

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

Desarrollo de prototipo para la generación de energía undimotriz en el Litoral del Pacífico de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por
***Mario José Ardón Carballo, Álvaro Contreras Morales,
Cristina de Los Ángeles Domínguez y Sebastián Siero Asturias***
para optar al grado académico de
Licenciados en Ingeniería Civil.

Guatemala
2013

Megaproyecto

*Desarrollo de prototipo para la generación de energía undimotriz
en el Litoral del Pacífico de Guatemala*

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

Desarrollo de prototipo para la generación de energía undimotriz en el Litoral del Pacífico de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por
***Mario José Ardón Carballo, Álvaro Contreras Morales,
Cristina de Los Ángeles Domínguez y Sebastián Siero Asturias***
para optar al grado académico de
Licenciados en Ingeniería Civil.

Guatemala
2013

Vo. Bo.:

(F) Tatiana Lopera
Ingeniera Tatiana Lopera

Tribunal examinador:

(F) Roberto Godo Levensen
Ing. Roberto Godo Levensen

(F) Tatiana Lopera
Ingeniera Tatiana Lopera

(F) Orión Asturias
Arq. Orión Asturias

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de noviembre de 2013.

PREFACIO

La idea del proyecto surge después de analizar la relación entre dos de los problemas que afectan no sólo a Guatemala sino a todo el mundo: el alto costo de la energía eléctrica y la degradación ambiental. Con el paso de los años, muchos países han optado por la generación de energía eléctrica mediante recursos renovables; encontrando así soluciones económicamente viables y con un impacto ambiental casi nulo.

El primer reto que se encontró durante la realización de este proyecto fue investigar qué tipo de energía renovable es la adecuada para instalar en el país; para responder a esta pregunta se realizó una investigación acerca de los recursos naturales con los que se cuenta, dicha investigación nos llevó a la siguiente conclusión: Guatemala es un país costero rodeado de dos grandes océanos (Pacífico y Atlántico), los cuales cuentan con un alto potencial energético dispuesto a ser utilizado para su aprovechamiento. El mar es un recurso dinámico e inagotable del cual se puede generar energía mediante diversas formas, tales como: las olas, las corrientes marinas, las mareas, la presión osmótica y la temperatura. Tras estudiar las distintas formas de generación de energía a partir del mar, se definió que el método que se emplearía sería la generación de energía a partir de las olas, es decir, la implementación de energía undimotriz o energía de las olas debido a su factibilidad de instalación en Guatemala, específicamente en el Litoral del Pacífico, ya que en este lugar se obtiene una mayor altura de ola que en las costas del Atlántico. Tras realizar la investigación, surgió la interrogante que le daría sentido y dirección al proyecto: ¿qué mecanismo se utilizaría para lograr el aprovechamiento de la energía undimotriz de forma eficiente, de fácil instalación y económicamente factible? Para responder dicha interrogante se llevó a cabo el desarrollo de un prototipo, tomando en

cuenta datos del lugar de instalación, materiales de construcción, teoría hidráulica aplicada en el mismo, impacto ambiental y estudios legales para su instalación.

Agradecemos principalmente a Dios por habernos dado la sabiduría y el entendimiento necesario para culminar nuestros estudios; a nuestras familias por el apoyo incondicional a lo largo de nuestra formación universitaria y a nuestros asesores por su constante ayuda durante el desarrollo del proyecto.

ÍNDICE

PREFACIO	v
ÍNDICE	vii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABLAS	xv
RESUMEN	xvii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	3
III. OBJETIVOS	4
A General	4
B Específicos	4
IV. ANTECEDENTES	7
A. Energía undimotriz	8
1. Definición	8
2. Modalidades implementadas	9
3. Ventajas de desventajas de la energía undimotriz	32
4. Capacidad de instalación en Guatemala	33
B Energía maremotérmica	36
1. Características generales	36
2. Capacidad de generación	39
3. Maquinaria	41
4. Costo de instalación y mantenimiento	46
5. Ventajas y desventajas	47
6. Factibilidad en Guatemala	49
C Energía mediante corrientes marinas	51
1. Características generales	51
2. Maquinaria utilizada	57
3. Capacidad de generación y costos de instalación y mantenimiento	64
4. Ventajas y desventajas	67
5. Capacidad de instalación en Guatemala	67
D Energía mareomotriz	70
1. Características generales	70
2. Maquinaria y elementos del proyecto	72
3. Capacidad de generación	73
4. Costo de instalación y mantenimiento	74
5. Ventajas	77
6. Desventajas	77
7. Capacidad de instalación en Guatemala	77

1. Prototipo 1	82
2 .Prototipo 2	84
B. Funcionamiento de los sistemas	85
1. Prototipo 1	85
2. Prototipo 2	86
C. Procedimiento de diseño de construcción y ensamblaje de los sistemas	87
1. Prototipo 1	88
2. Prototipo 2	89
D. Materiales implementados para la construcción de los sistemas	95
1 .Prototipo 1	95
2 .Prototipo 2	97
E .Fotografías del prototipo	102
VI. MEJORAMIENTO DEL MODELO	106
A. Recomendación de nuevos materiales	107
1. Materiales recomendados para las boyas	107
2, Materiales recomendados para el pistón	108
3. Materiales recomendados para la instalación de tubería	108
4. Tratamientos anticorrosivos	109
5. Materiales recomendados para una base	109
B. Mejoras en el proceso de construcción	110
1. Proporcionar estabilidad	110
2. Flexibilidad ante cambios	111
3. Válvula Manifold más eficiente	111
4. Protección a los componentes del sistema	112
C. Mejoras en el funcionamiento	112
1. Implementación de un embalse	113
2 .Sistema combinado	113
3. Modificación de la tubería	114
4. Modificaciones a la turbina	114
5. Modificaciones de bajo costo	115
D. Métodos alternativos para su instalación	116
1. Colocación de prototipos de forma paralela	116
2. Instalación de tubería flexible	116
3 .Combinación de métodos	117
VII. TEORÍA HIDRÁULICA APLICADA	118
A. Análisis de las olas	119
1. Origen de las olas	119
2. Clasificación de las olas	120
3 .Comportamiento y características de las olas generadas por el viento	123

4. Teoría de ondas lineal	127
5. Teoría de ondas no lineal	135
B. Ecuación del caudal	139
C. Principio de Arquímedes (Fuerza boyante)	140
D. Cilindro hidráulico de movimiento lineal	140
1. Funcionamiento básico	140
2. Tipos de cilindros hidráulicos	141
E. Presión hidráulica	142
F. Ecuación de Bernoulli	143
G. Número de Reynolds	143
H. Pérdidas por fricción en una tubería	145
I. Pérdidas localizadas en una tubería	147
J. Potencia	149
K. Conceptos generales de turbinas hidráulicas: funcionamiento y clasificación	150
VIII. CÁLCULOS Y RESULTADOS	153
A. Análisis de las olas	154
1. Características del oleaje	154
2. Determinación de teoría de ondas a aplicar	156
3. Teoría de ondas no lineal	157
B. Análisis del prototipo	161
1. Funcionamiento teórico	163
2. Funcionamiento práctico	171
C. Análisis del sistema	172
1. Funcionamiento del sistema	172
2. Cálculo de la velocidad del agua en la salida de la tubería	173
D. Potencia generada por el sistema	180
1. Potencia teórica	180
2. Potencia real	181
E. Potencia generada por el sistema en el lugar de instalación	182
1. Determinación de factor de conversión	182
2. Redimensionamiento del prototipo	185
IX. DEMOSTRACIÓN DEL PRINCIPIO HIDRÁULICO	197
X. RECURSOS MARINOS Y COSTEROS EN EL PACÍFICO DE GUATEMALA	207
A. Delimitación y zonificación de la zona costera	208
B. Estado de los ecosistemas de la zona costera de Guatemala	209
1. Manglares	209
2. Importancia ecológica y ambiental del ecosistema de las tortugas marinas	211
3. Los recursos pesqueros	212
C. Presiones sobre los ecosistemas marinos y costeros	221
1. Contaminación ambiental	221

2. Seguridad portuaria	222
D. Principales respuestas para la gestión de los ecosistemas marinos y costeros	223
E. Batimetría en la Costa del Pacífico guatemalteco	226
XI. DETERMINACIÓN UBICACIÓN IDEAL PARA LA INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO	231
A. Pesca y contaminación	232
B. Parlamas y manglares	238
C. Análisis región ideal	239
XII. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE Y FACTORES QUE AFECTAN SU FUNCIONAMIENTO	249
A. Impacto ambiental de la hidrodinámica	250
B. Dispositivos como hábitats artificiales	251
C. Ruido	252
D. Riesgos de navegación	253
E. Efectos visuales	253
F. Construcción del dispositivo	253
G. Conversión y transmisión de energía	254
XIII. GENERACION POR MEDIO DE WAVE POWER PROJECT-LYSEKIL	256
XIV. ASPECTOS LEGALES	259
A. Ministerio de Energía y Minas (MEM)	262
1. Funciones del MEM:	262
2. Política Energética de Guatemala	266
3. Sistema eléctrico	267
4. Autorizaciones para la instalación de centrales generadoras	268
5. Registro para centrales generadoras menores a 5 MW	273
B. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE)	273
1. Sistemas bajo la regulación de la CNEE	275
2. Sistema de transporte:	277
3. Sistema de distribución:	277
C. Leyes y reglamentos para la generación e interconexión a la red SIN (Sistema Nacional Interconectado)	278
1. Ley general de electricidad y su reglamento	279
2. Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable	279
3. Ley de GDR (Generación Distribuida Renovable)	280
D. Administrador del mercado mayorista (AMM)	282
E. Ministerio de ambiente y recursos naturales (MARN)	283
1. Dirección General del Cumplimiento legal	284
2. Dirección General de Gestión Ambiental	284
3. Estudio de impacto ambiental (EIA)	285
XV. ANÁLISIS ECONÓMICO	288
XVI. DISCUSIÓN	291
A. Antecedentes	291
1. Energía de las corrientes marinas	291

3 .Energía Undimotriz	292
B. Diseño y construcción del prototipo a escala	292
C. Mejoramiento del modelo	293
D. Teoría hidráulica aplicada, cálculos y resultados	293
E. Potencia generada por el sistema en el lugar de instalación	294
F. Demostración del principio hidráulico	295
G. Determinación ubicación ideal para la instalación del prototipo	295
H. Factores que afectan su funcionamiento	295
I .Efectos en el medio ambiente	296
XVII. CONCLUSIONES	296
XVIII. RECOMENDACIONES	300
XIX. BIBLIOGRAFÍA	305
XX. ANEXOS	313
A. Energía por medio de las corrientes marinas	313
B. Desarrollo de la hoja de cálculo electrónica	317
1. Cinemática de las olas	317
2. Teoría de ondas no lineal	318
3. Análisis del prototipo	319
4. Análisis del sistema	320
5. Potencia en el lugar de instalación	321
C. Formulario y guía para solicitud de registro	325
XXI. TERMINOLOGÍA	341

LISTA DE FIGURAS

1	PELAMIS TIPO P-750 INSTALADA EN COSTAS PORTUGUESAS	10
2	PELAMIS Y SUS COMPONENTES EXTERNOS	11
3	UNO DE LOS ESLABONES QUE CONFORMAN LA PELAMIS Y SUS COMPONENTES INTERNOS.	11
4	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE COLUMNA DE AGUA OSCILANTE	12
5	IMAGEN DE UNA TURBINA WELLS	15
6	VISTA EXTERNA DE LA PLANTA OWC EN MUTRIKU, ESPAÑA.	16
7	VISTA DE LAS TURBINAS EN EL INTERIOR DEL SISTEMA OWC.	16
8	DIAGRAMA DE COMPONENTES DEL SISTEMA TAPCHAN.	17
9	SISTEMA WAVEROLLER INSTALADO EN ORKNEY, ESCOCIA.	18
10	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA WAVEROLLER.	18
11	SISTEMA WAVE DRAGON EN LA INDIA.	19
12	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL WAVE DRAGON.	20
13	SISTEMA SDE INSTALADO EN LAS COSTAS DE CHINA.	21
14	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA SDE.	21

15	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA CETO.	22
16	INSPECCIÓN DE BOYAS CETO.	23
17	VISTA INTERIOR DE LA PLANTA PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BAJO EL SISTEMA CETO.	24
18	MODELO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA SSG.	24
19	DIAGRAMA DE TURBINA MULTITAPA UTILIZADA PARA EL SISTEMA SSG.	25
20	DIAGRAMA DE COMPONENTES DE UNA BOYA SALTER DUCK.	27
21	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA SALTER DUCK EN SERIE.	27
22	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA POWERBUOY.	28
23	POWERBUOY FUERA DEL AGUA.	29
24	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE BOMBEO DEL SISTEMA SEARASER.	30
25	SISTEMA SEARASER EN FUNCIONAMIENTO PARA PRUEBAS DE CAMPO.	31
26	COMPARACIÓN ENTRE PROPIEDADES DE OLEAJE ENTRE PORTUGAL Y GUATEMALA.	34
27	COMPARACIÓN ENTRE PROPIEDADES DE OLEAJE ENTRE ESPAÑA Y GUATEMALA.	34
28	ESQUEMA DE UNA CENTRAL MAREMOTÉRMICA.	37
29	ZONAS DEL MUNDO TÉRMICAMENTE FAVORABLES.	38
30	CENTRAL MAREMOTÉRMICA UBICADA MAR ADENTRO.	42
31	ESQUEMA CONCEPTUAL DE UNA CENTRAL MAREMOTÉRMICA DE CICLO ABIERTO.	43
32	ESQUEMA CONCEPTUAL DE UNA CENTRAL MAREMOTÉRMICA DE CICLO CERRADO.	44
33	ESQUEMA CONCEPTUAL DE UNA CENTRAL MAREMOTÉRMICA DE CICLO HÍBRIDO.	45
34	PRINCIPALES CORRIENTES MARINAS ALREDEDOR DEL MUNDO.	54
35	ESQUEMA DE LA TURBINA TIPO LÀNSTRØM. [2]	59
36	DISEÑO PRELIMINAR DE UNO DE LOS PROYECTOS DE SCOTTISH POWER. [2]	59
37	BOSQUEJO DE LA TURBINA SEAGEN. [2]	61
38	SISTEMA SEAGEN INSTALADO EN STRANGFORD LOUGH, UK.	61
39	BOSQUEJO DEL SISTEMA THAWT. [2]	62
40	VISTA DE PERFIL DE UN DISPOSITIVO VIVACE. [2]	63
41	BOSQUEJO DEL SISTEMA VIVACE INSTALADO. [2]	64
42	COMPARACIÓN DE LA POTENCIA GENERADA MEDIANTE LOS DISTINTOS PROTOTIPOS ESTUDIADOS. [2]	66
43	BOSQUEJO DEL ÁREA DE COBERTURA DEL SISTEMA THAWT. [2]	66
44	CICLO MAREAS Y PRODUCCIÓN.	71
45	BARRERA DE LA CENTRAL SEVERN. UK.	73
46	PROMEDIO DIFERENCIAL DE ALTURAS.	78
47	ALTURAS PLEAMAR.	79
48	ALTURAS BAJAMAR.	79
49	VISTA EN PLANTA DEL SISTEMA DESCARTADO.	83
50	VISTA EN ELEVACIÓN DEL SISTEMA DESCARTADO.	83
51	VISTA EN PLANTA DEL SISTEMA A UTILIZAR.	84
52	VISTA EN ELEVACIÓN DEL SISTEMA A UTILIZAR.	85
53	VISTA EN ELEVACIÓN DEL SISTEMA A UTILIZAR.	86

54	SISTEMA DE CONEXIÓN.	88
55	CONEXIÓN ENTRE SISTEMA DE TIPO T, MANGUERAS DE ENTRADA Y DE SALIDA.	88
56	CONEXIÓN EN LA TUBERÍA DE ENTRADA DE AGUA EN EL SISTEMA.	89
57	CONEXIÓN DEL PISTÓN AL SISTEMA.	89
58	BASE CON EL PISTÓN Y BOYAS INSTALADAS.	90
59	PREPARACIÓN DE LA MANGUERA.	91
60	INSTALACIÓN DE MANGUERA Y CHEQUES DE ENTRADA.	92
61	INSTALACIÓN DE MANGUERA Y CHEQUES DE SALIDA.	92
62	ENSAMBLAJE DEL MANIFOLD.	93
63	ALINEACIÓN DEL EJE DEL PISTÓN CON LAS POLEAS.	94
64	ENSAMBLAJE DEL PISTÓN.	94
65	FIGURA 65. INSTALACIÓN DE CHEQUES.	102
66	FIGURA 66. CHEQUES INSTALADOS.	102
67	FIGURA 67. PISTÓN 1 INSTALADO.	103
68	PISTÓN 1 INSTALADO.	103
69	CEBANDO PISTÓN 1.	103
70	PISTÓN 1 FUNCIONANDO, VISTA LATERAL.	103
71	PISTÓN 1 FUNCIONANDO.	103
72	AJUSTES PISTÓN.	103
73	AJUSTES PISTÓN 2.	103
74	INSTALANDO PISTÓN 1 + PISTÓN 2.	104
75	PISTÓN 2 INSTALADO.	104
76	MANIFOLD INSTALADO.	104
77	PISTÓN 1 + PISTÓN 2 INSTALADO.	105
78	MODELO DE UN SISTEMA COMBINADO (TUBERÍA A PRESIÓN Y EMBALSE).	114
79	REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS TIPOS DE OLAS QUE EXISTEN EN LA SUPERFICIE DEL OCEANO Y DE LA ENERGÍA CONTENIDA EN ELAS.	121
80	ACCIÓN DE UN VIENTO CONSTANTE SOBRE UNA ZONA DETERMINADA DEL MAR.	123
81	MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS DE AGUA EN UNA OLA.	125
82	INFLUENCIA DEL FONDO EN EL DESPLAZAMIENTO VERTICAL DE LAS ÓRBITAS.	126
83	DIFERENCIA ENTRE UNA ONDA SINUSOIDE Y UNA ONDA TROCOIDE.	127
84	ESQUEMA DE UNA OLA LA LINEAL.	129
85	ESQUEMA DE LA OLA NO LINEAL DE STOKES.	136
86	ESQUEMA DE LA OLA SOLITARIA.	138
87	CILINDRO HIDRÁULICO DE SIMPLE EFECTO, DOBLE EFECTO, GUIADO Y ROTACIÓN.	142
88	DEMOSTRACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBINA DE ACCIÓN (TIPO PELTON).	151
89	DEMOSTRACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBINA DE REACCIÓN.	152
90	DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES DE LAS OLAS EXPERIMENTALMENTE.	155
91	PERFIL DE UNA OLA TROCOIDAL Y ESQUEMA DEL DESPLAZAMIENTO VERTICAL.	157
92	ESQUEMA DE LAS ETAPAS DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.	162
93	ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO TEÓRICO DEL PROTOTIPO.	163

