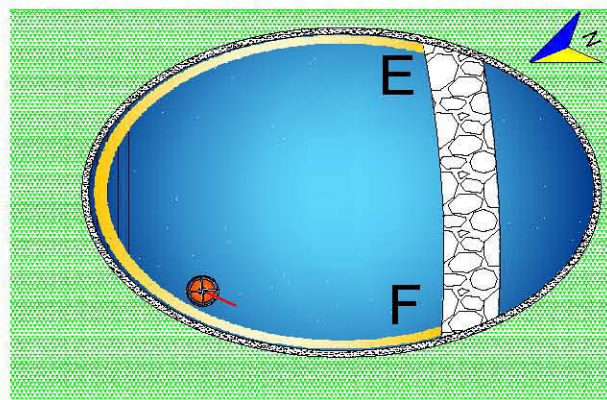


Figura 4.6 Recorridos del correntómetro alrededor de la alberca.

| Transecto | Distancia<br>[m] | Tiempo<br>[s] | Velocidad<br>[m/s] |
|-----------|------------------|---------------|--------------------|
| 13        | 13               | 20            | 0.65               |
| 14        | 13               | 24            | 0.54               |
| 15        | 13               | 21            | 0.62               |

Tabla 18.- Tiempo de arrastre alrededor de la alberca.

| Transecto<br>13 | Orientación<br>[°] | RPS | Tiempo<br>acumulado<br>[ms] |
|-----------------|--------------------|-----|-----------------------------|
|                 | 210                | 3   | 800200                      |
|                 | 150                | 3   | 805201                      |
|                 | 30                 | 3   | 810203                      |
|                 | 20                 | 2   | 815205                      |

| Transecto<br>14 | Orientación<br>[°] | RPS | Tiempo<br>acumulado<br>[ms] |
|-----------------|--------------------|-----|-----------------------------|
|                 | 200                | 2   | 825207                      |
|                 | 50                 | 2   | 830209                      |
|                 | 350                | 2   | 835210                      |
|                 | 25                 | 3   | 840212                      |

| Transecto<br>15 | Orientación<br>[°] | RPS | Tiempo<br>acumulado<br>[ms] |
|-----------------|--------------------|-----|-----------------------------|
|                 | 205                | 3   | 860218                      |
|                 | 160                | 3   | 865218                      |
|                 | 25                 | 3   | 870220                      |
|                 | 20                 | 3   | 875222                      |

Tabla 19.- Datos capturados en cada transecto.

Después de realizar este segundo experimento, se pudo comprobar el adecuado funcionamiento de la programación vinculada al interruptor magnético, ya que arrojaba mediciones de 3 revoluciones por segundo para velocidades que rondaban los 0.6 m/s. Comparando este dato contra los datos obtenidos en el primer experimento, se reafirma que se están entregando valores verdaderos, ya que se registraron valores de 1 revolución por segundo solamente para velocidades cercanas a 0.3 m/s.

Será necesario realizar modificaciones a la programación para que el correntómetro entregue valores de velocidades pequeñas.

# CAPÍTULO 5



## 5. IMPACTO AMBIENTAL

La presencia de elementos ajenos dentro de un espacio, provocará variaciones en los parámetros acostumbrados. El agua de descarga de una planta OTEC podría considerarse como una surgencia antropogénica, alterando los parámetros oceanográficos de la zona en la cual se descarga.

Si bien se cuenta con pocas plantas de este tipo alrededor del mundo que nos permitan realizar estudios precisos sobre su impacto ambiental, se han realizado algunas investigaciones y simulaciones sobre las posibles alteraciones que una planta OTEC provocaría dentro del área circundante.

En lo general se destaca que los impactos de una planta OTEC radican en el florecimiento de algunas especies y que, es necesario de al menos un año de estudio y almacenamiento de datos antes de la construcción e instalación de la planta para realizar un estudio apropiado.

Algunas de las conclusiones de las investigaciones sobre el impacto de una planta OTEC son:

- Se debe tomar en cuenta la profundidad de descarga óptima [Vega, 2009]
- Es necesario de al menos un año de monitoreo de los parámetros oceanográficos para estudiar el impacto del gradiente térmico [Comfort y Vega, 2011]
- Los posibles efectos ambientales radicarán en los cambios de temperatura [Rajagopalan y Nihous, 2012]
- Basándose en la operación de un sistema de aire acondicionado, los resultados podrían visualizarse a los dos años de operaciones [Comfort et al., 2013]
- Es necesario el mejoramiento en las instalaciones para aminorar el impacto [Kelley y Berg, 2013]

A continuación, se abordan algunos parámetros que pudieran resultar afectados ante la presencia del agua de descarga de una planta OTEC tipo offshore de ciclo cerrado. Empleando los datos teóricos de los estudios previos se plantean soluciones para aminorar el posible impacto ambiental.

### 5.1. Clorofila a

Dentro de los estudios previos de impacto ambiental, se menciona la probabilidad del aumento en la biomasa del nanoplancton y del fitoplancton, provocado por la elevación en los niveles de nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno. Tales incrementos pudieran amortiguarse y ser considerados como naturales si se parte de un buen diseño en la instalación y operación de la planta [Rocheleau y Grandelli, 2013].

La biomasa y producción de fitoplancton constituyen la base principal de las redes tróficas.

La biomasa puede ser estimada, de manera indirecta, midiendo la concentración de clorofila a ya que es el principal pigmento fotosintético [Gregor, 2004]

## 5.1.1. Monitoreo

Es necesario un monitoreo de los niveles de clorofila a. Con la clorofila a es posible evaluar el estado trófico de la zona del agua de descarga.

Una consecuencia de la eutrofización es el crecimiento masivo de algas, generando corrosión en equipos hidrológicos y dificultades en los procesos [Salas, 1990].

Un crecimiento excesivo de algas provocará una reducción de la zona fótica, causando que los organismos situados por debajo del nuevo nivel fótico, mueran, por no poder desarrollar fotosíntesis.

## 5.1.2. Estrategia para el monitoreo de la clorofila a

Basándose en el funcionamiento del fluorómetro con el que están equipados la mayoría de los CTD, se propone un instrumento para monitorear la clorofila a.

Un fluorómetro capta la luz fluorescente (roja, 682nm) que emite la clorofila a después de ser excitada por una fuente de radiación adecuada (azul, 425nm) [Pérez y Romero, 2001].

El espectro que emite la clorofila a se muestra en la figura 5.1. El diagrama de bloques del principio de funcionamiento del instrumento propuesto, y en general de cualquier fluorómetro tipo, se muestra en la figura 5.2.

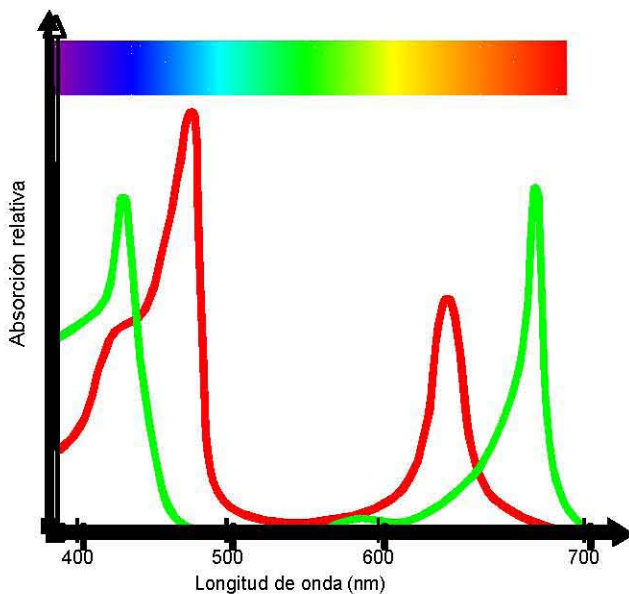


Figura 5.1 Espectro de absorción de la clorofila a (verde) y la clorofila b (rojo).

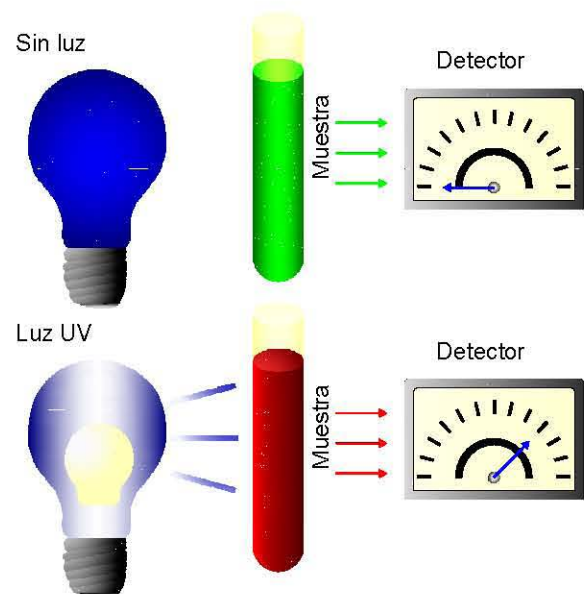


Figura 5.2 Diagrama de bloques del principio de funcionamiento de un fluorómetro.

Para llevar a cabo esta simulación de fluorómetro realicé los siguientes pasos:

- Utilicé como fuente de luz, un led azul de 425nm de longitud de onda
- Extraje clorofila de hojas de árbol trituradas dentro de un matraz con alcohol etílico
- Calibré una fotorresistencia para funcionar como sensor de luminosidad dentro de un rango de valores mapeados de 0 a 1024, donde 0 representa valores altos de incidencia de luz y 1024 valores muy bajos
- Preparé 5 soluciones de agua de mar con la clorofila extraída, las soluciones fueron al 0, 25, 50, 75 y 100%
- Coloqué las soluciones dentro de recipientes plásticos pintados de negro para evitar alteraciones provocadas por la incidencia de la luz ambiental. A dichos recipientes les hice un par de orificios del diámetro adecuado para el tamaño exacto de la fotorresistencia y el led
- Medí la luminosidad con y sin luz azul. Este experimento lo realicé 10 veces con resultados muy similares. Los resultados promediados se muestran en la tabla



Figura 5.3 Luz reflejada, concentración de clorofila 0%.



Figura 5.4 Luz reflejada, concentración de clorofila 100%.

| Muestra             | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| Concentración (%)   | 0    | 25   | 50   | 75   | 100  |
| Luminosidad sin luz | 1004 | 1004 | 1004 | 1004 | 1004 |
| Luminosidad con luz | 224  | 180  | 170  | 150  | 135  |

Tabla 20.- Luminosidad del agua de mar a diferentes concentraciones de clorofila. Mediciones realizadas en laboratorio.

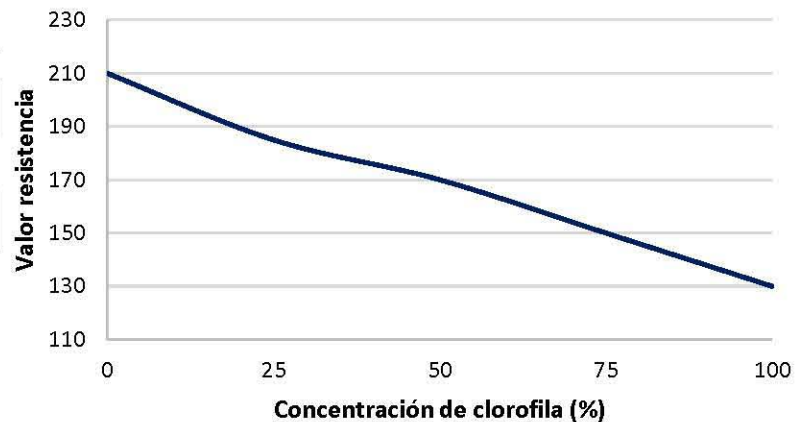


Figura 5.5 Incidencia de luz reflejada sobre la fotorresistencia.