94	REPRESENTACIÓN DEL FACTOR EXPERIMENTAL DE ALTURA.	167
95	ESQUEMA DE LAS BOYAS.	168
96	ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO PRÁCTICO DEL PROTOTIPO.	171
97	DIAGRAMA EXPLICATIVO DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.	173
98	ESQUEMA DE LA ALTURA INICIAL Y FINAL DEL SISTEMA.	175
99	DIAGRAMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA CAJA UNIFICADORA DE CAUDAL.	178
100	DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LA CAJA UNIFICADORA DE CAUDAL.	178
101	OLEAJE DEL PUERTO DE SAN JOSÉ, ESCUINTLA, GUATEMALA.	183
102	OLEAJE DE LAS COSTAS DEL PACÍFICO.	183
103	GRÁFICO CAUDAL (M ³ /S) VS. SALTO DE AGUA (M).	191
104	DETERMINACIÓN DE LA AMPLITUD DE LAS OLAS EXPERIMENTALMENTE.	200
105	DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE LAS OLAS EXPERIMENTALMENTE.	200
106	DISEÑO DEL PROTOTIPO.	201
107	COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.	201
108	PROTOTIPO INSTALADO VERTICALMENTE.	202
109	PROTOTIPO ADECUADO A LA BASE HORIZONTAL.	202
110	ENSAYO CON BOYAS PEQUEÑAS.	203
111	CON BOYAS GRANDES.	203
112	DEMOSTRACIÓN DEL FACTOR EXPERIMENTAL DE ALTURA.	204
113	CAJA UNIFICADORA DE CAUDAL.	205
114	MANGLARES.	210
115	PLAYAS DE ANIDACIÓN PARLAMAS.	211
116	DETALLE PESCA CON PALANGRE.	212
117	PESCA ARTESANAL PALANGRE DE SUPERFICIE.	213
118	DETALLE PESCA ARRASTRE INDUSTRIAL.	214
119	PESCA DE ARRASTRE INDUSTRIAL.	215
120	DETALLE PESCA RED CERCO.	217
121	PESCA RED DE CERCO.	217
122	CONTAMINACIÓN POR ÁREAS URBANAS.	221
123	PRINCIPALES PUERTOS.	223
124	ÁREAS PROTEGIDAS.	225
125	BATIMETRÍA COSTA DEL PACÍFICO.	226
126	RUTA 1 RETALHULEU.	227
127	RUTA 2 SUCHITEPÉQUEZ.	228
128	RUTA 3 ESCUINTLA-JUAN GAVIOTA.	229
129	RUTA 4 SANTA ROSA-ESCUINTLA-PUERTO QUETZAL.	230
130	PESCA ARTESANAL PALANGRE DE SUPERFICIE/CONTAMINACIÓN.	233
131	PESCA DE ARRASTRE INDUSTRIAL/CONTAMINACIÓN.	234
132	PESCA RED CERCO/CONTAMINACIÓN.	236
133	PLAYAS ANIDACIÓN PARLAMAS/MANGLARES.	238

134	CONJUNTO DE MAPAS.	239
135	REGIÓN IDEAL.	241
136	REGIÓN IDEAL/PESCA ARTESANAL PALANGRE DE SUPERFICIE.	242
137	REGIÓN IDEAL/PESCA DE ARRASTRE INDUSTRIAL.	244
138	REGIÓN IDEAL/PESCA RED CERCO.	244
139	REGIÓN IDEAL/CONTAMINACIÓN.	246
140	REGIÓN IDEAL VIABLE.	248
141	SUB ESTACIONES Y LÍNEAS DE TRANSPORTE.	255
142	MODELO WAVE POWER PROJECT-LYSEKIL.	257
143	ENCRUSTAMIENTO.	258
144	INSPECCIONES REALIZADAS DURANTE JULIO Y AGOSTO DE 2007.	258
145	SUBSECTOR ELÉCTRICO.	264
146	MERCADO ELÉCTRICO.	266
147	EMPRESAS DISTRIBUIDORAS.	278

LISTA DE TABLAS

1	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ.	32
2	REPORTE DE OLEAJE NACIONAL DURANTE LOS MESES DE JULIO, AGOSTO Y SEPTIEMBRE DE 2013.	35
3	VELOCIDAD DE CORRIENTES DEL OCÉANO PACÍFICO EN LAS COSTAS DE GUATEMALA. [30]	69
4	COMPARACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE CORRIENTES PROMEDIO DE STANGFORD, U.K. Y LAS COSTAS DEL OCÉANO PACÍFICO. [30]	69
5	COSTO DE MW INSTALADO.	75
6	PROYECTOS MAREOMOTRICES.	76
7	PRONÓSTICO PROMEDIO DE MAREAS.	80
8	VALORES DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA.	145
9	LONGITUD EQUIVALENTE EN DIÁMETROS DE LOS ACCESORIOS DE UNA TUBERÍA.	147
10	RESULTADOS DE LAS DIMENSIONES DE LAS OLAS MEDIANTE ENSAYOS EXPERIMENTALES.	155
11	RADIO DE LA ÓRBITA DEL MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS DE AGUA SEGÚN SU PROFUNDIDAD.	156
12	CÁLCULO DE LA RELACIÓN H/λ .	156
13	DESPLAZAMIENTO EN Y DE LAS OLAS DEL CANAL DEL LUGAR DE LOS ENSAYOS.	158
14	ECUACIONES DE CELERIDAD SEGÚN LA PROFUNDIDAD DE LAS AGUAS.	159
15	ECUACIONES DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD DE LA PARTÍCULA DE AGUA SEGÚN SU PROFUNDIDAD.	160
16	VALORES DE LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD DE LA PARTÍCULA DE AGUA.	160
17	FACTOR EXPERIMENTAL DE ALTURA DE LAS BOYAS.	168
18	DIMENSIONES DE LAS BOYAS.	168

19	VOLUMEN DE AGUA DESPLAZADO POR LAS BOYAS.	168
20	FUERZAS BOYANTES CALCULADAS.	170
21	POTENCIA GENERADA POR EL PROTOTIPO A ESCALA EN EL LUGAR DE INSTALACIÓN.	184
22	CANTIDAD DE SISTEMAS A ESCALA REQUERIDOS PARA GENERAR LA POTENCIA NECESARIA REQUERIDA POR DOS TIPOS DE FOCOS.	185
23	VALORES TOMADOS DEL PROTOTIPO A ESCALA NECESARIOS PARA REDIMENSIONARLO.	186
24	DATOS BÁSICOS DEL OLEAJE EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO DE GUATEMALA.	186
25	VALORES DEL CAUDAL Y LA ALTURA PIEZOMÉTRICA DEL NUEVO SISTEMA.	190
26	COMPARACIÓN ENTRE TURBINAS DE ACCIÓN.	191
27	ENERGÍA CONSUMIDA MENSUALMENTE POR UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR PROMEDIO.	194
28	MEDICIONES DE LAS OLAS Y EL CANAL DE OLAS.	199
29	CÁLCULO DEL CAUDAL PRÁCTICO.	206
30	ESPECIES COMERCIALES PACÍFICO.	218
31	RESUMEN FLOTAS LITORAL PACÍFICO.	219
32	ÁREAS PROTEGIDAS EN LA ZONA PACÍFICO MARINO COSTERA DE GUATEMALA.	224
33	COSTOS INICIALES.	289
34	COSTOS MANTENIMIENTO.	289
35	GENERACIÓN.	289
36	BALANCE NETO DEL PROYECTO.	290

RESUMEN.

El proyecto consiste en la realización de un prototipo de sistema capaz de generar energía a partir de medios marítimos autosostenibles. Al inicio se investigaron todos los tipos de energía accesibles provenientes de este medio, obteniendo una búsqueda completa para realizar una mejor selección sobre cuál será la utilizada para el desarrollo del proyecto. Para esta investigación se establecieron algunos parámetros como: Características generales, maquinaria implementada, cantidad de energía generada, etc. Luego de verificar que el método de energía undimotriz era el que mejor se aplicaba a este proyecto, se procedió a realizar una investigación aún más profunda entre los que se incluye: procesos de fabricación del sistema, factores que influyen en el funcionamiento de este equipo, efectos en el medio ambiente, principios hidráulicos que describen matemáticamente el funcionamiento del sistema en general y los factores económicos y legales involucrados en la realización del mismo. Al mismo tiempo, se realiza un análisis sobre los antecedentes del proceso seleccionado, como avances tecnológicos, en otras partes del mundo.

Luego de seleccionar el tipo de energía más adaptable a las condiciones nacionales, y por lo mismo, al propósito del proyecto, se procedió a desarrollar la siguiente fase del proyecto. Esta fase consistió en tomar el análisis detallado de la fase anterior e implementarlo en el diseño y creación de un dispositivo capaz de generar energía. Para esto, se hicieron distintas pruebas al prototipo construido, para encontrar posibles ajustes que mejorarían su funcionamiento. Estos análisis forman parte de la última fase de este proyecto.

Finalmente, se procedió a la tercera fase del proyecto, la cual consistió en evaluar un área de instalación considerando aspectos económicos, sociales, ambientales y políticos que permitan el funcionamiento del prototipo en aguas nacionales. Se estudiaron las condiciones, tanto del terreno como de las aguas, a las que se expondrá el prototipo para

así evaluar su funcionamiento. Seguidamente a esto se analizaron los costos que implican la realización y mantenimiento del prototipo en escala real y se evaluó junto con los ingresos de la energía que se genera. Finalmente, se investigaron todos los aspectos legales para la instalación del prototipo real y los procesos a seguir con instituciones gubernamentales, principalmente el Ministerio de Energía y Minas.

I. INTRODUCCIÓN

La energía undimotriz es energía eléctrica que se genera a partir de la energía mecánica contenida en el movimiento de las olas, este es un tipo de energía renovable debido a que proviene de una fuente natural e inagotable como lo es el mar. Según un boletín de disponibilidad de energía emitido por la UNESCO en el año 2009^[47], la cantidad de energía undimotriz disponible en todo el planeta es de aproximadamente 200 GW (1752 TWh al año); si se considera que el consumo de energía eléctrica anual en Guatemala registrado en el 2011 según la International Energy Agency fue de 7.93 TWh^[25]; se concluye que apenas el 0.45% de la energía undimotriz mundial podría satisfacer los requerimientos eléctricos de nuestro país. El mar es un recurso que posee un gran potencial energético y aun así no se ha sabido aprovechar del todo. En Guatemala, la energía renovable más utilizada es la Energía Hidráulica, la cual ha llegado a cubrir hasta un 57.8% de la demanda energética del país, mediante centrales hidroeléctricas; sin embargo, no se han llevado a cabo investigaciones que contemplen la posibilidad de generar energía a partir del mar.

El proyecto tiene como finalidad desarrollar un prototipo económicamente factible, de fácil instalación en el país con el cual se genere energía eléctrica a partir de las olas del Litoral del Pacífico. Se inició investigando y analizando estudios previos implementados exitosamente en distintas partes alrededor del mundo. Para analizar cuál de estos se adapta de mejor manera a las características del país. Luego, se definió el método que mostrara la mayor eficiencia para empezar el diseño de un prototipo funcional. Para esto se utilizaron programas de dibujo y se realizaron pruebas de laboratorio para analizar las condiciones de funcionamiento del prototipo, el alcance con respecto a la cantidad esperada de generación y las mejoras para aumentar su eficiencia.

Finalmente, se fabricó un prototipo capaz de generar un caudal lo suficientemente aceptable como para considerar un proceso externo de generación de

energía eléctrica. Se concluye que el funcionamiento y las partes que componen este sistema son los que se esperarían a un nivel experimental, tomando en cuenta las limitaciones del laboratorio de hidráulica donde se realizaron los análisis. Asimismo, se finalizó el proyecto con la búsqueda de ubicaciones para su instalación a escala real y en un ambiente marino y con la sugerencia de posibles mejoras que pueden considerarse de acuerdo a su funcionamiento, materiales utilizados, condiciones de montaje y al proceso de ensamblaje del prototipo.

II. JUSTIFICACIÓN

Debido a la gran degradación ambiental causada por la generación de energía mediante procesos fósiles o nucleares, el hombre se ha visto en la obligación de buscar nuevas alternativas para la generación de energía. Estas alternativas se describen como energías renovables, las cuales se definen como métodos extractores de energía utilizando recursos inagotables que nos ofrece la naturaleza, entre ellos se encuentra la luz solar, el viento y el mar.

El índice de consumo de energía eléctrica en el país ha crecido significativamente en los últimos años, del año 2010 al 2011 creció un 3.36% y del 2011 al 2012 tuvo un crecimiento de 4.2%^[33]; conforme el consumo aumenta, aumenta el costo de la misma; por lo tanto, es necesario optar por nuevas formas de generación que sean limpias, efectivas y factibles para mejorar la economía del país.

Actualmente existe un gran número de países que se encuentra desarrollando sistemas para el aprovechamiento de los recursos renovables debido a la necesidad de disminuir el costo de la energía eléctrica y que esta sea más accesible para toda la población. En Guatemala se han llevado a cabo investigaciones para la mayor parte de las energías renovables, sin embargo no se ha realizado ningún estudio a fondo sobre el aprovechamiento de la energía proveniente del mar y se considera que el país cuenta con gran potencial para ello ya que está rodeado de dos grandes océanos (Pacífico y Atlántico) que es probable que cuenten con características favorables para un uso energético.

III. OBJETIVOS

A. General.

Desarrollar y construir un prototipo para generación eléctrica a partir de la energía del mar, el cual sea económicamente factible, de fácil implementación y a un bajo costo de mantenimiento, permitiendo una generación constante y limpia.

B. Específicos.

- Realizar una profunda investigación acerca de los distintos tipos de generación de energía a partir de métodos hidráulicos provenientes del mar, específicamente el método de energía undimotriz y analizar su factibilidad y posibilidad de desarrollo en aguas nacionales.
- Planear y elaborar un sistema que componga un prototipo que logre convertir el movimiento de las olas en fuerza para la presurización de agua capaz de viajar a cierta velocidad y lograr una exitosa generación de energía.
- Realizar posibles mejoras o modificaciones al sistema luego de ser evaluado mediante pruebas de laboratorio para aumentar su eficiencia en cuanto a aprovechamiento del recurso hídrico.
- Determinar si es factible generar energía eléctrica en Guatemala utilizando la generación maremotérmica.
- Diseñar y construir un prototipo que genere energía por medio de olas.
- Mejorar el prototipo diseñado.
- Probar y verificar el funcionamiento del prototipo.
- Investigar el concepto y origen de las corrientes marinas, su clasificación y los tipos de corrientes existentes.

- Realizar un estudio sobre los distintos métodos de aprovechamiento de este tipo de energía marítima alrededor del mundo, la capacidad de generación y los costos de instalación y mantenimiento que conllevan.
- Elaborar un estudio de viabilidad para la instalación de un prototipo en las costas de Guatemala tomando como referencia prototipos ya construidos.
- Identificar la teoría hidráulica que se aplicará al sistema propuesto.
- Calcular la potencia generada con el prototipo propuesto.
- Calcular la potencia generada con el prototipo a escala real instalado en el Litoral del Pacífico.
- Demostrar la teoría hidráulica utilizada para la construcción del sistema mediante ensayos de laboratorio.
- Evaluar los criterios de rentabilidad de instalar la energía mareomotriz en Guatemala.
- Determinar una ubicación ideal para implementar el prototipo según las características de Guatemala.
- Identificar los factores externos que afectan el desempeño y mantenimiento del prototipo.
- Con base a estudios de proyectos similares determinar cómo afecta el prototipo al medio ambiente guatemalteco.
- Determinar los requisitos legales para la instalación del prototipo en Guatemala.
- Identificar los procesos necesarios a realizar para poder vender la energía producida.
- Identificar las regulaciones vigentes del Ministerio de Energía y Minas, el Administrador del Mercado Mayorista, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, y la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. que son aplicables a un proyecto de este tipo.

IV. ANTECEDENTES

A. Energía undimotriz.

1. **Definición.** La creciente escasez por los combustibles fósiles y la creciente necesidad de energía, ha obligado al ser humano a recurrir a fuentes de energías perdurables y viables. Para esto se han observado los fenómenos marítimos como una posible fuente de energía. Entre estas se encuentra la energía mareomotriz, que es la más utilizada hoy en día, y la energía oleomotriz, entre otras menos conocidas e implementadas. La energía oleomotriz (undimotriz) es la energía generada a partir del movimiento de las olas, por medio de instrumentos que logran canalizar la energía que presenta este constante movimiento hacia generadores eléctricos que transportan esta energía hacia múltiples destinos.

El oleaje marítimo es lo que se conoce como un “tercer derivado” de la energía solar, ya que el calentamiento generado por la radiación solar, crea corrientes de viento de las cuales surgen las olas al ponerse este en contacto con la superficie del mar. Por esto mismo, es un porcentaje muy pequeño de energía solar que se transfiere a las olas y aún más pequeño el que se recolecta actualmente. Asimismo, se ha registrado que la energía perdida desde la creación de una ola hasta la costa es mínima, por lo que es aceptable recolectarla en las costas donde se tiene mejor accesibilidad. Finalmente, cabe señalar que de acuerdo a estudios de oleajes realizados se ha estimado que las olas contienen una mayor cantidad de energía mientras más alejadas del ecuador se encuentren, siempre dependiendo de las condiciones de costa, profundidad del océano, etc. A continuación se presentaran los distintos prototipos y formas que se han desarrollado hasta el día de hoy sobre obtención de energía a base de olas. (González, 2009).

2. Modalidades implementadas.

a. *Pelamis Wave Power*. Es una de las formas implementadas para generar energía de este tipo mediante dispositivos flotantes. Consiste en una flota de dispositivos de serpiente en la parte superior del agua. Como las olas pasan por debajo de la serpiente, esto crea un movimiento en las juntas que componen la serpiente y estas están conectadas a unos pistones que transportan este movimiento a un generador que crea la electricidad. Son instaladas en partes lejanas a la costa, de aproximadamente 50 a 100 metros, ya que aquí se genera la mayor potencia del oleaje. El invento insignia de la empresa que lleva el mismo nombre (*Pelamis Wave Power*) es capaz de generar energía eléctrica para 1,500 o 2,000 hogares por cada generador. (Palazzesi, 2009).

La eficiencia de este sistema reside en la multiplicación de sus generadores, ya que se puede crear una cadena de generadores donde todos estén conectados al mismo cable de alimentación para aumentar la producción de energía. Cada *Pelamis* mide 142 metros de largo y 3.5 metros de diámetro, con un peso total de 700 toneladas. Debido a las condiciones en las que trabaja una *Pelamis*, era importante sacrificar su capacidad generadora a cambio de un diseño resistente a tormentas, huracanes y demás fenómenos marítimos. Por eso mismo, la *Pelamis* no es el dispositivo más económico ni el más eficiente pero sí el más confiable y duradero. (Palazzesi, 2009).

En esta costa situada en Oporto, Portugal, se instaló una *Pelamis* compuesta de tres generadores cada uno con una capacidad de 750 KW, formando un total de 2.25MW de energía generada. Con esta cantidad de energía generada, esta fase inicial del proyecto provee a cerca de 6,000 hogares con energía limpia. En un futuro, se espera que este proyecto siga aumentando la cantidad de generadores para alcanzar un total de 500MW de energía generada, lo que

supondría de un 20% a un 30% del total de consumo de energía en el país. (Palazzesi, 2009)

Figura 1
Pelamis tipo P-750 instalada en costas portuguesas



Fuente: González, 2009.

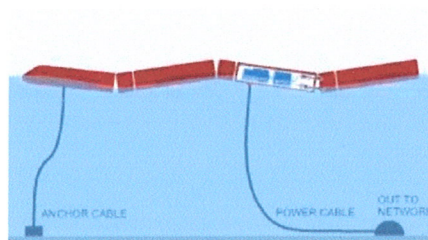
Si existe algún rechazo para llevar a cabo este proyecto es sin duda su alto costo. Para la primera fase del proyecto llevado a cabo en este país, se tuvo un costo de inversión, operación e instalación de aproximadamente 8 millones de euros. Esto significa que por cada generador de 750KW, se obtuvo un costo de más de 2.5 millones de euros. Es decir, se cuenta con una inversión total de 3.2 millones de euros por MW generado. Esta sin duda es una gran desventaja ya que supone un poco más de cuatro veces el costo de un dispositivo de energía eólica con la misma capacidad generadora. (Anónimo, 2009).