Después de realizar el experimento y analizando la gráfica de resultados obtenidos, se puede observar que las variaciones de la intensidad de luz reflejada por las muestras sobre la fotorresistencia, presentan un comportamiento prácticamente lineal; Por lo cual es factible diseñar una carcasa que contenga el sensor propuesto y realizar mediciones sobre las variaciones en los niveles de clorofila presente en la zona del agua de descarga.

## 5.2. Temperatura

Como se mencionó anteriormente, el posible impacto radica en los cambios de temperatura que el agua de descarga provocará en la zona en la cual es descargada.

Existen poblaciones de fitoplancton móviles, las cuales realizan migraciones verticales diarias. Se sugiere que esta conducta es propiciada por el riesgo de depredación en las aguas superficiales y un bajo crecimiento en aguas más profundas.

En las migraciones verticales diarias son más importantes los gradientes verticales de temperatura que los gradientes de alimento [Loose y Davidowicz, 1994].

### 5.2.1. Monitoreo

Es indispensable un constante monitoreo de la temperatura del agua de descarga, ya que, para algunos organismos, los gradientes de temperatura son un obstáculo que representa alteraciones metabólicas.

### 5.2.2. Estrategia para el monitoreo de la temperatura

Es posible, y oportuno, conocer el comportamiento de la temperatura dentro de la columna de agua sobre la cual se habría de situar una planta OTEC. Al contar ya con una tubería de extracción de agua fría con una longitud aproximada de 700 m, podrían ser acoplados sensores de temperatura a profundidades estratégicas en busca de la profundidad idónea para la descarga; otra opción sería instalar una cadena de termistores tipo HOBO que, aunque no proporcionan monitoreo en tiempo real, resultan de fácil instalación y soportan profundidades de hasta 70 m. De la misma manera, sería necesario un monitoreo de la temperatura del agua de descarga.

Lo anterior con la finalidad de poder adaptar la profundidad en la cual, el agua de dicha profundidad, contará con una temperatura más próxima a la temperatura del agua de descarga y, con esto, reducir el gradiente térmico entre dichas aguas y aminorar así, el posible impacto ambiental.

## 5.3. Propuesta para monitorear el posible Impacto Ambiental

Debido a que la temperatura representa el parámetro oceanográfico con mayor potencial de Impacto Ambiental sobre la zona de descarga, es indispensable tener un constante y adecuado monitoreo de la temperatura dentro de la columna de agua como de la temperatura del agua de descarga.



### 5.3.1. Consideraciones previas

Para establecer una propuesta adecuada es necesario conocer los valores de la temperatura de la columna de agua.

Se tomó como referencia, y únicamente con la intención de ejemplificar el procedimiento a seguir para el cálculo de la temperatura del agua de descarga, la estación 5 de la campaña oceanográfica GOLCA-0308<sup>35</sup>, así como la estación 32 de la campaña oceanográfica GOLCA-0212<sup>36</sup> (ver figura 2.8). Dichos perfiles son propios del Golfo de California y serán distintos según la zona geográfica y su estacionalidad.

Para conocer el rango de profundidades adecuadas para la descarga, es necesario realizar un cálculo teórico de la temperatura que alcanzará el agua de descarga, así como el tener perfiles de temperatura realizados con la ayuda de un CTD mediante muestreos sistemáticos cada 2 semanas o un mes.

Para una planta OTEC de circuito cerrado de producción neta de 10MW; será necesario un volumen de 27.7 m<sup>3</sup>/s de agua fría a 4.5°C y 52.8 m<sup>3</sup>/s de agua cálida a 26°C [Vega, 2012].

De los resultados publicados, el valor necesario para el cálculo, es el valor del volumen de agua necesario para el ciclo, considerando que las diferencias de densidad y temperatura para este caso teórico, serían mínimas y podrían despreciarse.

Así entonces, los valores para calcular la temperatura del agua de descarga serían los mostrados en la siguiente tabla. Y la ecuación para el cálculo es la ecuación de cantidad de calor.

$$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$$

| Agua                      | Fría | Cálida |
|---------------------------|------|--------|
| Temperatura (°C)          | 6.8  | 30.6   |
| Volumen (m <sup>3</sup> ) | 27.7 | 52.8   |

Tabla 21.- Valores para el cálculo teórico de la temperatura del agua de descarga.

De la ecuación de calor:

$Q$ : es la cantidad de calor ganado o perdido en la mezcla expresada en Joule

$m$ : es la cantidad de masa de agua expresada en gramos

$C_e$ : es el calor específico de cada masa de agua (iguales en este análisis teórico) expresado en J/g°C

$\Delta T$ : es la diferencia de temperatura, temperatura final menos temperatura inicial expresadas en °C

También es posible considerar la capacidad térmica específica del agua cálida y fría como iguales, a pesar de las notables diferencias, esencialmente de densidad que tienen entre sí.

<sup>35</sup> La estación 5 se ubica dentro del Golfo de California y los datos de la campaña son públicos.

<sup>36</sup> La estación 32 se ubica dentro del Golfo de California y los datos de la campaña son públicos.

La capacidad térmica específica del agua con clorinidad del 0.5% al 22% con temperaturas de 5°C, 15°C, 25°C y 35°C, presenta diferencias entre  $\pm 0.0005$  (J/g°C) [Millero 1973].

Como primer paso se debe conocer la masa del agua cálida y el agua fría involucradas en la mezcla. Para ello, primeramente, se debe conocer la densidad aproximada de cada una. Utilicé la herramienta libre para dicho cálculo encontrada en: <https://www.easycalculation.com/es/physics/classical-physics/water-density.php>. Los resultados se muestran en la figura 5.6.