3. Funcionamiento:

- El Pelamis está en estado de reposo como se muestra en la Figura 2, conectado a tierra únicamente por medio del cable de anclado y el nexo que permite el transporte de la energía generada. (Green Peace UK, 2008)
- El Pelamis luego es afectado por una ola que la atraviesa, lo cual produce un movimiento tanto vertical como horizontal en las juntas de los distintos eslabones. (Green Peace UK, 2008)

- Los elementos que conectan un eslabón con otro reciben dicho movimiento y, de la misma manera que trabaja un pistón de automóvil, se bombea un aceite de alta presión que crea un impulso para que trabaje el motor. (Green Peace UK, 2008)
- El motor que recibe el movimiento de los pistones está conectado a un generador que crea la electricidad en base a energía mecánica. (Green Peace UK, 2008)
- Finalmente, la energía producida por el generador es transportada a un distribuidor en el fondo por medio de un cable para luego ser transportada a un almacenador en tierra. (Green Peace UK, 2008)

Figura 2
Pelamis y sus componentes externos



Fuente: Anónimo, 2012.

Figura 3
Uno de los eslabones que conforman la Pelamis y sus componentes internos



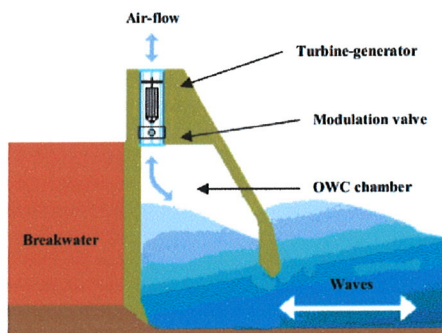
Fuente: Anónimo, 2012.

b. *Columna de Agua Oscilante*. El tipo de captación de energía undimotriz a través del método de Columna de Agua Oscilante u OWC de acuerdo a sus siglas en inglés (Oscillating Water Column), es de los más utilizados en la actualidad. Este sistema se ubica en las costas ya que la parte superior de la estructura consta de una cámara de aire que alimenta a una turbina Wells la cual está conectada a uno o varios generadores y la parte inferior se encuentra sumergida para abrir paso a las olas y al flujo de aire bidireccional que hará que funcione toda la planta. Aunque se modifique la estructura de la planta de acuerdo a las características de las zonas donde se vayan a instalar, se identifican tres componentes similares en todas ellas: la cámara de captura, el turbo-generador y el sistema de industrialización y control. (Amundarain, 2012)

Entre estos componentes, al que se le debe dar mayor atención es a la cámara de captura, ya que debe proveer la fuente de generación y a la vez ser lo bastante resistente como para no se afectada por las condiciones a las que se encuentra expuesta. Es importante que la turbina que se encuentre en la parte superior nunca esté en contacto con la atmósfera exterior y mucho menos con el agua de mar. La opción ideal para la construcción de este componente de la estructura es la elaboración de manera inclinada de la misma, ya que de esta forma se aprovecha el área de columna de agua y se evitan los choques turbulentos. (Amundarain, 2012)

Figura 4

Diagrama de funcionamiento de columna de agua oscilante



Fuente: Amundarain, 2012.

En la figura que se muestra a continuación, se presenta el modelo de funcionamiento de una planta OWC. Como se puede observar en el diagrama ingresa la ola en la cámara de captura la cual logra que una turbina Wells funcione y produzca energía mecánica, por último un generador compuesto por los convertidores estáticos de potencia RSC (Rotor Side Converter) y GSC (Grid Side Converter) se encargan de transformar esa energía mecánica en energía eléctrica para su distribución. Asimismo, se utilizan algunas mejoras como la válvula serie que regula el flujo de aire que conduce a la turbina Wells, cuyo motivo se ampliará más adelante, y un circuito Crowbar, el cual protege al sistema de posibles huecos de tensión que existan en la red eléctrica. (Amundarain, 2012)

4. La turbina Wells.

La turbina Wells fue propuesta por primera vez en 1976 por el Dr. A. A. Wells. Esta turbina tiene la especial característica, que gracias a su geometría siempre gira en el mismo sentido, sin importar la dirección del fluido en cuestión. Debido a esta singularidad este tipo de turbina es utilizado principalmente para este tipo de generación de energía tal como lo han hecho las plantas ubicadas en LIMPET, PICO y Mutriku. El funcionamiento de esta turbina depende principalmente del “coeficiente de flujo” (Φ) el cual se define mediante la siguiente expresión:

$$\varphi = \frac{Q}{r\omega_t a} = \frac{V_x}{r\omega_t}$$

(Amundarain, 2012)

Donde:

Q es el caudal del fluido,

r el radio medio,

ω_t la velocidad angular de la turbina,

a el área transversal

V_x la velocidad del fluido

Para este caso velocidad del fluido caso será igual a aire y este tipo de turbina es ideal para esta modalidad de generación de energía undimotriz, ya que las corrientes de aire son de carácter bidireccional. De esta forma se puede aprovechar todo el movimiento mecánico posible por este dispositivo. Asimismo, este tipo de turbina es ideal para trabajar bajo condiciones de velocidades variables tal y como las que se encuentran en este ambiente, ya sea bajo un rango de tiempo de corto o largo plazo. (Amundarain, 2012)

Uno de los principales problemas que presenta este tipo de energía, principalmente al utilizar turbinas Wells es la eficiencia que esta puede lograr. Esto se debe a que la potencia que genera está directamente ligada a la cantidad de pérdida que genera a la vez. Ya que el coeficiente de flujo (Φ) varía únicamente en función de la velocidad del fluido (V_x). Cuando el coeficiente de flujo supera un determinado valor puede ocurrir que la turbina se frene más de lo que lo haría cuando se presenta una velocidad menor de una ola de menor altura. De esta forma, si se logra controlar la velocidad con la que la turbina se acopla al generador (la velocidad angular de la turbina), se logrará controlar el valor del coeficiente de flujo y con esto aumentar la potencia y disminuir las pérdidas de la mejor manera posible. (Amundarain, 2012)

Para lograr que esto no cause mayor impacto tanto en la generación como en el mantenimiento de la maquinaria, se han logrado desarrollar e implementar dos soluciones: La primera de ellas se denomina control de la velocidad de rotación, el cual adapta la velocidad de rotación del generador a las diferentes presiones de la ola con el objetivo de disminuir las pérdidas y aprovechar todo el flujo de aire que pueda lograr extraerse de la ola. La segunda es el control del flujo de aire, que consiste en una válvula que se coloca justo en la entrada del canal recolector y permite regular la presión y velocidad del aire entrante para lograr reducir las

pérdidas que genere la turbina. Este segundo método es menos eficiente que el primero ya que no se logra aprovechar toda la energía que proporcionen las olas pero cumple con el objetivo de modificar el coeficiente de flujo. (Amundarain, 2012)

Figura 5

Imagen de una turbina Wells



Fuente: Amundarain, 2012.

5. Mutriku, España

Este proyecto se llevó a cabo en las costas en el País Vasco, y conforma la primera planta de Columnas de Agua Oscilante en Europa. Esta planta cuenta con 16 turbinas, con las cuales genera alrededor de 290KW a 300KW, con lo que abastecería a aproximadamente 600 personas y produciría anualmente 600,000 KWh. Este proyecto presentó una inversión total de 6.7 millones de euros, incluyendo costos de instalación y mantenimiento. Con esto se logra un total de 1.8 millones de euros por MW generado. (Civantos, 2011)

Una de las principales ventajas que presenta este proyecto, es que la energía generada es completamente limpia y no presenta ningún impacto ambiental negativo al agua de mar. Esto sucede gracias a dos factores: La maquinaria se encuentra fuera del agua, por lo que se evita que el equipo se corroa y contamine directamente el líquido. Debido a que se encuentra fuera del agua el paisaje y la

fauna local no se ven amenazadas por los residuos o por el ruido que se produzca en la planta. (Civantos, 2011)

Figura 6

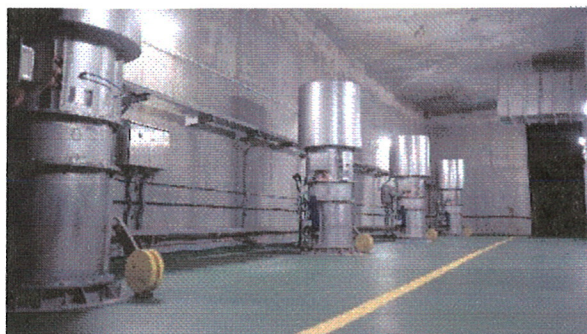
Vista externa de la planta OWC en Mutriku, España



Fuente: Civantos, 2011.

Figura 7

Vista de las turbinas en el interior del sistema OWC.



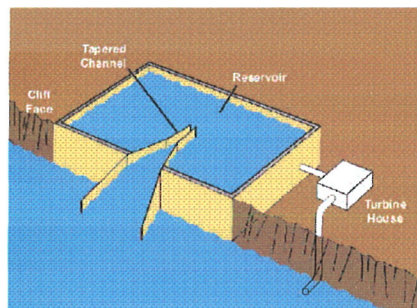
Fuente: Civantos, 2011.

c. *Otros tipos de generación undimotriz.* Los dos sistemas anteriores son los más conocidos para este tipo de energía. Sin embargo, existen otros métodos para obtener energía de este tipo pero no son muy utilizados debido a la baja capacidad generadora o a que son relativamente nuevos en el mercado y aún no cuentan con un record confiable de efectividad que poseen los anteriores. Entre estos se encuentran los siguientes:

1) TAPCHAN. El sistema TAPCHAN, o Tapered Channel (canal estrechado), consiste básicamente en un canal estrechado que conecta el agua del mar con un embalse situado dentro de un acantilado preferiblemente. El éxito de este sistema reside en el cambio de ancho del canal, ya que al estrecharse a su paso por el embalse, crea que la altura de la ola incrementa y provoque un desbordamiento del agua hacia el embalse, el cual debe estar a un nivel menor al que se encuentra el mar. Luego el agua contenida en el embalse pasa por una turbina Kaplan para la generación de energía para luego ser regresada al mar de donde proviene. Como se puede notar, este procedimiento es similar al de obtención de energía hidráulica, con la única excepción que el costo del procedimiento puede reducirse al ser el oleaje mismo el que provee la materia prima y no se debe invertir en un sistema que movilice el agua al lugar deseado. (Anónimo, 2009)

Figura 8

Diagrama de componentes del sistema TAPCHAN.



Fuente: Anónimo, 2009.

Este volumen de líquido embalsado luego es aprovechado para la generación eléctrica a través de una turbina de baja presión funcionando a 350kW. Este dispositivo, sin embargo, no es ideal ya que requiere de especificaciones muy precisas del lugar donde se quiera instalar. Uno de estos requisitos es que la zona costera debe tener una profundidad considerable cerca del lugar de instalación y el oleaje debe ser continuo y con mareas de menos de 1 metro. Asimismo, la ubicación del embalse es muy importante, por lo que la preparación del terreno es muy importante para su colocación. A pesar de todo esto, este es quizás el sistema más económico para la generación de energía de este tipo, debido a su bajo costo tanto de instalación como de mantenimiento. (Hale, 2012)

2) WaveRoller. El dispositivo WaveRoller consiste en una o varias placas que están conectadas por uno de sus extremos al fondo del océano. Esto permite que el oleaje inferior entre en contacto con estas placas y las haga agitarse de un lado a otro, de la misma forma que una hoja de papel se agita cuando es golpeada por un viento muy fuerte. Al conectar la placa a un pistón, este produce un movimiento que puede generar energía al ser conectado a una central de turbinas. Este sistema fue desarrollado por la compañía AW-Energy, la cual ha realizado varias pruebas en aguas de Escocia antes de comercializarlo. (AW-Energy, 2012)

Figura 9

Sistema WaveRoller instalado en Orkney, Escocia

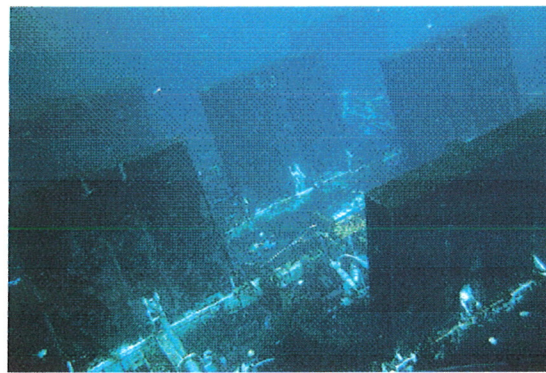
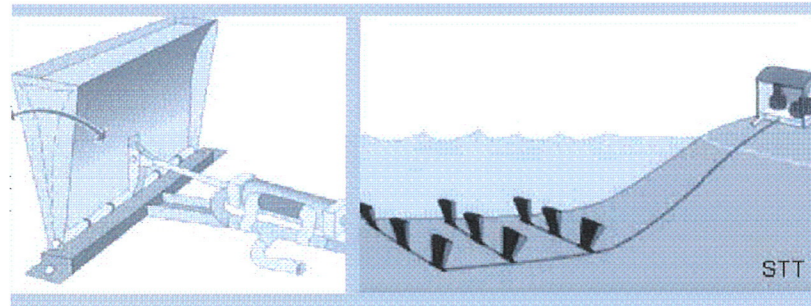


Figura 10

Diagrama de funcionamiento del sistema WaveRoller.



Fuente: AW-Energy, 2012.

Como es de esperar en este tipo de proceso, el éxito detrás reside en la multiplicación del número de dispositivos trabajando al mismo tiempo. Esto se debe a que una sola placa WaveRoller produce tan sólo 13KW ya que el oleaje inferior es considerablemente menor al oleaje superior. Para este tipo de tecnología, la compañía AW-Energy ha estimado un costo de 3000 euros por kW y de aproximadamente 30-50 euros el MW/h. (AW-Energy, 2012)

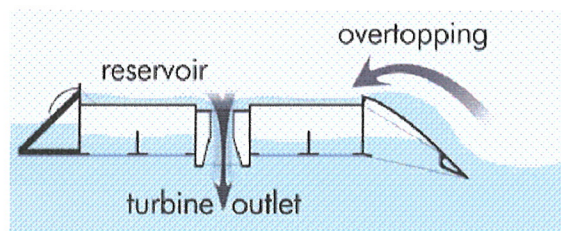
3) Wave Dragon. El Wave Dragon es un dispositivo similar al TAPCHAN en cuanto a funcionamiento, pero distinto en diseño. El Wave Dragon consiste en un dispositivo curvo en sus extremos, con una geometría lo más similar a una ola, el cual recibe el impacto directo de la misma y almacena el agua en un embalse para luego ser procesada por turbinas generadoras. Este es comúnmente colocado en zonas cercanas a la costa pero donde haya una profundidad aceptable para captar el oleaje cuando todavía no pierde fuerza como lo haría al tocar una playa. (Wave Dragon, 2005)

Figura 11
Sistema Wave Dragon en la India.



Fuente: Wave Dragon, 2005.

Figura 12
Diagrama de funcionamiento del Wave Dragon



Fuente: Anónimo, 2009.

Para que este instrumento funcione efectivamente es de vital importancia su geometría. Esta debe tener una superficie bastante empinada y de baja altura, para así aprovechar la captación de una mayor cantidad de agua. Si se instala de manera adecuada, una de estas plantas puede generar una cantidad total de energía de entre 4 y 11 MW dependiendo de la actividad de las olas. (Wave Dragon, 2005)

4. Tecnología SDE. La tecnología SDE consiste en un sistema capaz de generar energía eléctrica a partir de las olas de mar. Este sistema aprovecha la velocidad, altura, profundidad y contracorriente de las olas de mar para generar presión hidráulica que luego es utilizada para la generación de energía eléctrica. El sistema fue diseñado y patentado por la compañía israelí S.D.E. Energy LTD la cual, luego de alrededor de 12 prototipos creados y probados, concluyeron con uno que fue instalado en el puerto de Jaffa en Israel y logró generar 40kW en un año. La compañía ha construido ya 12 plantas generadoras en países como Chile, México, Tanzania, Kenia y China. El costo es de \$1 millón por cada MW generado en cada planta. (SDE Ltd., 2012)

Figura 13

Sistema SDE instalado en las costas de China.



Fuente: SDE, Ltd., 2012.

Figura 14

Diagrama de funcionamiento del sistema SDE.



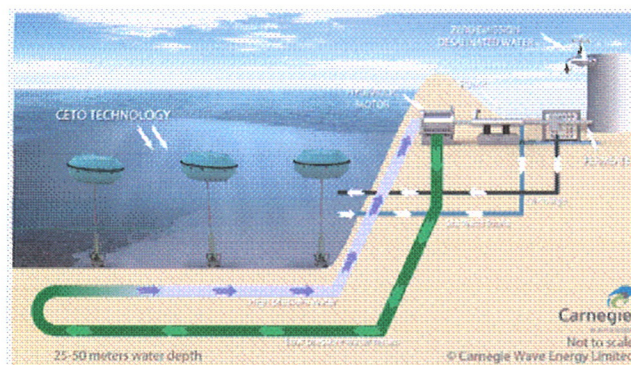
Fuente: SDE, Ltd., 2012.

El sistema SDE está compuesto de boyas que son colocadas en un rompeaguas preferiblemente. Estas boyas están conectadas a un brazo que contiene un líquido hidráulico el cual se encuentra en un circuito cerrado y alimenta un generador eléctrico al final del circuito. Como se mencionó anteriormente, este sistema aprovecha especialmente la velocidad de las olas, ya que al chocar con las boyas en sus laterales, impulsa dicho líquido que continúa con el proceso de generación. Su diseño curvo en la superficie inferior le ofrece al sistema un “autocorrector” ya que si el mismo se encuentra atacado por una ola demasiado grande y potente se voltea automáticamente y luego vuelve a su posición original al ser empujado por una ola de menor dimensión. A continuación se muestran diagramas e imágenes que demuestran de mejor manera el funcionamiento de este sistema. (SDE Ltd., 2012)

5. CETO Wave Energy. El sistema de generación de energía y desalinización de agua CETO, en honor a la diosa griega del océano, utiliza boyas y la velocidad de las olas para lograr movimiento mecánico en sus dispositivos y con esto crear un producto final. A diferencia de los dispositivos presentados anteriormente, el sistema CETO funciona por medio de boyas debajo del agua que aprovechan principalmente el movimiento vertical que las olas provocan en dichas boyas para así bombear agua de mar a las plantas instaladas en la superficie y así lograr generar energía eléctrica y agua dulce por medio de sistemas de osmosis inversa, todo con un 0% de emisión de carbono a la atmósfera.

Figura 15

Diagrama de funcionamiento del sistema CETO.



Fuente: Carnegie Wave Energy Limited, 2013.

El sistema CETO tiene un funcionamiento distinto al de los demás sistemas anteriores a lo largo de esta investigación. Este sistema consta de boyas que están sumergidas en el agua marina, preferiblemente a una distancia no menor de 100m de la costa ya que se quiere evitar el rompimiento de las olas y la turbulencia que presenta la costa que posiblemente afecte directamente la integridad del sistema. Con estas boyas se pretende aprovechar el movimiento vertical de las olas de mar y así bombear a altas presiones el agua marina recolectada por medio de una red organizada de tuberías que conduce hacia plantas instaladas en la costa. En estas plantas el agua es utilizada con la presión que posee para hacer funcionar turbinas tipo Pelton y luego generadores de energía o es almacenada para su utilización en el proceso de osmosis inversa y así lograr obtener agua dulce para uso doméstico o industrial. (Carnegie Wave Energy Limited, 2013)

Figura 16

Inspección de boyas CETO.