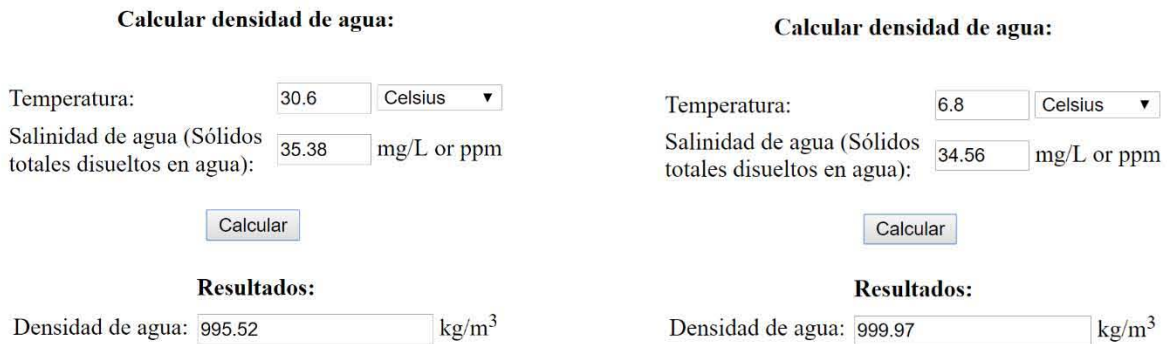


Figura 5.6 Densidad del agua según su temperatura y salinidad. Agua superficial a la izquierda (2 m), agua profunda a la derecha (785 m).

Para calcular la masa del agua, utilicé la ecuación de la densidad  $\rho = \frac{m}{V} \therefore m = \rho \cdot V$

| Agua                          | Fría     | Cálida   |
|-------------------------------|----------|----------|
| Temperatura (°C)              | 7.3      | 24.2     |
| Salinidad (UPS)               | 34.58    | 35.35    |
| Volumen (m <sup>3</sup> )     | 27.7     | 52.8     |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 999.94   | 997.3    |
| Masa (g)                      | 27699169 | 52563456 |

Tabla 22.- Valores para el cálculo teórico de la temperatura del agua de descarga. Agosto 2003.

Se sabe que la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura del agua fría al momento de mezclarse con el agua cálida, es igual al calor necesario para enfriar el agua cálida al momento de mezclarse con el agua fría.

Para el agua cálida que pierde calor:

$$Q = 52563456 \cdot C_e \cdot (30.6 - T_f)$$

Para el agua fría que gana calor:

$$Q = 27699169 \cdot C_e \cdot (T_f - 6.8)$$

Igualando las ecuaciones:

$$52563456 \cdot C_e \cdot (30.6 - T_f) = 27699169 \cdot C_e \cdot (T_f - 6.8)$$

Considerando la capacidad térmica específica como iguales:

$$52563456 \cdot (30.6 - T_f) = 27699169 \cdot (T_f - 6.8)$$

Despejando y resolviendo llegué al resultado de  $T_f = 22.38^\circ\text{C}$ .

| Agua                          | Fría     | Cálida   |
|-------------------------------|----------|----------|
| Temperatura (°C)              | 6.8      | 30.6     |
| Salinidad (UPS)               | 34.56    | 35.38    |
| Volumen (m <sup>3</sup> )     | 27.7     | 52.8     |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 999.97   | 995.52   |
| Masa (g)                      | 27699169 | 52563456 |

Tabla 23.- Valores para el cálculo teórico de la temperatura del agua de descarga. Diciembre 2002.

Siguiendo el mismo procedimiento, calculé la temperatura del agua de mezcla, para un cambio de temperatura superficial del agua de mar debido al cambio de estación climática. Para este nuevo caso los valores se muestran en la tabla siguiente.

El valor de temperatura del agua de descarga para este nuevo caso será:

$$T_f = 18.37^{\circ}C.$$

Después de realizar los cálculos teóricos, se encuentra que el valor mínimo de temperatura del agua de descarga será de 18.37°C y la temperatura máxima será de 22.38°C, es decir, la temperatura del agua de descarga será de 20.37±2°C.

Única y específicamente para este ejemplo, se concluiría que: el agua de descarga tendría una temperatura de 18.37°C para el mes de diciembre de 2002, dicha temperatura se ubicaría a una profundidad de 60 m aproximadamente, por otro lado, tendría una temperatura de 22.38°C para agosto de 2003, la cual se ubicaría a 35 m<sup>37</sup>. Estos resultados indican que el rango de profundidad para ubicar el agua de descarga, se encuentra de 35 a 60 m, es decir, un rango de 25 m.

Es necesario conocer el perfil de temperatura de la columna de agua sobre la cual estará una planta OTEC, para ello se deben realizar muestreos sistemáticos con la ayuda de un CTD, ya que la dinámica a lo largo de la columna de agua es muy variable. Una vez que se obtienen los perfiles de temperatura, se pueden proponer las profundidades adecuadas para que el agua de descarga no altere la temperatura de la zona.

Cabe resaltar que estas profundidades están calculadas para valores específicos de temperatura dentro del Golfo de California. Para un diseño exacto, se deberán tomar todas las consideraciones y parámetros oceanográficos propios y característicos del lugar en el cual se ubicará la planta OTEC.

<sup>37</sup> Los perfiles de cada estación se muestran en la figura 2.8.

# CAPÍTULO 6



## 6. CONCLUSIONES

Es posible seguir desarrollando el prototipo de laboratorio de la planta OTEC, al cual se le incluyan un mayor número de sensores, sobretodo sensores de presión bien calibrados y estratégicamente ubicados para tener lecturas más precisas que las obtenidas con los manómetros analógicos. Es necesario hacer uso de una turbina/generador real acoplada al prototipo, ya que de esta manera se podría monitorear en tiempo real la generación eléctrica respecto al gradiente térmico suministrado, con estos valores la eficiencia eléctrica podría ser monitoreada constantemente, e incluso podría ser extrapolada y pronosticada dependiendo de las condiciones de temperatura de alguna zona en particular.

Es recomendable seguir utilizando y desarrollando prototipos a nivel de laboratorio, para realizar estudios y mediciones con diferentes tipos de fluidos de trabajo, así como para la capacitación de personal en caso de la instalación de una planta OTEC.

El desarrollo de instrumentación propia constituye un punto fundamental para el monitoreo en torno a una planta OTEC, este desarrollo implica tener un amplio conocimiento sobre el funcionamiento de nuestros instrumentos, además de tener la posibilidad de realizarles las modificaciones, tanto estructurales como de programación necesarias, para adecuar nuestro instrumento exactamente a las exigencias y variables oceanográficas que se nos presenten en cualquier zona.

Un monitoreo constante nos permitirá conocer las variaciones de las condiciones fisicoquímicas en la zona de descarga, para con ello monitorear un posible Impacto Ambiental en esta zona.

Es posible construir y/o adaptar instrumentos de bajo costo para el monitoreo en una planta OTEC y su entorno. El correntómetro bidireccional desarrollado en el laboratorio rindió excelentes resultados utilizando la carcasa original y sustituyendo por completo la electrónica por nuevos dispositivos de menor tamaño y con mayores capacidades de almacenamiento, precisión y rendimiento.

# REFERENCIAS

## LIBROS:

AVERY, William H. (1994). *Renewable energy from the ocean a guide to OTEC*. New York: Oxford.

BENSON, Keith R. (1993). *Oceanographic history. The pacific and beyond*. United States of America: University of Washington Press.

CLAUDE, Jorge. (1902). *La electricidad al alcance de todos*. Barcelona: Fidel Giró.

EMILSSON, Ingvar. (1981). *Elementos de Oceanografía Física. Apuntes de clase*. México: UNAM.

FU, Lee-Leung. (1982). *SEASAT views oceans and sea ice with synthetic-aperture radar*. Pasadena, California: National Aeronautics and Space Administration.

LINKLATER, Eric. (1972). *The voyage of the Challenger*. New York: Doubleday and Company, Inc.

MIGUÉLEZ POSE, Fernanda. (2009). *La energía que viene del mar*. España: Netbiblo, S. L.

MULTON, Bernard. (2012). *Marine renewable energy handbook*. Great Britain and United States: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.

PÉREZ, M.; Romero, J. (2001). *Prácticas de ecología oceánica*. Edicions de la Universitat de Barcelona. España.

RENVOIZÉ, Vincent. (2014). *Physique PC-PC\* eText: Cours complet avec tests, exercices et problèmes corrigés*. France: Pearson Education France.

SOTO, Luis. (1998). Departamento de Oceanografía Física CICESE: *Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California*. México: CICESE.

## TESIS:

AVIÑA JIMÉNEZ, Héctor Miguel. (2007). *Factibilidad de instalar una planta OTEC (conversión de la energía térmica del océano) en las costas de México*.

BÁRCENAS GRANIEL, Juan Francisco. (2014). *Evaluación del potencial de conversión de energía renovable en el mar caribe mexicano*.

LÓPEZ ESQUIVEL, Raúl Isac. (2013). *Prototipo para el sistema de sensado de la operación de una planta de biogás instalada en Ciudad Universitaria Parte 1*.

## ARTÍCULOS:

COMFORT, Christina; Vega, Luis. *Environmental Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion in Hawaii*. Hawaii Natural Energy Institute. Hawaii National Marine Renewable Energy Center. Hawaii, USA. Pp8.

COMFORT, Christina; Ostrander, C.; McManus, M.; Karl, D.; Luther, D.; Vega, L. 2013. *Observing ocean changes at the nation's first SWAC system*. University of Hawaii SOEST. Symposium presentation. Dp 9.

GREGOR, J.; Marsálek, B. 2004. *Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A Comparative Study of in vitro, in vivo and in situ Methods*. The Academy of Sciences of the Czech Republic. Water Research. Vol.38. Pp 517-522.

KELLEY, C.; Berg, F. 2013. *Submersible survey along of Honolulu Sea Water Air Aconditioning LLC Pipe Route to Provide Data for their environmental impact statement*. Hawaii Undersea Research Laboratory, University of Hawaii; Honolulu Seawater Air Aconditioning LLC. Hawaii, USA. Simposium presentation. Dp 9.

LOOSE, C.; Dawidowicz, P. 1994. *Trade-off in diel vertical migration by zooplankton*. Ecology 75(8), 2255-2263.

MARTÍ, José A.; Plocker, Thomas J.; Laboy, Manuel A. J. 2008. *Implementación comercial de la conversión de energía océano termal: Aspectos ambientales e implicaciones socio económicas*. San Juan, Puerto Rico.

MILLERO, Frank; Perron, G.; Desnoyers, J. 1973. *Heat Capacity of Seawater Solutions from 5° to 35°C and 0.5 to 22% Chlorinity*. Journal of Geophysical Research 78, 4499-4507.

MCDUGALL, Trevor J. 1987. *Thermobaricity, cabbeling, and water-mass conversión*. Journal of Geophysical Research 92 (C5), 5448-5464.

TOMCZAK, Matthias. 1999. *Some historical, theoretical and applied aspects of quantitative water mass analysis*. Journal of Marine Research 57, 275-303.

RAJAGOPALAN, L.; Nihous, G. 2012. *An Assessment of global Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) resources under broad geographical constraints*. School of Ocean an Earth Science & Technology. University of Hawaii. Simposium presentation. Dp 8.

ROCHELEAU, G.; Grandelli, P. 2013. *Biochemical simulation of a 100 MW OTEC plume*. Makai Ocean Engineering. Hawaii, USA. Simposium presentation. Dp 8.

RODEN, G. 1964. *Oceanographic aspects of the Gulf of California*. American Association of Petroleum Geologist, Tulsa, pp. 30-58.