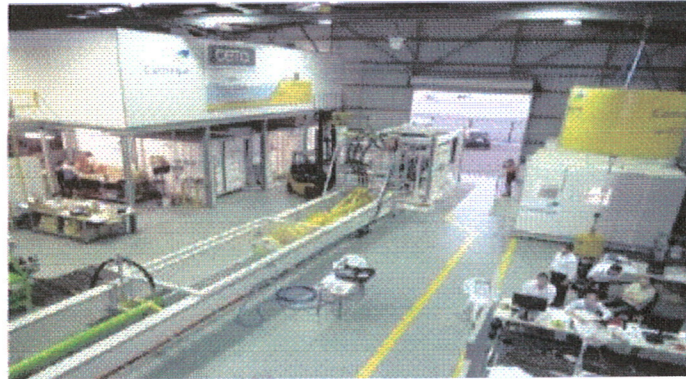


Fuente: Carnegie Wave Energy Limited, 2013.

Este sistema ha sido diseñado y patentado por la empresa australiana Carnegie quienes han instalado ya diversas plantas entre las que se encuentra La Reunión con un costo de \$5 millones en su fase inicial con capacidad de generación de 2MW y en las costas irlandesas donde se está desarrollando un sistema de generación de 5MW entre la empresa Carnegie y la Asociación de Energía Auto-sostenible irlandesa. Con esto se logra un total de (Carnegie Wave Energy Limited, 2013)

Figura 17

Vista interior de la planta para generación de energía eléctrica bajo el sistema CETO.

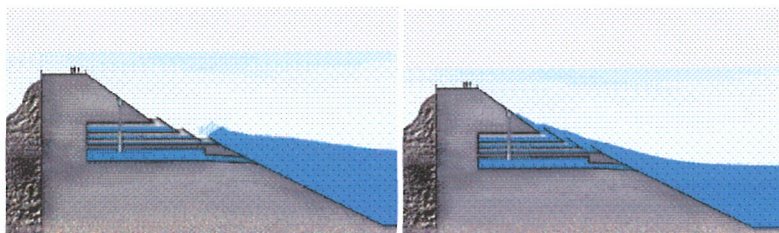


Fuente: Carnegie Wave Energy Limited, 2013.

6. Sistema SSG. El sistema de generación de energía undimotriz Seawave Slot-cone Generator (SSG) consta de un conjunto de tres tanques instalados preferiblemente en un rompe-aguas, ya que aprovechan la velocidad de la ola y la fuerza de rompimiento de la misma para almacenar agua en estos tres o más tanques colocados uno encima del otro. La construcción de este sistema se realiza específicamente con concreto de alta resistencia para que pueda resistir la fuerza que ejercen las olas sobre la misma y a la vez las duras condiciones a las que estará expuesto el sistema. La estructura se diseña de forma angular con el objetivo de aprovechar la geometría de la ola y así lograr obtener la mayor cantidad de materia prima posible por cada ola que choque contra el sistema. (De Keulenaer, 2007)

Figura 18

Modelo de funcionamiento del sistema SSG.

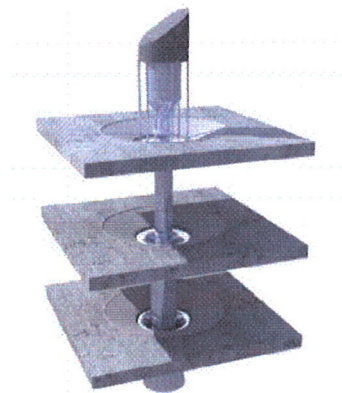


Fuente: De Keulenaer, 2007.

Para lograr aprovechar la energía potencial del agua almacenada en el sistema y así lograr la generación de energía, este sistema pretende instalar una turbina multietapa o turbina tipo MTS por sus siglas en inglés. Esta turbina tiene la peculiaridad de permitir utilizar caídas de agua a distintas alturas con un solo rotor. De esta forma se evita el constante encendido y apagado de los generadores y así se logra un aumento en la constancia de generación y, por lo mismo, la eficiencia del sistema. Sin embargo, este sistema alcanza su máxima eficiencia con velocidades de agua relativamente bajas, ya que al soportar distintas velocidades de caída de agua opera con una velocidad media y produce un movimiento a escalas moderadas. (De Keulenaer, 2007)

Figura 19

Diagrama de turbina multietapa utilizada para el sistema SSG.



Fuente: Unión Europea, 2013

La compañía WAVEnergy AS fue la primera en implementar este sistema en un proyecto a escala real. Este proyecto consistió en la instalación de una planta con un ancho de 10m para el módulo SSG en la costa este de Noruega y con una capacidad generación de 200KW. Con esta planta se pretende alcanzar un promedio de 200,000 kWh luego de un año de funcionamiento. De acuerdo a las predicciones realizadas en base a este proyecto, se asume que este tipo de modelo de energía undimotriz tiene la capacidad de generar 22 GWh al año en una planta de 500m de

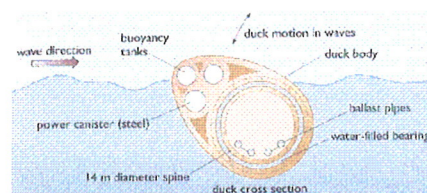
ancho en un ambiente con olas con capacidad generadora de 25 kW/m. (Unión Europea, 2013)

7) Salter Duck. El sistema de generación de energía undimotriz Salter Duck o Edinburgh Duck es quizá el sistema de generación flotante más eficiente que se haya desarrollado hasta la fecha, ya que sus resultados demuestran un aprovechamiento del 90% de la energía de la ola, especialmente a través de su velocidad. Este sistema fue diseñado y experimentado en 1970 por el profesor Stephen Salter de la Universidad de Edinburgo debido a la crisis de petróleo que existía en la época y al interés del gobierno en invertir en diversos métodos alternos para la generación de energía. Sin embargo, los estudios para este tipo de prototipos se cancelaron empezando la década de los 80s cuando el gobierno escocés retiró los fondos invertidos en esta campaña para apostar por la energía nuclear, la cual tenía un costo promedio kWh menor al dispositivo undimotriz propuesto por Salter. (McGrath, 2011)

El sistema se basa en el funcionamiento de las boyas con forma de “lágrima” las cuales se posicionan de manera que la punta de la boya esté directamente frente a la ola que se avecina. En la parte ancha de la “lágrima” se colocan contrapesos, ya sea de concreto o acero, los cuales evitan el volteo de la boya en caso de un oleaje muy turbulento. En otros casos también se instala una pequeña cámara de aire en la punta de la boya para crear el mismo efecto. Añadido a la boya se encuentra un pistón con aceite presurizado en su interior que logra capturar el constante movimiento que realiza la boya y así lograr el funcionamiento de un generador eléctrico. (Hale, 2012)

Figura 20

Diagrama de componentes de una boya Salter Duck.



Fuente: Hale, 2012.

Este método resalta su sencillez y economía para los aspectos de diseño, construcción e instalación. Entre los cálculos que se realizaron para la creación del sistema, se lograron unas ecuaciones las cuales se lograba obtener la eficiencia de un sistema Salter Duck de acuerdo a las dimensiones tanto de la boya como del lugar en el que sea instalado. Para el prototipo creado en 1970 se empleó un sistema de 20 boyas conectadas en serie de 50cm de ancho, 6m de largo y 27cm de diámetro por boya utilizada con lo que se logró una obtención de 20kW y una eficiencia de 90%. (McGrath, 2011)

Figura 21

Diagrama de funcionamiento de un sistema Salter Duck en serie.

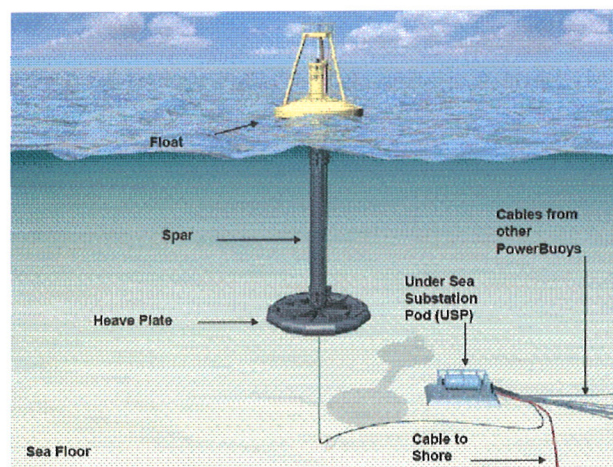


Fuente: Hale, 2012.

8) Power Buoy. El PowerBuoy es una boya diseñada específicamente para la generación de energía por medio de olas marinas. Esta boya tiene la peculiaridad de contener todo el sistema mecánico y generador dentro de la estructura de cada unidad de boya. Este sistema fue diseñado, patentado y actualmente comercializado por la compañía Ocean Power Technologies (OPT) originaria de Pennington, New Jersey. Actualmente, la empresa OPT cuenta con 9 instalaciones de PowerBuoy alrededor del mundo, especialmente en las costas de Australia y diversas localidades de Estados Unidos. (Moris Arroes, 2012)

Figura 22

Diagrama de funcionamiento del sistema PowerBuoy.



Fuente: Ocean Power Technologies, 2013.

El sistema PowerBuoy está diseñado para funcionar de manera eficiente en aguas con profundidad de entre 30 y 50 metros. El sistema singular de una PowerBuoy consta de una boya en la parte superior del sistema la cual se encuentra sujeta a un pistón que recibe el movimiento vertical de la ola y el cual se encarga de transmitir la energía mecánica que alimenta el generador de electricidad en la parte inferior de la PowerBuoy. Cada boya está conectada a una red de cableado que transporta la electricidad a un distribuidor en la superficie y finalmente en la parte inferior de cada PowerBuoy se encuentra un peso que le brinde estabilidad y seguridad a cada sistema. (Ecotricity, 2013)

El proyecto más destacado de este tipo de modalidad de energía undimotriz sucedió en las costas de Escocia en el 2011, con la instalación del prototipo de PowerBuoy más reciente de la empresa: la PB150, o PowerBuoy con capacidad de generación de 150kW. (Ocean Power Technologies, 2013)

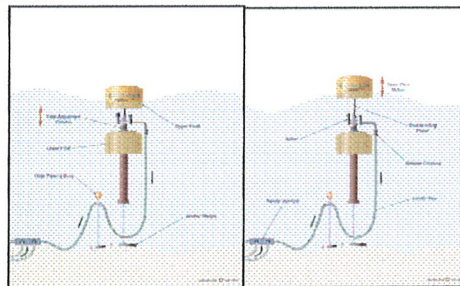
Figura 23
PowerBuoy fuera del agua.



Fuente: Ocean Power Technologies, 2013.

9) Searaser. El método de generación de energía undimotriz Searaser es quizá el más eficiente y económico que existe dentro de esta categoría. Esto se debe a su facilidad de instalación, economía en cuanto a diseño, construcción y adaptabilidad a cualquier ambiente y tipo de oleaje en donde se quiera instalar, incluyendo factores como la altura, período y amplitud de las olas. El sistema Searaser nació del ingeniero e inventor británico Alvin Smith, quién se percató de la presión que ejercía el agua de vuelta cuando intentaba hundir una pelota de playa. Este sistema se caracteriza por no generar la electricidad en el agua, sino simplemente aprovecha el movimiento de las olas de mar para bombear agua mediante una red de tuberías hacia una planta en la costa que genera electricidad por medio de turbinas. (Smith, 2007)

Figura 24
Diagrama de funcionamiento de bombeo del sistema Searaser



Fuente: Smith, 2013.

El sistema Searaser consta de una boya parcialmente sumergida y otra boya totalmente sumergida con un pistón posicionado verticalmente en medio de ambas. Cuando una ola pasa por debajo de la boya superior, esta sube y trae consigo el pistón y gracias a la gravedad y al contrapeso adherido a la boya inferior, todo el sistema baja de nuevo permitiendo al pistón bombear de manera eficiente el agua que contiene. Este líquido se pasa por una red de tuberías y transportado a un embalse en la parte superior de la costa. De acuerdo a la cantidad de sistemas Searaser funcionando, se puede utilizar un Manifold para lograr unificar todas las entradas de agua y controlar y unificarlas logrando un caudal uniforme para el mejor funcionamiento del sistema. Luego que el agua es depositada en el embalse, se aprovecha su energía potencial para ser transportada a turbinas a un nivel más bajo y lograr generar energía a base de la velocidad que trae consigo el líquido. (Peace Trees, 2011)

A pesar que el sistema Searaser se encuentra en fase de prueba y no ha sido instalado oficialmente en ningún sitio para suministro de energía, se han realizado distintas pruebas por su inventor con un prototipo de boya Searaser 1200. Este prototipo es capaz de bombear $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ y con esto una capacidad de generación de 1MW bajo las condiciones de una turbina tipo Pelton. Con estos datos, el sistema unitario es capaz de suministrar energía eléctrica a 1.720 hogares a un precio 30% menor a la energía nuclear. (Peace Trees, 2011)

Figura 25

Sistema Searaser en funcionamiento para pruebas de campo.



Fuente: Peace Trees, 2011.

3. Ventajas y desventajas de la energía undimotriz.

Tabla 1
Ventajas y desventajas de la energía undimotriz.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Crea un menor daño ambiental que la energía mareomotriz. • Los sistemas son menos visibles que otras formas de fuentes de energía. • Esta energía es predecible ya que se sabe cuántas mareas y las olas están llegando. • Una vez que el área se construye y una granja de energía se crea, es barato de mantener. • El medio de alimentación para los sistemas generadores nunca se agotará, ya que la existencia de las olas es algo con lo que se podrá contar siempre. • Como cualquier energía limpia, evita la emisión de toneladas de gases CO₂ debido a la utilización de combustibles fósiles. • Algunos de los sistemas, como es el caso de TAPCHAN, tienen una facilidad para su instalación con un costo accesible. • El mercado nacional a base de este tipo de energía es prácticamente inexistente, por lo que desde el punto de vista económico, representa un potencial en cualquier dominio del mercado sin expiración alguna. • El oleaje marino debe ser muy constante en cuanto a los datos de interés (altura de olas, amplitud, periodo), por lo que representa una menor probabilidad de cambios drásticos en cuanto a la generación de cualquier sistema instalado. • 	<ul style="list-style-type: none"> • Uno de los principales problemas existentes es el elevado costo de instalación de algunos de los sistemas, en especial los más eficientes como Pelamis o el OCW. • Los dispositivos flotantes, como es el caso del Dragon y el Pelamis, puede contaminar el ambiente tanto por una posible corrosión o por el ruido que genera, el cual puede afectar a la población de peces en la zona. • Sus instalaciones necesitan una modificación del paisaje en el área. Se ha de disponer de mucho espacio para albergar las enormes turbinas, lo cual involucra un impacto ecológico sobre los ecosistemas costeros. • No cualquier sistema se puede instalar en cualquier zona costera, ya que algunos de los sistemas requieren un mínimo de amplitud de las olas o de su periodo, lo que es necesario un dedicado estudio de las características del lugar para elegir el sistema más eficiente. • Muchos de estos diseños de sistemas implementados son muy susceptibles a dañarse por organismos que interfiera en su camino, por lo que es necesario un mantenimiento constante y metódico hacia los sistemas instalados con el objetivo de garantizar un buen funcionamiento. • Quizá la desventaja más notoria es su elevado costo, ya que algunos de los sistemas más eficientes de este tipo tienen un costo de hasta cuatro veces el de la energía eólica, con la misma capacidad generadora.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Capacidad de instalación en Guatemala. Muchos de los métodos para captación de energía undimotriz, no son viables para el país debido a los elevados costos y a la capacidad de resultados que podría generar. En efecto, se mostrarán algunos diagramas de períodos de olas y altura de las mismas que demuestran cómo estos factores afectan directamente la capacidad de generación de cada método. Empezando con el método de Pelamis, el cual se instaló en las costas de Oporto, Portugal, se puede observar que el costo total del proyecto fue de 8 millones de euros con una capacidad generadora total de 2.25MW de potencia. A continuación, en la Figura 12, se muestra una comparación del período de las olas y la altura de las mismas en Povia do Varzim, lugar donde se instaló este proyecto, y las costas del Puerto de San José en Guatemala. Como se puede observar, la altura de las olas en Portugal sobrepasa por uno o a veces casi dos metros las de las costas nacionales. Asimismo, se puede obtener un promedio del período de las olas en Portugal de aproximadamente 12.28 segundos mientras que el promedio del período en las costas guatemaltecas es de 15.44 segundos, lo cual afecta directamente en la velocidad de generación de energía. Con esto se puede concluir que este método de generación de energía, no es viable para las aguas guatemaltecas ya que se necesitaría de una mayor inversión debido a la menor capacidad de producción que ofrecen las olas nacionales. Además, se presenta un dato de energía potencial de la ola en kJ, en función del tamaño y período de la ola (menor periodo y mayor tamaño aumenta la energía).

Figura 26
Comparación entre propiedades de oleaje entre Portugal y Guatemala.



Fuente: Surf-forecast.com, 2012.

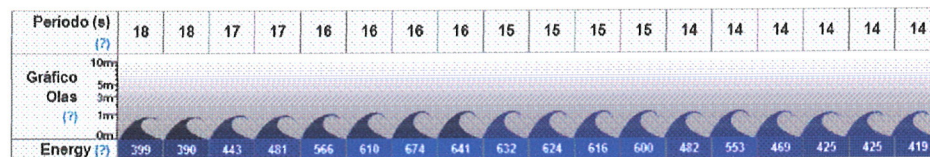
Otro de los métodos de considerable generación es el de columna de agua oscilante. Este utiliza, tanto la altura como el período de las olas para que cuando cada ola choca con la costa el viento que trae con ella suba por un ducto principal con la velocidad necesaria para mover unas turbinas que generen la potencia necesaria para generar energía. Este sistema es muy efectivo ya que aprovecha cada ola el doble debido al regreso del aire cada vez que entra una ola. La planta más eficiente que funciona utilizando este método está ubicada en Mutriku, España. Esta planta se instaló con un costo total de 6.7 millones de euros y con una capacidad generadora desde 300KW a 600KW. A continuación se muestran los reportes de oleaje en esta zona la cual presenta olas de hasta 5 metros de altura y tienen un período promedio de 12.4 segundos. De nuevo, para que se realizara la instalación de una planta como estas en el país, se necesitaría de mucha inversión inicial para que pudiera producir la misma capacidad generadora que en Mutriku, debido a la baja capacidad de producción del oleaje nacional. A continuación se muestra otra figura comparativa entre el reporte de olas de Guatemala y el que se encuentra en el País Vasco.

Figura 27

Comparación entre propiedades de oleaje entre España y Guatemala.



Reporte de Oleaje en Mutriku, País Vasco



Reporte de oleaje en Puerto de San José, Guatemala

Fuente: Surf-forecast.com, 2012.

Los métodos de alta capacidad de generación a partir del movimiento de las olas no son recomendados para una zona como la de Guatemala, ya que la capacidad de las mismas requiere de una gran inversión para poder generar la misma cantidad que los casos mencionados anteriormente. Si se quiere realizar un proyecto en el país utilizando este medio de energía marítima, se deben utilizar los métodos de baja capacidad generadora como el TAPCHAN, el WaveRoller o el Searaser principalmente debido a su baja economía y sus requisitos. Así, será posible utilizar las olas en aguas nacionales de la manera adecuada y adaptar la creación de un sistema, ya sea los anteriormente mencionados o uno nuevo, a las características y limitaciones del oleaje nacional. Finalmente, cabe mencionar que debido a las pocas alteraciones que existen en las propiedades del oleaje guatemalteco, cualquier sistema que se diseñe sufrirá cambios y retos en cuanto a su funcionamiento en aguas del país pero su comportamiento podrá ser fácilmente predicho gracias a las características locales de las olas.

Tabla 2
Reporte de oleaje nacional durante los meses
de julio, agosto y septiembre de 2013.

Mes	Fechas	Período (seg)		Altura de oleaje (m)		Promedio (m)
		Min	Max	Min	Max	
Julio	8-14	12	16	1.80	2.20	2.00
Agosto	5-11	14	18	1.00	1.50	1.27
Septiembre	9-15	10	20	1.20	2.50	2.01
Octubre	7-13	13	19	1.10	2.00	1.65
Noviembre	4-10	13	18	1.00	1.60	1.50

Fuente: INSIVUMEH, 2013.

B. Energía maremotérmica.

1. **Características generales.** La energía maremotérmica es un tipo de energía renovable que utiliza la diferencia de temperatura en el océano, utilizando el agua que está en la superficie con una mayor temperatura y el agua que está en altas profundidades que tiene una temperatura más baja. Esta diferencia de temperaturas permite mover una máquina térmica para obtener electricidad. Fue descubierta por el físico francés Arsène d'Arsonval. Hasta ahora ha tenido el problema del rendimiento, pero los nuevos diseños en intercambiadores y otros dispositivos térmicos hacen que éste se obtengan resultados interesantes.

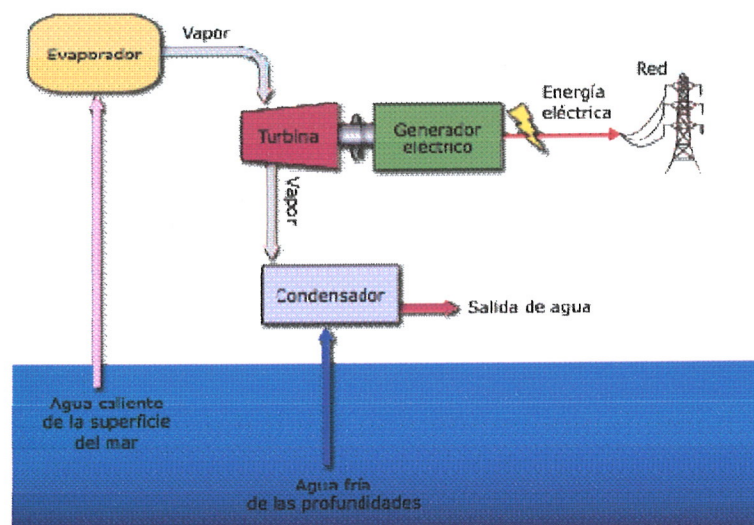
La primera y principal fuente de energía atmosférica procede del Sol. Las radiaciones que afectan la superficie de la Tierra están formadas por ondas de pequeña longitud de onda, que en parte son absorbidas por el ozono en la estratosfera y gran parte por las nubes, que la reflejan nuevamente al espacio en un 34%. El 66% de la energía restante es absorbida por la superficie terrestre. En la actualidad, dos terceras partes de la superficie de la Tierra están cubiertas de agua, y un porcentaje de 97.7% de esta agua se encuentra en el mar. Por tanto, una gran parte de la radiación solar absorbida por la superficie terrestre se lleva a cabo en los mares y océanos. En los océanos se encuentran dos capas, una capa superior de agua relativamente caliente, con una temperatura uniforme; esa capa puede extenderse de los 20 a los 200 metros de profundidad, dependiendo de las condiciones locales. Debajo de esta franja existe una zona denominada termoclina que algunas veces se caracteriza por un descenso brusco de la temperatura. Esta franja, que puede considerarse comprendida entre los 200m y 400m de profundidad, divide a las aguas superficiales, menos densas y menos salinas, de las aguas de las profundidades, más frías, densas y salinas. La temperatura de la capa inferior decrece progresivamente hasta alcanzar 4⁰C. Cuando los océanos alcanzan profundidades mayores a 1.500 metros, la temperatura del agua puede ser menor de 4⁰C, en cualquier parte del mundo, independientemente de la temperatura superficial. En las profundidades de los abismos, a 11 kilómetros de la superficie, la temperatura es menor de 2⁰C, levemente superior al punto de congelación del agua salada.

La diferencia de temperaturas entre la capa superior (caliente) y la capa inferior (fría) se encuentra en el intervalo de 10°C a 25°C , encontrando valores más elevados en las aguas ecuatoriales.

Este gradiente térmico oceánico permite una importante fuente de energía, denominada energía maremotérmica, la cual puede ser aprovechada para producir electricidad mediante la utilización de una máquina térmica. El agua caliente de la capa superior oceánica actúa como fuente de calor, mientras el agua extraída de las profundidades actúa como refrigerante.

Figura 28

Esquema de una central maremotérmica.

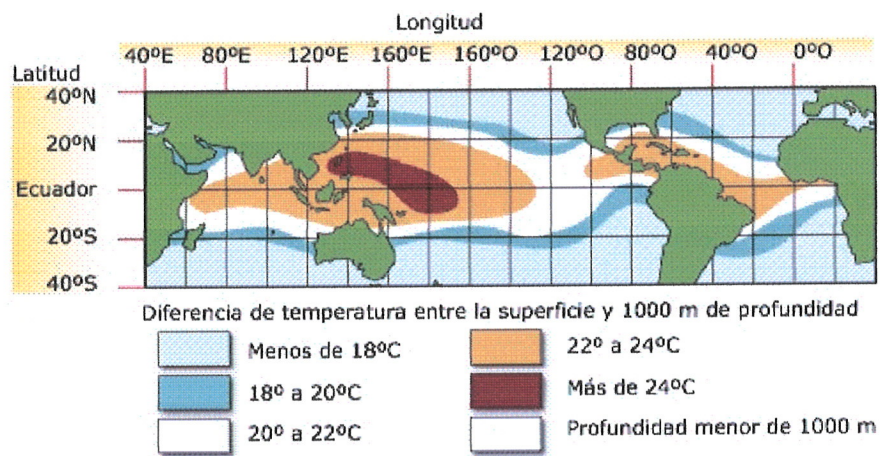


Fuente: Energía maremotérmica, comunidadambiental.org

La radiación solar produce un gran calentamiento de las superficies marinas ecuatoriales, las cuales llegan a alcanzar temperaturas de aproximadamente 28°C . Esto da lugar a que el agua almacene una importante cantidad de energía calorífica, tomando en cuenta que esta temperatura es relativamente baja, las cantidades de agua involucradas son enormes, y el calor absorbido por un cuerpo es directamente proporcional a su masa.

Para el aprovechamiento de la energía maremotérmica se requiere que el gradiente térmico sea de al menos 20°C . Por tanto, las zonas térmicamente favorables se encuentran en las regiones ecuatoriales y subtropicales.

Figura 29
Zonas del mundo térmicamente favorables



Fuente: Energía Maremotérmica, comunidadambiental.org

En las diferentes zonas del mundo el agua tiene distintas temperaturas dependiendo de la profundidad, en especial en los trópicos, donde pueden distinguirse tres capas térmicas:

- La superficial: de 100 a 200 metros de espesor, que actúa como colector de calor, con temperaturas entre 25 y 30 grados.
- La intermedia: entre los 200 y 400 metros de profundidad, con una variación rápida de temperatura y que actúa como barrera térmica entre las capas superior y profunda.
- La profunda: en la que la temperatura disminuye suavemente hasta alcanzar 4°C a 1000 metros y 2°C a 5000 metros.

Al usar el agua de la superficie para calentar un líquido con un punto de ebullición bajo, usando un intercambiador de calor, se transforma en vapor que podría mover una turbina para generar electricidad. Luego, este vapor se enfriaría en otro intercambiador de calor en contacto con el agua fría de las profundidades para luego reiniciar el ciclo de generación.

2. Capacidad de generación. El planeta siempre está expuesto al sol, por lo tanto se tiene una radiación solar que produce un gran calentamiento de las superficies marinas cercanas al ecuador, las cuales llegan a tener temperaturas de 28°C, esto es lo que permite que el agua almacene esta energía calorífica, no importa que la temperatura no sea muy alta pero se tiene una enorme cantidad de agua y el calor absorbido por un cuerpo es directamente proporcional a su masa y al incremento de temperatura al que se le somete. Para el aprovechamiento de la energía maremotérmica se requiere que el gradiente térmico sea de al menos 20°C. Por tanto, las zonas térmicamente favorables se encuentran en las regiones ecuatoriales y subtropicales.

El rendimiento termodinámico de una central maremotérmica es bastante bajo, si se compara con el de una central térmica convencional. Si T_2 y T_1 son las temperaturas en grados centígrados del agua caliente y fría, respectivamente, el rendimiento teórico máximo obtenible en el ciclo se obtiene de la expresión siguiente:

$$\mu = (T_2 - T_1) / (T_2 + 273)$$

En el supuesto de utilizar un emplazamiento de condiciones muy favorables ($T_2= 30^\circ\text{C}$ y $T_1=4^\circ\text{C}$), se obtiene un rendimiento μ , en porcentaje, de solo el 8,6%. Los rendimientos globales de estas instalaciones serán apreciablemente más bajos (entre el 2% y el 3%), no solo porque en general los gradientes térmicos suelen ser inferiores al considerado, sino porque hay que incluir los rendimientos de los distintos componentes de la instalación (evaporadores, condensadores, bombas, turbinas, generadores, etc.)

Se estima que, en un año, la energía solar absorbida por los océanos es de al menos 4,000 veces la energía que actualmente consume la humanidad. Se necesitaría solo un 1% de la energía renovable que podría producir un sistema maremotérmico, con un rendimiento del 3%, para satisfacer todas nuestras necesidades energéticas actuales.

Sin embargo, además del gradiente térmico existen otros factores, tales como condiciones marinas, meteorológicas, tecnológicas, etc., que influyen de manera decisiva en la elección del emplazamiento. Por tanto, para seleccionar las zonas aprovechables y poder evaluar la energía extraíble, son necesarios estudios más precisos que permitan valorar las posibilidades de utilización eficaz, desde el punto de vista técnico y económico, de plantas maremotérmicas.

Para construir los mapas térmicos oceánicos, los oceanógrafos físicos, utilizan básicamente los termómetros de mercurio, los termómetros eléctricos, los batitermógrafos, y para grandes profundidades, los instrumentos denominados CTD, que se sumergen en el agua desde un barco o plataforma.

Los instrumentos CTD, cuyas siglas significan: Conductividad, Temperatura, grabador de Profundidad (Depth, en Inglés), miden continuamente tres importantes cantidades con una elevada precisión: conductividad (salinidad del agua), temperatura y presión, a medida que se sumerge en el mar. Algunos instrumentos CTD son capaces de medir cada una de estas cantidades hasta 24 veces por segundo. Esto suministra una descripción muy detallada del agua que está siendo examinada.

3. Maquinaria. Las instalaciones maremotérmicas flotantes pueden ser diseñadas para funcionar mar adentro, aunque las instalaciones flotantes presentan diversas dificultades. Este tipo de plantas son más difíciles de estabilizar, y la dificultad de amarrarlas en aguas profundas puede crear problemas con el suministro de energía. Los cables conectados a las plataformas flotantes son más susceptibles de ser dañados, especialmente durante las tormentas. Además, los cables en profundidades mayores de 1.000 metros son difíciles de mantener y reparar.

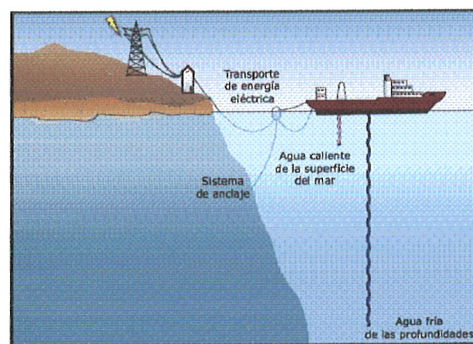
Como las plantas montadas en plataformas, las plantas flotantes necesitan una base estable para su funcionamiento. Las tormentas y los mares pueden romper la tubería, verticalmente suspendida, de extracción de agua fría e interrumpir la toma de agua caliente también. Para prevenir estos problemas, las tuberías pueden ser fabricadas de material relativamente flexible como los polímeros.

Para que una planta flotante pueda ser conectada a los cables de transporte de energía, necesita permanecer relativamente inmóvil. El amarre es un método aceptable, pero las tecnologías habituales de amarre están limitadas a profundidades de alrededor de 200 metros. Incluso en profundidades pequeñas, el costo del amarre puede ser un problema económico en estas empresas.

Independientemente del tipo de ciclo utilizado en las centrales maremotérmicas, los componentes fundamentales de todas ellas son los siguientes:

- Evaporadores y condensadores.
- Turbina.
- Tuberías y bombas.
- Estructura fija o flotante.
- Sistema de anclaje.
- Cable submarino.

Figura 30
Central maremotérmica ubicada mar adentro.



Fuente: Energía maremotérmica, comunidadambiental.org

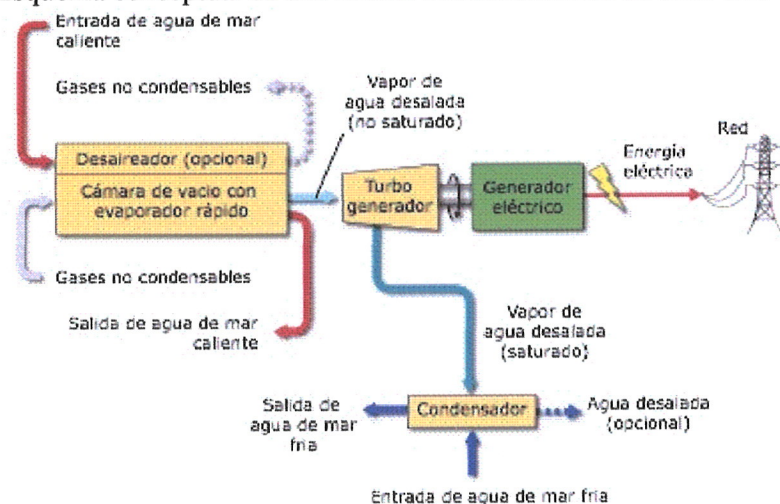
Existen básicamente tres tipos de sistemas de ciclo para el aprovechamiento de esta fuente de energía:

- abierto.
- cerrado.
- híbrido.

a. Sistema de ciclo abierto: En el sistema de ciclo abierto, denominado también ciclo de Claude, se usa el agua caliente de la superficie del océano como fluido de trabajo para accionar la turbina. El agua caliente se evapora súbitamente en un evaporador en el que previamente se ha extraído el aire, con una bomba de vacío. Al disminuir la presión en el evaporador por falta de aire, también disminuye la temperatura de ebullición del agua de mar, por lo que ésta hierve a la temperatura en que se encuentra en la superficie del mar. En el evaporador se obtiene una mezcla de vapor y agua líquida a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del agua. El vapor separado del agua líquida pasa a través de una turbina de expansión, accionándola, y seguidamente se dirige a un condensador, en el que se obtiene de nuevo agua líquida. El condensador utiliza el agua fría del mar como fluido refrigerante. El agua líquida procedente del evaporador y del condensador se retorna al mar. El proceso se repite con continuos suministros de agua caliente y fría.

El rendimiento de este sistema es muy bajo, de un 7%. Ello se debe a la baja temperatura de la capa caliente y la poca diferencia de temperatura entre de la capa fría y caliente. Además, es preciso consumir energía para bombear el agua fría de las profundidades del mar para condensar el vapor y para accionar la bomba de vacío del evaporador. Se estima que entre un 20% a un 30% de la potencia eléctrica generada se consume en las operaciones de bombeo. Además las bajas presiones del vapor de trabajo implica la necesidad de diseñar turbinas específicas, de gran tamaño, lo que dificulta el desarrollo de este tipo de sistemas.

Figura 31
Esquema conceptual de una central maremotérmica de ciclo abierto.

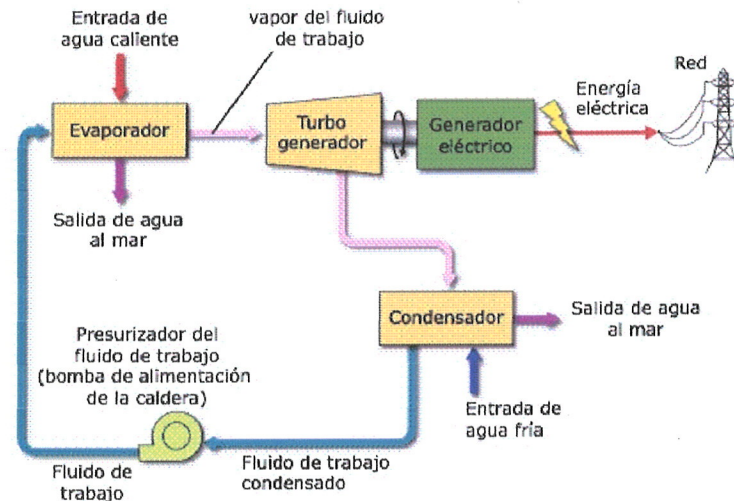


Fuente: Energía maremotérmica, comunidadambiental.org

b. Sistema de ciclo cerrado. En el sistema de ciclo cerrado, denominado también ciclo de Anderson, el calor se transfiere desde el agua caliente procedente de la superficie del mar a un fluido de trabajo de bajo punto de ebullición (como el propano, freón o el amoníaco) para evaporarlo a presiones más adecuadas (aproximadamente 10 bares). El vapor expandido se dirige a la turbina acoplada al generador que produce electricidad. El agua fría del mar pasa a través de un condensador que contiene el fluido de trabajo vaporizado transformándolo en líquido, que es reciclado a través del sistema.

Los sistemas de ciclo cerrado presentan la ventaja, respecto a los sistemas de ciclo abierto, de necesitar turbinas más pequeñas. Ello se debe a que la presión y el volumen específico del fluido de trabajo son más elevados. Pero se debe tomar en cuenta que las superficies de transferencia de calor en el evaporador y el condensador son más grandes debido al bajo rendimiento del sistema.

Figura 32
Esquema conceptual de una central maremotérmica de ciclo cerrado.



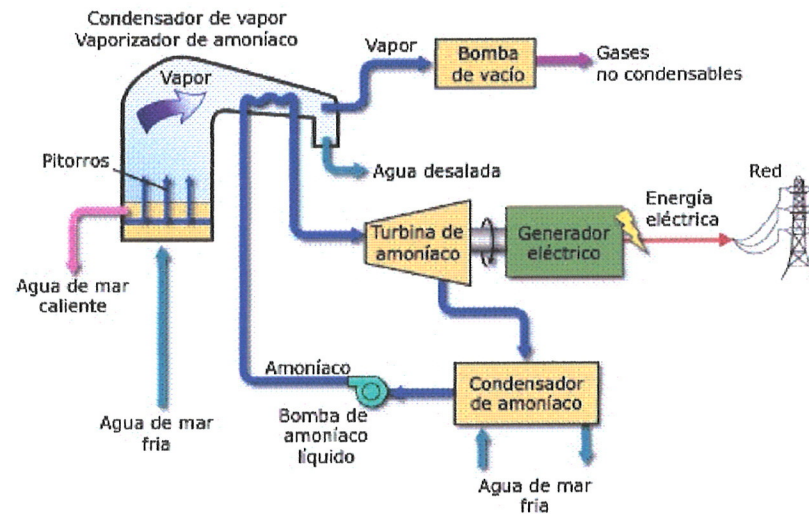
Fuente: Energía maremotérmica, comunidadambiental.org

c. **Sistema de ciclo híbrido.** Los sistemas híbridos combinan las características de los sistemas de ciclo abierto y de ciclo cerrado como medio de optimizar su funcionamiento. Con estos sistemas híbridos se persigue la producción de electricidad y la desalinización de agua de mar.