SALAS, H.; Martino, P.; 1990. *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos trópicos*. CEPIS/OPS-HPE. Pp 20-31.

VEGA, Luis A. (2002/2003). *Ocean Thermal Energy Conversion Primer*. Marine Technology Society Journal 6 (4), 25-35.

VEGA, Luis A. 2007. *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): Electricity and desalinated water production*. Offshore Infrastructure Associates, Inc.

VEGA, Luis A. 2009. *OTEC Environmental Impact: Historical Perspective*. University of Hawaii. USA. HINMREC-HNEI-UH & Lockheed Martin Maritime Systems & Sensors. Pp 57.

VEGA, Luis A. 2010. *Ocean Thermal Energy Conversion History*. University of Hawaii: Manoa.

VEGA, Luis A. 2012. *Ocean Thermal Energy Conversion History*. University of Hawaii: Manoa.

#### REFERENCIAS DE INTERNET:

Historico.oepm.es. (2016). *Claude, Georges - Museo Virtual - Oficina Española de Patentes y Marcas*. [En línea]. Disponibilidad: <[http://historico.oepm.es/museovirtual/contenido/grandes\\_inventores\\_ficha.asp?tipo=INVENTOR&idm=es&sep=6&xml=Georges%20Claude](http://historico.oepm.es/museovirtual/contenido/grandes_inventores_ficha.asp?tipo=INVENTOR&idm=es&sep=6&xml=Georges%20Claude)> [Fecha de consulta: 4 de mayo de 2016].

Brown, Martin G. (2016). *IOA Newsletter vol.13 No.4/Winter 2002*. [En línea] Disponibilidad: <[http://www.clubdesargonautes.org/otec/vol/vol13-4-2.htm#1.Ocean Thermal Energy Conversion. OTEC](http://www.clubdesargonautes.org/otec/vol/vol13-4-2.htm#1.Ocean%20Thermal%20Energy%20Conversion.%20OTEC)> [Fecha de consulta: 5 de mayo de 2016].

Gauthier, Michel. (2016). *IOA Newsletter Vol.11, No.4/Winter 2000*. [En línea] Disponibilidad: <<http://www.clubdesargonautes.org/otec/vol/vol11-4-2.htm>> [Fecha de consulta: 8 May. 2016].

Sites.google.com. (2016). *2. Origen de la electrónica - CIRCUITOS ELECTRONICOS*. [En línea] Disponibilidad: <<https://sites.google.com/site/tecnocircuito/origen-de-la-electronica>> [Fecha de consulta 9 Mayo de 2016].

www.comunidadelectronicos.com, L. (2016). *Historia de la Electrónica*. [En línea] Disponibilidad: <<http://www.comunidadelectronicos.com/articulos/historia.htm>> [Fecha de consulta 9 May. 2016].

Clubdesargonautes.org. (2016). *IOA Newsletter Vol.11, No.2/Summer 2000*. [online] Available at: <http://www.clubdesargonautes.org/otec/vol/vol11-2-1.htm> [Accessed 8 Jun. 2016].

Cec.uchile.cl. (2016). *Ciclos de Vapor*. [En línea] Disponibilidad: <[http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap\\_08/cic-vapor.htm](http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_08/cic-vapor.htm)> [Fecha de consulta: 11 de mayo de 2016].

Vega, L. A. (2016). *OTEC overview, by L.A. Vega, Ph.D.* [En línea] Disponibilidad: <<http://www.otecnews.org/portal/otec-articles/ocean-thermal-energy-conversion-otec-by-l-a-vega-ph-d/>> [Fecha de consulta: 11 de mayo de 2016].





- Brújula

## Compass Module 3-Axis HMC5883L (#29133)

The Compass Module 3-Axis HMC5883L is a low-field magnetic sensing device with a digital interface. The compass module converts any magnetic field to a differential voltage output on 3 axes. This voltage shift is the raw digital output value, which can then be used to calculate headings or sense magnetic fields coming from different directions. The module is designed for use with a large variety of microcontrollers with different voltage requirements.

### Features

- 3-Axis magneto-resistive sensor
- 1 to 2 degree compass heading accuracy
- Wide magnetic field range (+/-8 gauss)
- Fast 160 Hz maximum output rate
- Precision in-axis sensitivity and linearity
- Measures Earth's magnetic field, from milli-gauss to 8 gauss



### Key Specifications

- Power Requirements: 2.7 to 6.5 VDC
- Communication Interface: I<sup>2</sup>C (up to 400 kHz)
- Operating temperature: -22 to +185 °F (-30 to +85 °C)
- Dimensions: 0.73 x .65 in ( 1.8 x 1.7 cm)

### Application Ideas

- Auto and personal navigation
- UAV systems
- Robotic navigation
- Location-based services (LBS)

### Resources and Downloads

Check for the latest version of this document, free software, and example programs from the Compass Module 3-Axis HMC5883L product page. Go to [www.parallax.com](http://www.parallax.com) and search for part number 29133.