En un sistema híbrido, el agua caliente del mar entra en un evaporador donde es súbitamente evaporada, de forma similar a lo que ocurre en un proceso de evaporación de ciclo abierto. El calor del vapor obtenido se utiliza para vaporizar el fluido de trabajo, de bajo punto de ebullición, que circula en un ciclo cerrado. El fluido vaporizado acciona una turbina que produce electricidad. El vapor obtenido del agua de mar se condensa dentro de intercambiador de calor proporcionando agua desalinizada, que puede ser utilizada para consumo humano, agrícola etc.

Figura 33

Esquema conceptual de una central maremotérmica de ciclo híbrido.



Fuente: Energía maremotérmica, comunidadambiental.org

3. Costos de instalación y mantenimiento. Para la generación de energía se requiere de grandes inversiones de capital lo cual ha dificultado su expansión ya que los inversionistas buscan un retorno rápido como en el caso del petróleo, esto ha causado que la mayoría de inversiones grandes de energía limpia provengan por parte de los gobiernos pero ahora se ha despertado un interés por los inversionistas y esto ha permitido que la energía limpia se esté desarrollando cada vez más.

En energía se utilizan los costos por MW generado, y según estudios encontrados la energía maremotérmica estaría entre 1.2 a 1.6 millones de euros por MW, esto es un poco más alto que las demás energías limpias ya que no ha sido explotada y además afecta de un 15% a 20% la situaciones externas como la situación económica o política de donde se esté instalando la planta y donde se esté usando la energía.

Tomando en cuenta las situaciones que se observan en el mercado con los inversionistas para energía limpia se da una tasa de interés del 10%, un préstamo de

20 años y la planta maremotérmica con una disponibilidad de 80% se pueden estimar los costos de operación y mantenimiento en 1.5% anual sobre el capital invertido.

En la energía maremotérmica se tiene un gran factor a favor el cual nos ayuda a aumentar la rentabilidad. En efecto es también posible desalinizar el agua del mar lo cual permite proveer de agua potable a regiones con escasez de agua, esto permite ser proveedores de electricidad y agua usando la misma inversión.

4. Ventajas y desventajas:

a. Ventajas:

- Hay suficiente energía solar almacenada en las capas calientes superficiales del agua de los mares para cubrir la mayor parte de las actuales necesidades energéticas de la humanidad.
- Las plantas maremotérmicas usan fuentes naturales de energía renovables. El agua caliente de las superficies y el agua fría de las profundidades de los océanos reemplazan a los combustibles fósiles para generar electricidad.
- Las plantas maremotérmicas adecuadamente diseñadas producen poco o nada de dióxido de carbono que contribuye a la lluvia ácida o al calentamiento global.
- Los sistemas maremotérmicas pueden producir agua potable y electricidad. Esto constituye una ventaja significativa en islas donde el agua potable escasea.
- El agua fría del mar procedente de los procesos maremotérmicos puede tener diversos usos adicionales, ya que se aprovecha los cambios de

temperatura debido a los intercambiadores de calor; para aplicaciones en aire acondicionado, alimentación de peces, crustáceos, algas marinas y otras plantas marinas que encuentran en estas aguas profundas muchos nutrientes.

b. Desventajas:

- Las plantas maremotérmicas producen electricidad actualmente a un costo superior al que se obtiene mediante el empleo de combustibles fósiles.
- Las plantas maremotérmicas deben instalarse donde existan diferencias de temperatura a lo largo del año de 20°C. Las profundidades del océano deben estar disponibles muy cerca de la costa para economizar las operaciones.
- Aunque se han realizado numerosos ensayos de plantas maremotérmicas de pequeña escala, se precisa de la construcción de una planta piloto o de demostración de tamaño comercial para obtener una mayor información de su viabilidad.
- La construcción de plantas maremotérmicas y la colocación de tuberías en las aguas costeras pueden causar un daño localizado a los arrecifes y ecosistemas marinos.

5. Factibilidad en Guatemala. Las instalaciones cercanas a la costa ofrecen ventajas sobre las localizadas en aguas profundas. Las plantas construidas cerca de la tierra no requieren sofisticados amarres, largos cables para transportar la energía generada, o el importante mantenimiento asociado con los entornos de mar abierto. Pueden ser instaladas en áreas protegidas de tal manera que están relativamente resguardadas de las tormentas y del duro mar. La electricidad, el agua desalinizada, y el agua fría, rica en nutrientes, pueden ser transportadas desde las instalaciones cercanas a la costa vía puentes o carreteras. Para evitar la zona turbulenta de las olas así como para tener más próximo el acceso a los recursos de agua fría, las plantas maremotérmicas pueden ser montadas en una plataforma continental, en zonas con profundidades de aproximadamente 100 metros. Una planta de este tipo puede ser construida en un astillero, montada en el lugar, y fijada al fondo del mar. Este tipo de construcción ya se usa para plataformas marinas de extracción de petróleo. Los problemas adicionales que surgen al hacer operar una planta maremotérmica en aguas más profundas, pueden originar que estas instalaciones sean menos deseables ya que aumentan los costos.

Los problemas de las plantas montadas en plataformas son las condiciones adversas de los mares abiertos y la dificultad que origina el transporte del producto obtenido. Debido a la fuerza de las corrientes oceánicas y a la existencia de grandes olas estas instalaciones necesitan una ingeniería adicional y construcciones más costosas. Las plataformas requieren amplios pilotajes para mantener una base estable para el funcionamiento de la planta maremotérmica. El suministro de potencia puede también ser costoso por la longitud de los cables submarinos requeridos para alcanzar la tierra. Por razones antes mencionadas, las plantas montadas en plataformas no son muy atractivas.

Como se puede observar en la figura Zonas del mundo térmicamente favorables, Guatemala se encuentra en una zona del mundo térmicamente favorable. Pero para poder ser factible la generación maremotérmica además se necesita contar con aguas profundas cercanas a las costas del país.

Adicionalmente se buscan zonas donde las instalaciones puedan estar protegidas de las tormentas y olas grandes; como lo son las bahías y golfos. Al no encontrar estas zonas los costos aumentan. Ya que las instalaciones tienen que ser capaces de soportar los fenómenos encontrados mar adentro; por experiencias que se han tenido en las plataformas petroleras con respecto a los costos de una plataforma en una zona protegida, a una plataforma que opere mar adentro.

Guatemala no cuenta con zonas protegidas en sus costas lo que aumenta los costos de la construcción de las instalaciones. Además Guatemala no cuenta con aguas profundas cercanas a sus costas por lo que esto aumenta de mayor manera los costos, ya que las distancias de transportación de la energía generada son muy grandes aumentando no solo los costos de las instalaciones sino los costos de funcionamiento.

A pesar de que Guatemala se encuentra en una zona térmicamente favorable no es factible la generación maremotérmica por su falta de aguas profundas cerca de las costas del país.

C. Energía mediante corrientes marinas.

1. Características Generales. Las corrientes marinas son los movimientos permanentes de traslación de masas de agua en los océanos y en mares más extensos, ya sean profundas o superficiales. Se originan por el movimiento de rotación terrestre, los vientos planetarios o constantes y la configuración de las costas y ubicación de los continentes. Las corrientes tienen una alta predictibilidad, ya que tanto las corrientes provocadas por causas inerciales como las mareales contienen caudales casi constantes según la época del año, los cuales son conocidos. Estas además poseen una alta capacidad energética, pues la densidad del agua del mar es en promedio 1.012 Kg/m^3 , lo cual se traduce a que una corriente de agua marina que discurre a una velocidad de 2 m/s posee por cada m^2 de área perpendicular a su flujo, la misma energía que una corriente eólica de 10 m/s (Gálvez, 2012). En la Figura 1 se exponen las principales corrientes marinas existentes alrededor del mundo.

Las corrientes marinas representan una fuente energética renovable cuyo potencial mundial no ha sido cuantificado; sin embargo, se han realizado estimaciones tomando como referencia la tecnología existente en las cuales se supone que al día de hoy la potencia útil de las mismas alcanza los 3,000 TWh al año, convirtiéndose en una de las mejores formas de aprovechamiento de la energía cinética contenida en el mar. En el 2006, se publicó en Estados Unidos un informe en el cual se calculó que la captura de una milésima de la energía disponible en la Corriente del Golfo (Figura 1), tiene 21,000 veces más energía que las Cataratas del Niágara en un flujo de agua y que es 50 veces el flujo total de los ríos de agua dulce de todo el mundo. (Bonjean, 2002)

La energía cinética de las corrientes marinas se pueden extraer en su mayor parte, de la misma forma que una turbina eólica extrae energía del viento, utilizando varios tipos de rotores de flujo abierto. El potencial de generación de energía eléctrica a partir de las corrientes marinas de la marea es considerablemente alto, por lo tanto existen diversos factores que hacen que la generación de electricidad a partir de las corrientes marinas sea muy atractiva comparándola con otros tipos de energías renovables, entre estos factores, Gálvez menciona los siguientes:

- Los recursos potencialmente grandes que pueden ser explotados con un impacto ambiental casi nulo, lo cual determina a las corrientes marinas como uno de los métodos menos perjudiciales para la generación de energía a gran escala.
- Existe previsibilidad de los recursos de modo que, a diferencia de la mayoría de las otras energías renovables, la disponibilidad futura de energía puede ser conocida y prevista.
- La viabilidad de instalaciones de energía de corrientes marinas para proporcionar también energía a la red eléctrica de base, especialmente si están interconectadas dos o más matrices independientes, con flujos máximos no coincidentes en el tiempo.

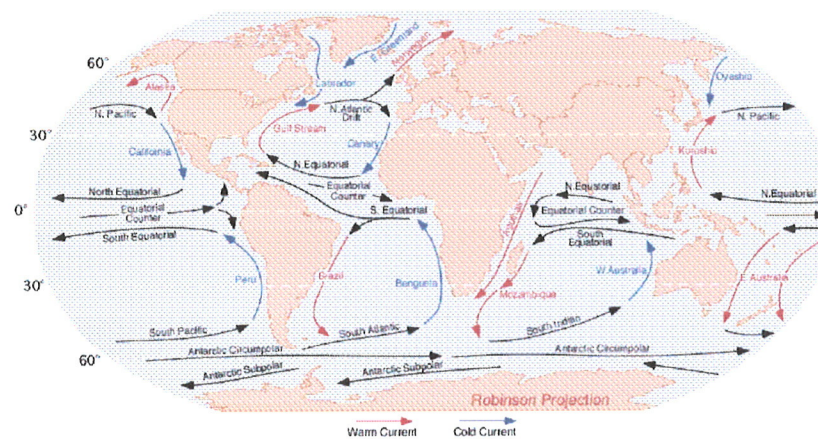
a. Tipos de corrientes marinas

1) Según su temperatura. Una clasificación sugerida de los movimientos de las corrientes, proviene de la temperatura de las masas de agua que se desplazan en ellas, las cuales se pueden dividir en:

- **Cálida:** Flujo de las aguas superficiales de los océanos que tiene su origen en la Zona Intertropical y se dirige, a partir de las costas orientales de los continentes (América del Norte y Asia), hacia las latitudes medias y altas en dirección contraria a la rotación terrestre, como por ejemplo: la Corriente del Golfo, la Corriente de Kuroshio o Corriente del Japón. En el hemisferio sur, estas corrientes son casi inexistentes, por la configuración de las costas y por el hecho de que en las latitudes de clima templado y frío casi no existen zonas terrestres. (Bonjean, 2002)
- **Fría:** Flujo de aguas frías que se mueven como consecuencia del movimiento de rotación terrestre, es decir de este a oeste, a partir de las costas occidentales de los continentes por el ascenso de aguas frías de grandes profundidades en la zona intertropical y subtropical. Entre algunos ejemplos de las corrientes frías se pueden encontrar: la corriente de Canarias, la de Benguela, la de Humboldt o del Perú y la de California, todas ellas en las costas occidentales de los continentes de la zona intertropical y subtropical. Las corrientes de Oyashio (en el océano Pacífico y la de Groenlandia o corriente del Labrador, también se producen por el ascenso de aguas frías y podrían definirse como una compensación al efecto de las corrientes cálidas cuando alcanzan las altas latitudes en las costas occidentales de los continentes. Estas corrientes frías sólo se presentan en la zona ártica debido a que la zona antártica es mucho más uniforme y solo tiene una corriente continua circumpolar en la que no existe un ascenso de aguas frías provocado por el relieve submarino. (Bonjean, 2002)
- **Mixta:** Entre esta clasificación entran algunas corrientes que surgen en las costas occidentales de los continentes en las zonas próximas a los trópicos se desplazan hacia el este como corrientes frías pero, en la medida en que se desplazan por los océanos más amplios, se van calentando superficialmente y se convierten en cálidas. Por ejemplo, las corrientes de Canarias y de Benguela, que son de aguas frías, se transforman en la corriente ecuatorial del norte y del sur

(respectivamente) que son de aguas cálidas. Y lo mismo podemos decir de la de California y la del Perú en el Océano Pacífico. (Bonjean, 2002)

Figura 34
Principales corrientes marinas alrededor del mundo



Fuente: Pidwirny, M. Scott, J., 2010.

2) Según sus características. La segunda clasificación de las corrientes marinas incluye el tipo de corriente a la cual se asocia el desplazamiento de masas de aguas en cualquier medio. Se asocia según el fenómeno que genera el movimiento. Estas se dividen en:

- **Corrientes oceánicas:** Estas corrientes son producidas por el movimiento de rotación terrestre por lo que presentan un movimiento constante generalmente en sentido este - oeste en la zona intertropical o en sentido inverso, de oeste a este; es decir, contrario a la rotación terrestre en las latitudes medias o altas. En este tipo de corrientes sucede lo mismo que con los vientos constantes o vientos planetarios, los cuales producen desplazamientos por efecto de la inercia: en la zona intertropical, las corrientes se mueven en sentido contrario a la rotación terrestre, las aguas del fondo oceánico acompañan a nuestro planeta en el movimiento de rotación de oeste a este, pero las aguas superficiales se van quedando atrás por inercia, lo que significa una corriente ecuatorial de gran amplitud y la de mayor volumen de agua que se produce en nuestro planeta. Esto quiere decir que la corriente ecuatorial se desplaza de este a oeste por inercia ya que las aguas presentan una resistencia a acompañar a nuestro planeta en su

movimiento de rotación; pero en las latitudes medias y altas, las corrientes se mueven de oeste a este debido también al mismo principio de inercia, aunque en este caso, se trata de un efecto inercial que va aumentando progresivamente a medida que aumente la latitud, incrementándose su velocidad y llegando a superar ligeramente a la propia velocidad de la rotación terrestre. (Pidwirny, 2010)

Por otra parte, se considera que esta circulación oceánica tiene un patrón similar al de los vientos planetarios que interactúan mutuamente, tanto en su velocidad de desplazamiento como a la cantidad de calor que trasladan, por lo que involucran el movimiento de grandes masas de aguas, afectando la temperatura de la capa superior y repartiendo una enorme cantidad de humedad y, por ende, de calor en el sentido de los meridianos. Por lo tanto se obtiene que las corrientes marinas sean las que inciden en los cambios abismales de temperatura en las distintas zonas costeras del mundo.

- ***Corrientes de marea:*** Son corrientes periódicas con ciclo diario producidas por la atracción lunar y en menor grado, del Sol. Son corrientes superficiales de las aguas del mar y, por lo tanto, involucran en su mayor parte aguas cálidas. (Pidwirny, 2010)
- ***Corrientes de oleaje:*** Son las corrientes que modifican en gran parte el litoral y son producidas por los vientos, especialmente por las tempestades o huracanes que se asocian al movimiento de las masas de aire tanto de origen continental como marítimo. (Pidwirny, 2010)
- ***Corrientes de deriva litoral:*** Estas corrientes constituyen la resultante de la acción de las corrientes oceánicas al llegar a las costas cuyo trazado presenta alguna inclinación o desviación con respecto a la dirección original de las mismas. El ejemplo de la corriente ecuatorial atlántica al llegar a las costas del Brasil, es muy claro en este sentido, ya que casi todas las aguas de la misma son desviadas hacia el noroeste porque las costas tienen esta dirección. (Pidwirny, 2010)
- ***Corrientes de densidad:*** Estas corrientes definen la presencia vertical de dos masas de agua con distinta densidad y se presentan en los lugares de contacto entre aguas de distinta temperatura: una fría a mayor profundidad (por su mayor densidad) y otra cálida en la superficie. Generalmente, se desplazan en sentido contrario, por ejemplo, en el estrecho de Gibraltar suelen presentarse muchas

veces unas corrientes superficiales hacia el oeste, mientras que en el fondo penetra en el Mediterráneo una gran cantidad de agua procedente del Atlántico mucho mayor en proporción porque el Mar Mediterráneo es deficitario en volumen de agua (es mayor la evaporación que el caudal aportado por los ríos y las lluvias). También se producen en los estrechos daneses a la salida del Mar Báltico. (Pidwirny, 2010)

3) Según la profundidad. Otra clasificación de corrientes sugerida es según la profundidad en la que se genera la corriente marina, entre estas se encuentran:

- ***Corrientes de profundidad:*** Son corrientes generadas debajo de los 1,000 metros de profundidad (picnoclina), principalmente debido a la rotación terrestre, que da origen a la surgencia de aguas profundas, y por lo tanto frías, en las costas occidentales de los continentes en las latitudes intertropicales. El motivo de estas corrientes de profundidad podría explicarse como una especie de compensación con relación a las corrientes superficiales. (Pidwirny, 2010)
- ***Corrientes de superficie:*** Son las corrientes originadas por la acción giratoria de la Tierra, y que se ven afectadas por los vientos predominantes, los cuales les transmiten gran cantidad de energía y generan corrientes circulares a escala terrestre (en la franja ecuatorial) o en forma de espiral, formando "bucles" en las latitudes próximas a los trópicos: el giro de estas corrientes se produce hacia la derecha en las latitudes próximas al Trópico de Cáncer y hacia la izquierda en las latitudes del Trópico de Capricornio. Estas corrientes influyen mucho en el clima modificando las temperaturas de las regiones por donde pasan. A su vez, estas corrientes dependen en parte de la dirección de los vientos. (Pidwirny, 2010)

b. *Causas físicas de las corrientes marinas.* Como ya se mencionó, las corrientes marinas son causadas principalmente por el cambio de altura en las mareas como resultado de las interacciones gravitacionales entre la tierra, la luna y el sol; los cuales hacen que el mar se mantenga en movimiento y que fluya. Así mismo, existen otros efectos físicos que influyen directamente en las mareas, como las diferencias de temperatura y salinidad en las regiones y el efecto de Coriolis que se debe a la rotación de la Tierra. El efecto de Coriolis consiste en la existencia de una aceleración relativa de un cuerpo que se encuentra en movimiento en un sistema de referencia en rotación (no inercial), este hace que el objeto que se mueve sobre el radio de un disco en rotación tienda a acelerarse con respecto a ese disco según su movimiento. (Gálvez, 2012)

2. Maquinaria utilizada. Actualmente existe una amplia variedad de generadores para el aprovechamiento de esta fuente energética; en la mayoría, su funcionamiento es basado en ser posicionados en medio del flujo y corresponden a distintos diseños que pueden agruparse en los siguientes tipos:

- Rotores de flujo axial, cuyo eje es horizontal y en la misma dirección del flujo y que pueden tener una similitud en la forma con los generadores eólicos o con las hélices que propulsan los buques, pudiendo incluso estar situados en el interior de toberas que direccionan y aceleran el flujo de la corriente.
- Rotores de eje vertical, reciben el flujo de la corriente en sentido transversal al eje y lo forman conjuntos de palas verticales que giran sobre ese eje, impulsadas transversalmente por el flujo.
- Alerones que basculan alternativamente al ser impulsadas por el flujo, estando la aleta en posición horizontal o en un plano ligeramente inclinado con la dirección de la corriente y debido a la fuerza de sustentación que la corriente provoca, el alerón oscila en un movimiento vertical que por medio de una palanca acciona un servomotor hidráulico que produce energía eléctrica.

En cuanto la base de los mecanismos para interponerse en la corriente, puede ser una estructura apoyada por gravedad en el fondo marino o bien una estructura pilotada en el lecho marino al modo en que lo son los grandes generadores de aprovechamiento eólico offshore y también estructuras flotantes, que actúan bien a flote o en inmersión y en todos los casos debe disponerse el correspondiente sistema de fondeo.

a. Prototipos construidos en otros países.

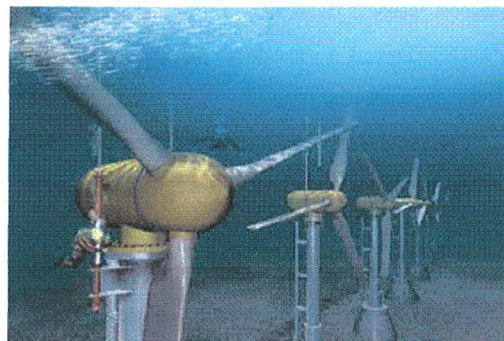
1) Sistema de turbinas Lånstrøm. Las turbinas tipo Lånstrøm fueron desarrolladas en Noruega por una de las empresas más avanzadas en el sector de energías renovables: Hammerfest Strøm. Estas turbinas cuentan con 30 metros de alto y con una hélice de 3 palas, con un diámetro de 20 metros; las mismas pueden llegar a ser colocadas a 100 metros de profundidad. Su estructura permite desarrollar 1 megavatio (MW) de potencia. Estas turbinas fueron probadas por primera vez en Noruega, generando excelentes resultados y un impacto ambiental casi nulo. Se pretenden realizar proyectos alrededor de Europa utilizando este tipo de turbina; por ejemplo en Escocia e Irlanda del Norte, mediante la empresa Scottish Power, se instalarán 20 turbinas para generar 60 MW, los cuales podrían suministrar electricidad a 40,000 hogares. Los proyectos piloto están previstos para sumergirse en las costas de Pentland Firth, Sound of Islay y Antrim, contando así con la construcción de 60 turbinas.

En Pentland Firth se calcula que el proyecto será operativo hasta el año 2020, sin embargo comenzará a funcionar por tramos. Es lugar se sitúa en el mar situado frente a las costas Caithness y Sutherland, el cual ha sido catalogado como una de las zonas marinas que cuenta con mayor potencial en el mundo para generar energía debido a las mareas que generan corrientes de hasta 12 nudos (12 millas marinas por hora), que para girar las turbinas arrojan una fuerza equivalente a un viento huracanado que corriera a 360 nudos de velocidad.

Figura 35
Esquema de la turbina tipo Lànstrøm.^[2]



Figura 36
Diseño preliminar de uno de los proyectos de Scottish Power.^[2]



2) *Sistema SeaGen*. El sistema de turbinas SeaGen (Sea Generation) fue creado en el Reino Unido por la empresa Marine Current Turbines. Este proyecto se inició en 1999, instalándose en el año 2003 un prototipo experimental denominado SeaFlow de 300Kw, con un solo rotor de 11 m de diámetro descargando la energía a una carga pasiva. Actualmente, la altura total de cada turbina varía entre 40 y 43 metros según las condiciones y límites de ubicación. Cuenta con dos hélices de 16 metros de diámetro y con una cabina de mandos en lo más alto de su estructura, la cual fue diseñada para permitirle movimiento a las hélices y que estas puedan ser sacadas al exterior para proporcionarles un mantenimiento. El peso de todo el sistema se aproxima a 1,000 toneladas. Este prototipo se ha ido mejorando con el paso de los años en base a pruebas, se considera por lo mismo como uno de los más avanzados y novedosos del mundo en el ámbito de la energía renovable.

El primer proyecto SeaGen fue instalado en abril del 2008 en Strangford Lough, UK. Con este proyecto se consiguió generar 1.2MW, los cuales son suficientes para abastecer 1000 hogares. Actualmente se han instalado granjas de turbinas en la costa de Anglesey (Gales), con una capacidad de 10.5 MW y también se han estudiado varios proyectos en Estados Unidos utilizando esta tecnología. ^[1]

Figura 37

Bosquejo de la turbina SeaGen. [2]

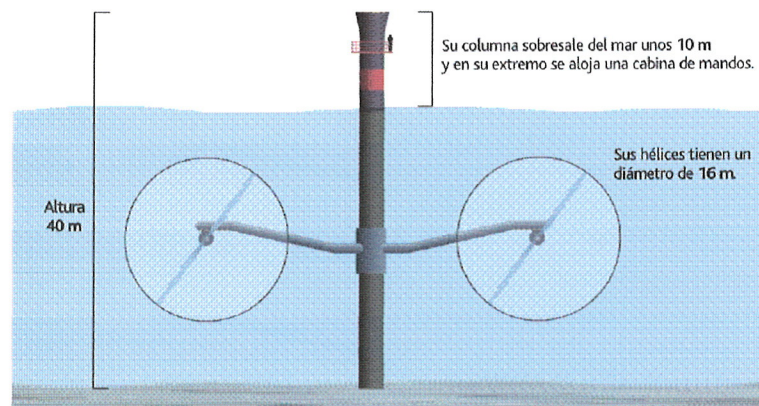


Figura 38

Sistema SeaGen instalado en Strangford Lough, UK.



Fuente: Siemens, W. Sea Generation. 2011.

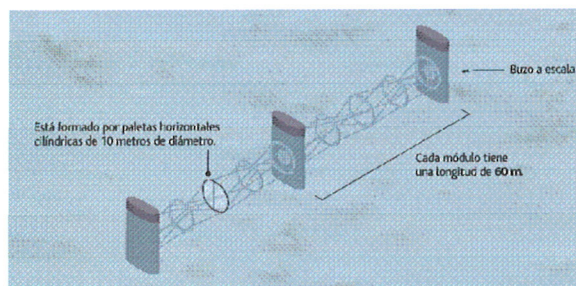
3) *Sistema THAWT*. El prototipo THAWT (Transversal, Horizontal and Axial Water Turbine), consiste en una estructura cilíndrica que gira en torno a un largo eje conforme el flujo de agua, esta está conformada por una serie de hélices que giran sobre su propio eje en ambas direcciones. Cada módulo tiene una longitud de 60 metros y las paletas horizontales cilíndricas cuentan con un diámetro de 10 metros. [2]

Este proyecto fue desarrollado por la Universidad de Oxford, Estados Unidos, la cual realizó pruebas a escala de un nuevo dispositivo que rebajaría los costos de producción en un 60% y los de mantenimiento en un 40% con respecto a otros sistemas construidos para la obtención de energía de corrientes marinas. [4]

El diseño alargado favorece la instalación de una cantidad menor de generadores pero con mayor área de cobertura, por lo mismo se obtiene que cada módulo puede llegar a generar hasta 12 MW, produciendo así mayor energía que cualquier otro dispositivo de generación. La corriente se envía al continente a través de un cable subterráneo. [4]

Figura 39

Bosquejo del sistema THAWT. [2]



4) *Sistema Vivace*. El sistema VIVACE (Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean), es un proyecto desarrollado por la Universidad de Michigan y liderado por el Ing. Michael Bernitsas. El concepto del sistema es muy simple y consiste en varios cilindros colocados de forma horizontal, respecto a su base de apoyo en el fondo del mar, los cuales son sumergidos en corrientes de agua que generan unos vórtices alternos aguas abajo del obstáculo. La estructura de estos vórtices alternos hace que

el cilindro (obstáculo) se desplace en sentido vertical, para luego transformar esa energía mecánica en energía eléctrica.

Este dispositivo tiene la gran ventaja de aprovechar las corrientes de movimientos lentos en los océanos o incluso en los ríos por sus reducidas dimensiones y su gran sensibilidad al contacto con las corrientes, constituyéndose en una fuente real y factible de energía. Se tiene estimado que este dispositivo genera alrededor de 0.5 MW.

Figura 40
Vista de perfil de un dispositivo VIVACE. [2]

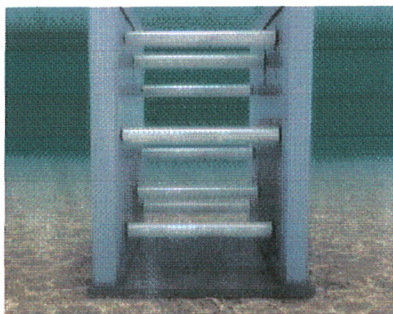
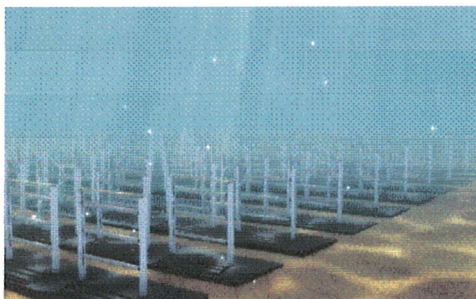


Figura 41
Bosquejo del sistema VIVACE instalado. [2]



3) Capacidad de generación y costos de instalación y mantenimiento.

Actualmente, existen muchas empresas que se dedican a diseñar nuevos prototipos para la generación de energía mediante las corrientes marinas, esto es debido al éxito alcanzado con los prototipos que han sido instalados en las costas europeas. Sin embargo, la mayoría de estos diseños se encuentran en la fase conceptual y bajo patente, un número de diseños relativamente menor son los que se posicionan en la fase de desarrollo del proyecto que pueden construir prototipos experimentales de no más de 100 KW, los cuales son sometidos a ensayos en condiciones reales de operación; e incluso son muy pocos los proyectos que han alcanzado un nivel de desarrollo comercial.

El continente europeo es visto ante el mundo como el pionero en este tipo de tecnologías y es principalmente el Reino Unido en donde la mayoría de estos proyectos se llevan a cabo; esto se debe a que, según estudios, el litoral de sus costas posee las condiciones idóneas para albergar estas instalaciones, mencionando también que este país es el que aporta sustanciales fondos destinados a la investigación y el desarrollo en tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables marinas como consecuencia de los retornos procedentes del campo petrolífero del mar del norte.

En este momento el generador que está en un mayor grado de desarrollo debido a que ya cuenta con un prototipo en producción industrial, es el ya mencionado: SeaGen de la empresa Marine Current Turbines. La instalación del primer prototipo experimental en el 2003 (SeaFlow), tuvo un costo de 3.4 millones de libras esterlinas, se generaron 300 KW y se obtuvo un rendimiento del 40%. [1]

A partir del año 2004 se desarrolló la fase de demostración industrial, la cual se instaló en Strangford Narrows, U.K.; como se mencionó anteriormente, el primer generador comercial fue instalado en abril del 2008, contando con un presupuesto de 8.5 millones de libras esterlinas, generando una potencia de 1,2 MW. [1]

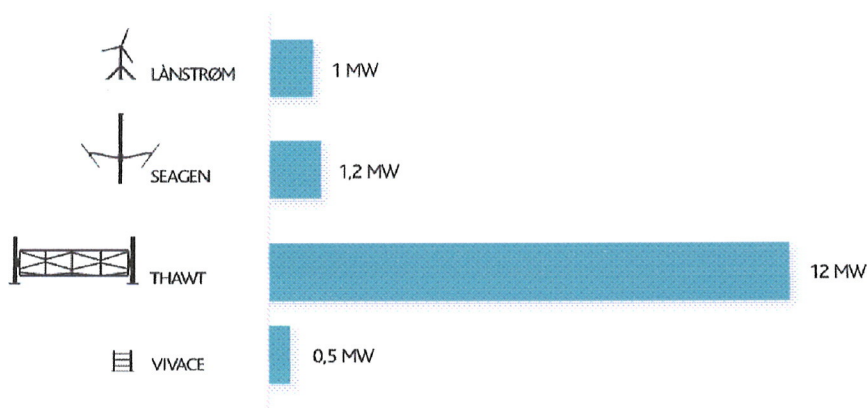
Así mismo, con el sistema VIVACE, estudios reflejan que un grupo de cilindros con un tamaño de 1 m^3 , colocados en un lugar con una corriente de agua de

tres nudos sería capaz de producir 51 W de potencia, lo que resulta más eficaz que otros sistemas para el mismo tamaño. También se obtiene que con una granja de cilindros construido en el lecho marino de una superficie de 1 km por 1.5 km y una altura de una casa promedio de dos plantas, con un flujo de tres nudos, podría generar la energía suficiente para 100,000 hogares y sus costos incluso pueden llegar a ser menores que los de la energía eólica. ^[4]

En la Figura 42 se muestra una comparación de la generación de los distintos sistemas de generación de energía por medio de corrientes estudiados con anterioridad.

Figura 42

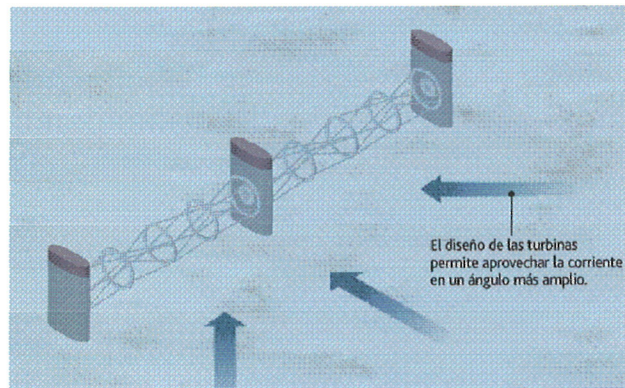
Comparación de la potencia generada mediante los distintos prototipos estudiados. [2]



Según lo observado en la Figura 9, entre los prototipos estudiados en este proyecto, el más eficiente es el sistema THAWT, esto es debido a que los demás sistemas se enfocan en aprovechar la corriente marina en una sola dirección y el sistema THAWT propuesto por la Universidad de Oxford cuenta con mayor área de cobertura y las turbinas pueden generar energía desde distintos ángulos (Figura 10); por lo tanto, el diseño de este sistema permite aprovechar de una manera más eficiente la energía cinética contenida en las corrientes marinas.

Figura 43

Bosquejo del área de cobertura del sistema THAWT. [2]



4. Ventajas y desventajas. A continuación se muestran algunas de las ventajas que se obtienen al generar energía mediante las corrientes marinas:

- Es un tipo de energía extraído de la naturaleza, por lo que se considera auto-renovable.
- No es contaminante para la vida marina.
- Los sistemas de generación de este tipo de energía no producen contaminación auditiva o visual, ya que se encuentra sumergido en el fondo del mar.
- Produce un bajo costo de materia prima.
- Cualquier lugar costero es capaz de producirla.

Entre las desventajas que conlleva la utilización de estos métodos de generación de energía se pueden encontrar:

- La localización de estos prototipos tiene que ser puntual.
- Las corrientes marinas dependen de la amplitud de las mareas, por lo que no se pueden colocar en cualquier lugar.
- El traslado de energía resulta ser muy costoso debido a que se debe colocar un cableado subterráneo para llevarse a cabo.

- Debido a que estos prototipos se instalan en el fondo del mar se produce un impacto en la navegación.

5. Capacidad de instalación en Guatemala. Analizando las condiciones de los océanos del país se llegó a la conclusión de que la instalación de la mayoría de la maquinaria necesaria para el aprovechamiento de este tipo de energía requiere de un alto costo y complejidad que conlleva la construcción y la instalación del mismo en el fondo del mar, ya que los costos se elevan a causa de la selección de materiales a utilizar para que sean más duraderos y resistentes al agua salada para que no se eleven tanto los costos con el mantenimiento o reparación.

Para realizar el análisis de viabilidad sobre la instalación de estos prototipos en las costas del país, fue indispensable conocer no solo la inversión económica que se requiere para ello, sino también las velocidades de las corrientes de las costas del país para verificar si son las necesarias para la generación de este tipo de energía renovable. Para ello se consultaron distintas fuentes, principalmente páginas de registro de la NASA para describir el movimiento de los océanos mediante satélites, estas páginas proporcionaron bases de datos con las velocidades de corrientes en ambos océanos. Cabe mencionar que otro método para medir las corrientes son las boyas a la deriva, las cuales son dispositivos flotantes que se utilizan para la recolección de datos oceanográficos, pueden ser libres (ir con la corriente) o anclados (estacionarios).

Tras realizar un análisis comparativo sobre las velocidades promedio de las corrientes en las costas del Océano Pacífico y el Océano Atlántico guatemaltecas (Tabla 3), se identificó que el Océano Atlántico posee corrientes con una velocidad muy baja en comparación a las corrientes que componen el Océano Pacífico; por lo que se obtuvo que el Océano Pacífico cuenta con mayores velocidades y por consiguiente mayor capacidad de aprovechamiento de este tipo de energía.

Tabla 3

Velocidad de corrientes del Océano Pacífico en las costas de Guatemala. [30]

<i>Datos del 2013</i>	
Lugar	Velocidad de corrientes promedio (m/s)
Costas del Océano Atlántico, Guatemala	0.195
Costas del Océano Pacífico, Guatemala	0.319

Se comparó también la velocidad de corrientes promedio actual en las costas de Guatemala con las costas de Strangford Lough en el Reino Unido, lugar en donde se sitúa el sistema SeaGen, el cual es el que cuenta con más avances tecnológicos entre todos los prototipos creados para la generación de energía mediante este método. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Comparación entre la velocidad de corrientes promedio de Stangford, U.k. y las Costas del Océano Pacífico. [30]

<i>Datos del 2013</i>	
Lugar	Velocidad promedio (m/s)
Stangford Lough, U.K.	0.122
Costas del Océano Pacífico, Guatemala	0.319

Aunque el método de producción de energía parezca más efectivo en las costas de Guatemala ya que estas poseen una mayor velocidad de corrientes promedio que la del Reino Unido, este método no sería factible para el país; esto se debe a los altos costos de construcción, instalación y mantenimiento que este tipo de maquinaria exige, y Guatemala no cuenta con los recursos necesarios para ello. Mientras tanto en

el Reino Unido, el gobierno sí cuenta con fondos destinados a la investigación y aplicación de nuevas tecnologías.

D. Energía mareomotriz.

1. Características generales. La energía renovable es un tipo de energía el cual proviene de una fuente inagotable como lo es la energía del sol, el viento, las corrientes, las mareas, el calor geotérmico, etc. Lo más importante de este tipo de energía es que la emisión de gases de efecto invernadero es nula. Al contrario existe la energía no renovable que usa fuentes de energía ubicadas en la naturaleza que al ser consumidas en su totalidad no pueden ser sustituidas. Entre estas están: los combustibles fósiles y nucleares. (Srensen, 2011)

Dentro de las energías renovables se decidió considerar las energías por medio del mar, ya que es un tipo de energía inagotable. Además es una energía que no se ha estudiado mucho en Guatemala y que tiene mucho potencial de explotación.

La energía mareomotriz es uno de los tipos de energía más antiguos utilizados por los humanos. De hecho, los molinos de marea han sido utilizados en las costas británicas, francesas y españolas. Estos consisten básicamente en un estanque de almacenamiento, el cual es llenado por el ingreso de la marea a través de una esclusa y se vacía durante la salida de la marea por medio de una rueda de agua. (Council, 2012)

La energía mareomotriz es no contaminante, confiable y predecible, a diferencia del viento y del oleaje.