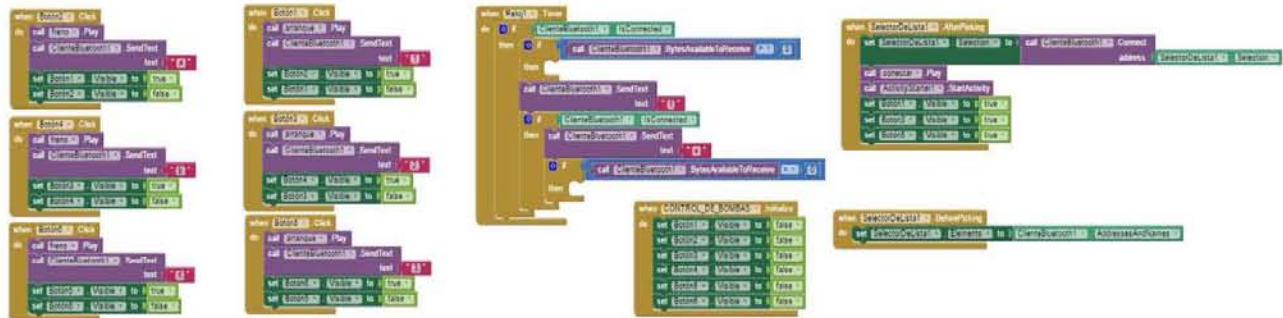
## ANEXO II. CÓDIGOS FUENTES DE PROGRAMACIÓN GRÁFICAS TERMODINÁMICAS

El primer código utilizado para las simulaciones es el del monitoreo de temperatura y voltaje generado, así como el control de arranque y paro de las bombas y el accionamiento de válvulas.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>
SoftwareSerial blue(3,2);
Servo servo;
DeviceAddress Temperatura1;
int DS18S20_Pin = 4;
OneWire ds(DS18S20_Pin);
DallasTemperature sensors(&ds);
float TemperaturaA;
float input_voltage = 0.0;
float voltage=0.0;
float r1=100000.0;
float r2=9500.0;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  blue.begin(9600);
  servo.attach(7);
  servo.write(30);
  pinMode(13,OUTPUT);
  pinMode(12,OUTPUT);
  pinMode(11,OUTPUT);
  pinMode(10,OUTPUT);
  digitalWrite(13,LOW);
  digitalWrite(12,LOW);
  digitalWrite(11,LOW);
  digitalWrite(10,LOW);
}
void loop()
{
  char c = blue.read();
  if(c=='5') servo.write(120);
  if(c=='4') digitalWrite(10,HIGH);
  if(c=='3') digitalWrite(13,HIGH);
  if(c=='2') digitalWrite(12,HIGH);
  if(c=='1') digitalWrite(11,HIGH);
  if(c=='e') servo.write(30);
  if(c=='d') digitalWrite(10,LOW);
  if(c=='c') digitalWrite(13,LOW);
  if(c=='b') digitalWrite(12,LOW);
  if(c=='a') digitalWrite(11,LOW);
  if(c=='v') {int analog_value = analogRead(A0);
    voltage = (analog_value * 5.0) / 1024.0;
    input_voltage = voltage / (r2/(r1+r2));
    blue.print("          ");
    blue.println( input_voltage );
  }
  if(c=='t') {sensors.requestTemperatures();
    TemperaturaA = sensors.getTempCByIndex(0);
    blue.print("          ");
    blue.println( TemperaturaA);
  }
}
```

```
delay(1);
```

Para la aplicación desarrolla en MIT App Inventor 2, se programó a manera de bloques.



La interfaz con el usuario se puede apreciar en la figura 3.2.

Para contar los pulsos generados por el paso del refrigerante a través del flujómetro se utilizó el siguiente programa.

```
unsigned long contador=0,anterior,actual;
void setup() {
  pinMode(7,INPUT_PULLUP);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  anterior=digitalRead(7);
  delay(1);
  actual=digitalRead(7);
  if((anterior==0)&&(actual==1))
  {
    contador=contador+1;
    Serial.println(contador);
  }
}
```

Para evaluar la incidencia de luz sobre la fotorresistencia y realizar el estudio de clorofila presente se utilizó el ejemplo de la librería del módulo sensor que el fabricante proporciona.

```
// Example Sketch for Keyes K853518 LDR Module (Light Dependent PhotoResistor).
// It reads the voltage at the OUT Pin and displays it on the console. The value should
// range from 0 to 1024. The lower the value the lower the light. The higher
// the value means more light being received by the LDR.
// Written by cactus.io. For more details and how to hookup the Keyes K853518 LDR module to
// the Arduino then visit this link.
// http://cactus.io/hookups/sensors/light/ldr/hookup-arduino-to-keyes-k853518-light-sensor-module
int OUT_Pin = A0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Keyes K853518 LDR Module Example Sketch | cactus.io");
}
void loop() {
  Serial.println(analogRead(OUT_Pin));
  delay(500);
}
```

El programa final que se utilizó para el correntómetro fue el siguiente.

```
#include<SoftwareSerial.h>
```

```

SoftwareSerial blue(3,2);
#include <FreqCount.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_HMC5883_U.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
File Archivo;
Adafruit_HMC5883_Unified mag = Adafruit_HMC5883_Unified(12345);
int error = 0;
const int releReedPin = 5;
int estadoRele;
int ultimoEstadoRele;
unsigned long timer = 0;
unsigned long timer_actual = 0;
unsigned long retardo = 5000;
unsigned long rps;
void displaySensorDetails(void)
{
  sensor_t sensor;
  mag.getSensor(&sensor);
  delay(1500);
}

void setup()
{
  pinMode(releReedPin, INPUT);
  Wire.begin();
  FreqCount.begin(1000);
  if(!mag.begin())
  {
    /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
    //Serial.println("Ooops, no HMC5883 detected ... Check your wiring!");
    while(1);
  }
  delay(1000);
  blue.begin(9600);
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Comenzando la comunicación con la tarjeta SD");
  pinMode(10, OUTPUT);
  if (!SD.begin(10)){
    Serial.println("Se ha producido un fallo al iniciar la comunicación");
    return;
  }
  Serial.println("Se ha iniciado la comunicación correctamente");
  if (SD.exists("datos.txt")){
    Archivo = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);
    if (Archivo){
      Serial.println("Archivo nuevo, Escribiendo encabezado (fila 1)");
      Archivo.println("Tiempo (ms), RPM, ORIENTACION");
    } else{Serial.println("Error creando el archivo datos.txt");
    }
  }
}

void loop()
{
  timer=millis();
  sensors_event_t event;
  mag.getEvent(&event);
  float declinationAngle = 0.22;
  heading += declinationAngle;
  if(heading < 0)
    heading += 2*PI;
  if(heading > 2*PI)
    heading -= 2*PI;
  int headingDegrees = heading * 180/M_PI;
  //Serial.print("Heading (degrees): "); Serial.println(headingDegrees);
  estadoRele = digitalRead(releReedPin);// Lee el estado del rele

```

```

if (estadoRele != ultimoEstadoRele) {
    if (estadoRele == HIGH) {
        unsigned long count = FreqCount.read();
        int rps=(count/2);
        blue.println(headingDegrees);
        blue.print(",");
        blue.print(rps);
        blue.print(",");
    }
}
ultimoEstadoRele = estadoRele; // Guarda el estado actual como ultimo estado
if (timer > timer_actual + retardo){
    Archivo = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);
    Serial.print ("ENVIANDO A SD");
    Archivo.print("RPS: ");
    Archivo.println(rps);
    Archivo.print("ORIENTACION: ");
    Archivo.println(headingDegrees);
    //Archivo.print("Tiempo desde el inicio: ");
    //Archivo.println(millis());
    Archivo.close();
    timer_actual=timer;
}
}

```

### Pulsos por minuto del flujómetro sin gradiente térmico.

```

COM3 (Arduino/Genuino Uno)
Rele ON
vuelta 137
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 54
Rele OFF
Rele ON
vuelta 138
Tiempo por revolucion: 90
Revoluciones por minuto: 55
Rele OFF
Rele ON
vuelta 139
Tiempo por revolucion: 90
Revoluciones por minuto: 55
Rele OFF
Rele ON
vuelta 140
Tiempo por revolucion: 90
Revoluciones por minuto: 55
Rele OFF
Rele ON
vuelta 141
Tiempo por revolucion: 89
Revoluciones por minuto: 56
Rele OFF

```

Autoscroll    Sin ajuste de línea    9600 baudio

Capturas de pantalla del monitoreo de las rpm producidas con diferentes gradientes térmicos. (A)  $\Delta=20^{\circ}\text{C}$ . (B)  $\Delta=22^{\circ}\text{C}$ . (C)  $\Delta=28^{\circ}\text{C}$ . (D)  $\Delta=35^{\circ}\text{C}$ . (E)  $\Delta=38^{\circ}\text{C}$ . (F)  $\Delta=41^{\circ}\text{C}$ . (G)  $\Delta=44^{\circ}\text{C}$ .

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

```

Rele ON
vuelta 688
Tiempo por revolucion: 86
Revoluciones por minuto: 58
Rele OFF
Rele ON
vuelta 689
Tiempo por revolucion: 90
Revoluciones por minuto: 55
Rele OFF
Rele ON
vuelta 690
Tiempo por revolucion: 90
Revoluciones por minuto: 55
Rele OFF
Rele ON
vuelta 691
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 54
Rele OFF
Rele ON
vuelta 692
Tiempo por revolucion: 90
Revoluciones por minuto: 55
Rele OFF
Rele ON
vuelta 693
Rele OFF
  
```

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

```

Rele ON
vuelta 1616
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 54
Rele OFF
Rele ON
vuelta 1617
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 54
Rele OFF
Rele ON
vuelta 1618
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 54
Rele OFF
Rele ON
vuelta 1619
Tiempo por revolucion: 92
Revoluciones por minuto: 54
Rele OFF
Rele ON
vuelta 1620
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 54
Rele OFF
  
```

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

```

Rele ON
vuelta 507
Tiempo por revolucion: 85
Revoluciones por minuto: 58
Rele OFF
Rele ON
vuelta 508
Tiempo por revolucion: 87
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
Rele ON
vuelta 509
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 54
Rele OFF
Rele ON
vuelta 510
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 54
Rele OFF
Rele ON
vuelta 511
Tiempo por revolucion: 90
Revoluciones por minuto: 55
Rele OFF
  
```

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

```

Rele ON
vuelta 323
Tiempo por revolucion: 89
Revoluciones por minuto: 58
Rele OFF
Rele ON
vuelta 324
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
Rele ON
vuelta 325
Tiempo por revolucion: 90
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
Rele ON
vuelta 326
Tiempo por revolucion: 90
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
Rele ON
vuelta 327
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
  
```

Autoscroll Sin ajuste de línea 960 Autoscroll Sin ajuste de línea 960 Autoscroll Sin ajuste de línea 960 Autoscroll Sin ajuste de línea 9600 baudio

(A)

(B)

(C)

(D)

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

```

Rele ON
vuelta 1079
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
Rele ON
vuelta 1080
Tiempo por revolucion: 89
Revoluciones por minuto: 58
Rele OFF
Rele ON
vuelta 1081
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
Rele ON
vuelta 1082
Tiempo por revolucion: 89
Revoluciones por minuto: 58
Rele OFF
Rele ON
vuelta 1083
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
  
```

Autoscroll Sin ajuste de línea 9600 baudio

(E)

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

```

Rele ON
vuelta 3663
Tiempo por revolucion: 84
Revoluciones por minuto: 62
Rele OFF
Rele ON
vuelta 3664
Tiempo por revolucion: 93
Revoluciones por minuto: 56
Rele OFF
Rele ON
vuelta 3665
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
Rele ON
vuelta 3666
Tiempo por revolucion: 92
Revoluciones por minuto: 56
Rele OFF
Rele ON
vuelta 3667
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 57
Rele OFF
  
```

Autoscroll Sin ajuste de línea 9600 baudio

(F)

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

```

Rele ON
vuelta 2648
Tiempo por revolucion: 88
Revoluciones por minuto: 61
Rele OFF
Rele ON
vuelta 2649
Tiempo por revolucion: 92
Revoluciones por minuto: 59
Rele OFF
Rele ON
vuelta 2650
Tiempo por revolucion: 92
Revoluciones por minuto: 59
Rele OFF
Rele ON
vuelta 2651
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 59
Rele OFF
Rele ON
vuelta 2652
Tiempo por revolucion: 91
Revoluciones por minuto: 59
Rele OFF
  
```

Autoscroll Sin ajuste de línea 9600 baudio

(G)