La energía mareomotriz puede ser explotada de las siguientes maneras:

- Con la construcción de barreras semipermeables a través de estuarios con una amplia diferencia de alturas de la marea.
- Mediante el aprovechamiento de las corrientes marítimas en alta mar.

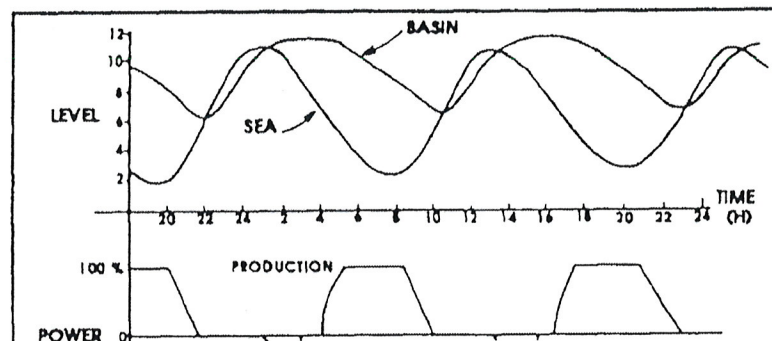
Las presas permiten a las mareas llenar un estuario a través de compuertas y se vacían por medio de turbinas. La corriente de la marea puede ser aprovechada en alta mar donde se utiliza dispositivos submarinos similares a las turbinas de viento. (Council, 2012)

La mayoría de los conceptos modernos acerca de las mareas, emplean un enfoque de represa con turbinas hidráulicas. Un inconveniente de la energía mareomotriz es su factor de baja capacidad, esto se debe a los tiempos de generación que son de cada 6 horas y el ciclo de mareas que es de cada 12 horas. (Council, 2012)

El rango de las mareas puede variar en una amplitud de 4.5m hasta unos 12.4m de sitio a sitio. Ahora bien, el rango de mareas debe ser por lo menos de 7m para un funcionamiento económico. (Council, 2012) Actualmente, en Guatemala el rango de mareas es de 1.5m aproximadamente esto si no ocurre cambios bruscos en el clima, debido a tormentas o sismos. (INSIVUMEH, 2013)

Figura 44

Ciclo de mareas y producción.



Fuente: (Hammons, 1993)

En la figura ciclo de mareas y producción se puede observar el ciclo productivo de una planta undimotriz, este sistema es aplicable a Guatemala, ya que el ciclo de las mareas es de cada 12 horas aproximadamente. Donde se observa que se

genera la mayor potencia durante el vaciado de la bahía o estuario cuando el nivel del mar está bajo.

Normalmente la generación de la energía mareomotriz consiste en la construcción de una presa a través de un estuario que bloquee el ingreso y egreso de la marea. La presa incluye una compuerta que se abre para permitir que la corriente fluya en la cuenca; luego la compuerta es cerrada, y como el nivel del mar baja, la carga de agua utilizando la tecnología hidráulica tradicional, mueve las turbinas para generar electricidad. Las presas pueden ser diseñadas para generar electricidad, ya sea en el lado de flujo o en lado de la inundación, o en ambos. (Council, 2012)

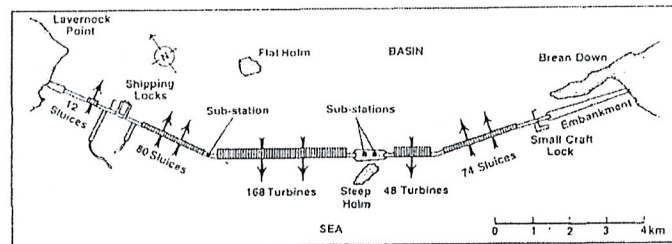
2. Maquinaria y elementos del proyecto. La tecnología necesaria para convertir la energía mareomotriz en electricidad es muy similar a la tecnología utilizada en las centrales hidroeléctricas tradicionales. El primer requisito es una presa a través de una bahía o estuario, la cual tiene compuertas a su paso para regular el paso del fluido. La construcción de represas es un proceso costoso. Por lo tanto, los mejores sitios para una instalación mareomotriz son aquellos en los que la bahía tiene una abertura estrecha, reduciendo así la longitud de la presa que se requiere. (Council, 2012)

En ciertos puntos a lo largo de la presa, las compuertas y turbinas son instaladas. Estas deben de estar cerca de una casa de máquinas donde se ubica equipo electromecánico. Cuando el diferencial de altura es lo suficientemente grande en los dos lados de la presa, las puertas se abren. La carga hidrostática que se crea, hace que el agua fluya a través de las turbinas, convirtiendo en electricidad este movimiento. (Laleu, 2009) Equipo de seguridad como redes debe ser instalado para la protección de las turbinas al igual que para los animales que viven en el hábitat.

La electricidad es generada por el agua que fluye dentro y fuera de la bahía o estuario. Esta energía eléctrica se transporta por medio de líneas de transmisión. Como hay dos mareas altas y dos mareas bajas cada día, la generación eléctrica en las

centrales mareomotrices se caracteriza por periodos de máxima generación cada doce horas, sin generar electricidad en las seis horas que hay entre ellas. De manera alterna, las turbinas pueden ser utilizadas para bombear agua en la cuenca detrás de la presa durante los períodos de baja demanda de electricidad. Esta agua puede ser liberada cuando la demanda en el sistema está en su pique, permitiendo a la central mareomotriz funcionar con características de una central hidroeléctrica. (Laleu, 2009)

Figura 45
Barrera de la central Severn. UK.



Fuente: (Hammons, 1993)

Se muestra el esquema propuesto para la central mareomotriz de Severn Barrage en el Reino Unido. Donde se observa las partes que componen a una presa como lo son: las esclusas, terraplén, turbinas, subestaciones y el paso para embarcaciones. (Hammons, 1993) En el caso particular de la central mareomotriz la Rance, Francia esta contiene un equipo electromecánico de 24 alternadores con capacidad de 10MW cada uno, 3 transformadores, una conexión a una estación de 225KW, un dique de 163.6m y una barrera de 145.1m. (Laleu, 2009)

3. Capacidad de generación. El potencial mundial total de energía oceánica de las mareas se ha estimado en aproximadamente 64,000 MW. En la bahía de Fundy, Canadá las variaciones de la marea están entre 7-9 m, con un potencial de 800 hasta 14,000 MW. (Council, 2012) En Guatemala las variaciones de alturas están en alrededor de 1.5m según el INSIVUMEH.

Actualmente, a pesar de que la tecnología necesaria para aprovechar la energía de las mareas está bien establecida, la energía mareomotriz es costosa, y sólo hay una estación principal generadora de mareas en funcionamiento. Esta es una de 240MW

en la desembocadura del estuario del río La Rance, en la costa norte de Francia. La estación de generación La Rance ha estado en operación desde 1966 y ha sido una fuente muy confiable de electricidad para Francia. Se suponía que era una de las muchas plantas de energía mareomotriz en Francia, hasta que el programa nuclear fue ampliado considerablemente en los últimos años de 1960. (Laleu, 2009)

Hay una instalación experimental de 20 MW en Annapolis Royal en Nueva Escocia en la bahía de Fundy, y una planta de 0,4 MW de energía mareomotriz cerca de Murmansk en Rusia. El Reino Unido tiene varias propuestas en curso. (Council, 2012) En Guatemala no existe un proyecto funcionando para tener una estimación clara, ya que depende de la maquinaria a instalar, el nivel altura del diferencial entre la pleamar y la bajamar, el área de la bahía o estuario y longitud de la presa.

Estudios se han realizado para determinar el potencial de varios tipos de energía mareomotriz en lugares alrededor del mundo. Se ha estimado que una presa a través del río Severn en el oeste de Inglaterra podría suministrar hasta un 10% de las necesidades eléctricas del país (12 GW). Del mismo modo, varios sitios en la Bahía de Fundy, la ensenada de Cook en Alaska y el Mar Blanco en Rusia tienen el potencial de generar grandes cantidades de energía eléctrica. (Council, 2012)

4. Costos de instalación y mantenimiento. La energía mareomotriz es una forma de energía hidroeléctrica de baja carga y utiliza equipos de generación hidroeléctrica de baja carga, en algunos casos ha estado en uso durante más de 120 años. Los principales factores que determinan la rentabilidad de un sitio con energía mareomotriz son la longitud y altura de la presa, y la diferencia de altura entre la pleamar y la bajamar. (Council, 2012)

Colocar un depósito fuera de la costa, en lugar de usar la típica presa, elimina los problemas ambientales y económicos que han impedido el despliegue a escala comercial de las centrales eléctricas mareomotrices.

La tecnología necesaria para la energía mareomotriz está bien desarrollada, y el principal obstáculo para un mayor uso de esta energía es el costo de construcción. Hay un alto costo de capital para un proyecto de energía mareomotriz, con períodos de construcción extensos. En la central mareomotriz de La Rance, el costo de este proyecto era de aproximadamente 95 millones de euros para 1967. (Council, 2012) En esta central mareomotriz el mantenimiento realizado ha sido: a la maquinaria el cableado, transformador auxiliar, mantenimiento al alternador, mantenimiento a las turbinas, sellado en áreas de fuga de agua, estos son algunos cambios realizados. (Laleu, 2009)

Tres proyectos como los son la bahía de Swansea de 30 MW, Punto Fifoots de 30 MW, y el Norte de Gales de 432 MW se encuentran en desarrollo en Gales, donde los rangos de marea son altos. En la presa de Severn, según estudios del Grupo Severn Taidal Power, lograron evaluar cuanto sería la inversión inicial para este proyecto siendo de aproximadamente 8,250 millones de dólares. Esperando que la central mareomotriz genere un costo de 0.045 centavos de dólar. (Council, 2012)

En la tabla de proyectos mareomóricos se presenta una tabla comparativa de diferentes proyectos en todo el mundo donde se puede desarrollar la energía mareomotriz. Se considera el promedio del diferencial entre la pleamar y bajamar, área de la bahía, la capacidad en MW y la producción anual en TWh. El país con el mayor potencial energético es la Unión Soviética. Se puede notar que la mayoría de países incluidos en el listado comparativo se encuentran en los polos del globo terráqueo, ya que ahí se manifiesta los mayores diferenciales de altura.

Tabla 5
Costo de MW Instalado.

Proyecto	Costo	MW	MW Instalado
La Rance	€ 96,000,000.00	240	€ 400,000.00

Fuente: (Laleu, 2009)

Tabla 6
Proyectos Mareomotrices.

<i>Sitio</i>	<i>Diferencial Promedio (m)</i>	<i>Área Bahía (km²)</i>	<i>Capacidad Instalada (MW)</i>	<i>Rendimiento anual aproximado (TWh)</i>	<i>Fecha de Inicio</i>
Argentina					
San José	5.9	-	6800	20	
Australia					
Secure Bay 1	10.9	-	-	2.4	
Secure Bay 2	10.9	-	-	5.4	
Canadá					
Cobequid	12.4	240	5338	14	
Cumberlando	10.9	90	1400	3.4	
Shepody	10	115	1800	4.8	
Annapolis	6.4	6	17.8	30 (GWh)	1984
India					
Golfo de Kutch	5.3	170	900	1.7	
Golfo de Cambay	6.8	1970	7000	15	
Corea					
Garolim	4.7	100	480	0.53	
Cheonsu	4.5	-	-	1.2	
México					
Río Colorado	6-7	-	-	5.4	
Reino Unido					
Severn	7	520	8640	17	
Mersey	6.5	61	700	1.5	
Wyre	6	5.8	47	0.09	
Conwy	5.2	5.5	33	0.06	
Estados Unidos					
Passamquoddy	5.5	-	-	-	
Knik Arm	7.5	-	2900	7.4	
Turnagain	7.5	-	6500	16.6	
Unión Soviética					
Mezen	9.1	2300	15000	50	
Tugur	-	-	10000	27	
Penzhinskaya	6	-	50000	200	
Kislaya Guba	2.4	2	0.4	-	1968
Francia					
La Rance	8	17	240	540 (GWh)	1966
China					
Jiangxia	7.1	2	3.2	11 (GWh)	1980

Fuente: (Hammons, 1993)

5. Ventajas. La energía mareomotriz es una fuente renovable de electricidad, que no da lugar a la emisión de gases responsables del calentamiento global o la lluvia ácida asociada con la electricidad generada por los combustibles fósiles. El uso de energía de las mareas podría reducir también la necesidad de la energía nuclear, con sus riesgos radiológicos asociados. Es también un tipo de energía que se encuentra constante, por lo que se tiene la ventaja de aprovecharlo a pesar de cualquier circunstancia. Las centrales mareomotrices se diseñan para un largo período pudiéndose aprovechar por mucho tiempo, (Council, 2012) estas pueden proveer de protección contra el inundamiento en la costa de la bahía o estuario donde se ubica, debido a la construcción de la presa.

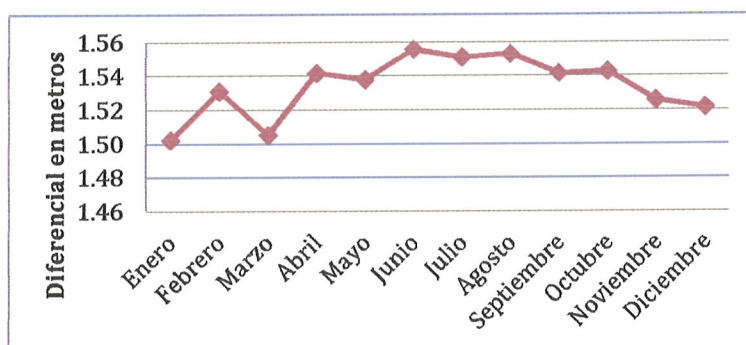
6. Desventajas. Los cambios de flujos de marea que afectan una bahía o estuario podrían, sin embargo, resultar en impactos negativos sobre los ecosistemas acuáticos y de ribera, así como la navegación y la recreación. Los pocos estudios que se han realizado hasta la fecha para identificar los impactos ambientales de un proyecto de energía mareomotriz determinan que cada sitio es diferente y los efectos dependen en gran medida de la geografía local. (Council, 2012)

Las mareas locales han cambiado muy poco en la presa de La Rance y el impacto ambiental ha sido insignificante, pero esto puede no ser el caso para todos los otros sitios. Se ha estimado que en la Bahía de Fundy, las plantas de energía de marea podrían disminuir las mareas locales hasta 15 cm. Esto no parece mucho cuando se toman en cuenta variaciones naturales, como el viento que puede cambiar el nivel de las mareas hasta varios metros. (Council, 2012)

7. Capacidad de instalación en Guatemala. Este es el pronóstico promedio de las mareas en la región del pacífico del país para el año 2012, datos obtenidos por el INSIVUMEH. La región del pacífico presenta una mayor amplitud en la diferencia de altura de la marea que en la del atlántico, por lo que solamente se exponen las tablas del pacífico.

En esta área se da un aproximado en la diferencia de altura de 1.5m, este valor no es significativo para la generación de energía a partir de las mareas, ya que según estudios realizados en otros países para que sea efectivo o rentable el proyecto, la diferencia en la altura de la marea debe de ser de por lo menos 5 a 7m. Esto nos indica que este tipo de energía no se puede realizar a menos que los costos iniciales de la maquinaria y construcción bajen lo que no sería rentable para el uso comercial en Guatemala.

Figura 46
Promedio diferencial de alturas.



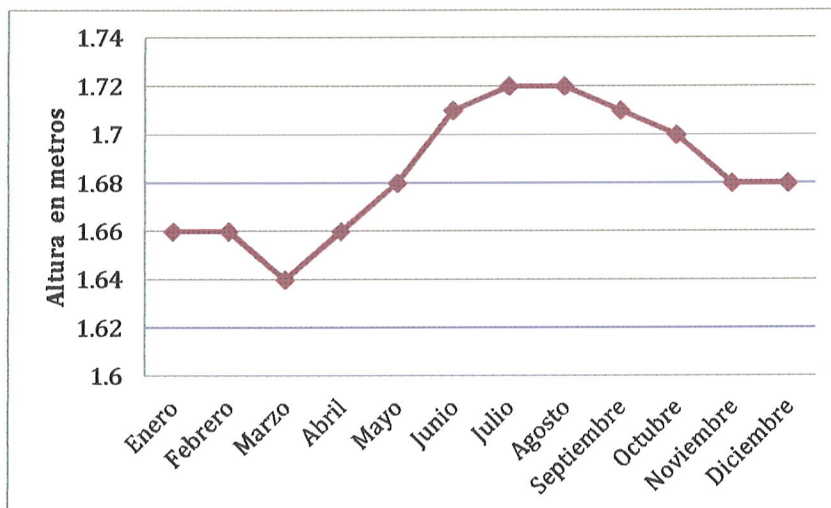
Fuente: (INSIVUMEH, 2013)

A partir de la gráfica del promedio del diferencial de alturas se puede determinar en qué meses es más rentable un proyecto de energía mareomotriz, se concluye que durante los meses de junio hasta septiembre están los mayores diferenciales de altura en la costa del Pacífico de Guatemala. Estos datos son los promedios de los diferenciales de alturas entre la bajamar y pleamar.

A continuación se muestran gráficas con los índices de bajamar y pleamar. Estos son importantes para realizar el diseño de la presa. A partir de los datos de la pleamar se determina cual es la cota máxima para la cual se desarrolla la presa además de los posibles aumentos a partir de tormentas que puedan ocurrir.

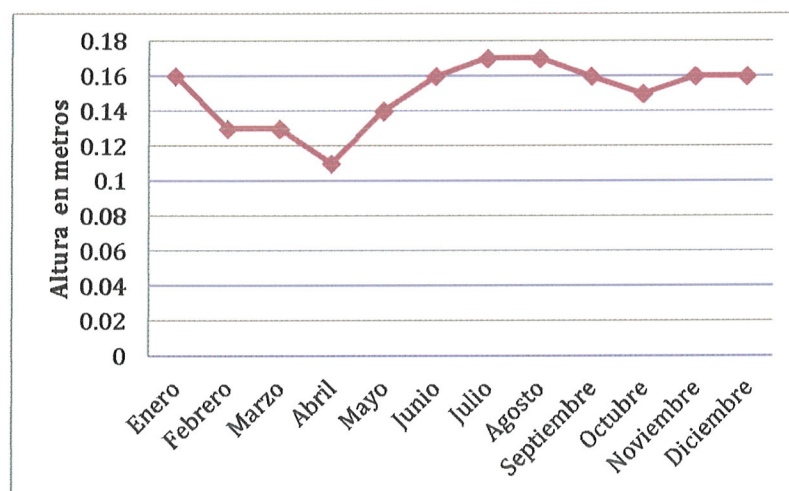
Con la gráfica de bajamar se determina la cota mínima para la cual trabaja el sistema, para saber esto es necesario evaluar las condiciones mínimas para las cuales funciona adecuadamente el equipo.

Figura 47
Alturas Pleamar.



Fuente: (INSIVUMEH, 2013)

Figura 48
Alturas bajamar.



Fuente: (INSIVUMEH, 2013)

Tabla 7
Pronóstico promedio de mareas

Enero 2012			Febrero 2012			Marzo 2012		
	Mts	Pies		Mts	Pies		Mts	Pies
B	0.16	0.52	B	0.13	0.42	B	0.13	0.44
A	1.66	5.45	A	1.66	5.45	A	1.64	5.37
Diferencial	1.50	4.93	Diferencial	1.53	5.02	Diferencial	1.51	4.94
Abril 2012			Mayo 2012			Junio 2012		
	Mts	Pies		Mts	Pies		Mts	Pies
B	0.11	0.38	B	0.14	0.47	B	0.16	0.52
A	1.66	5.43	A	1.68	5.51	A	1.71	5.62
Diferencial	1.54	5.06	Diferencial	1.54	5.04	Diferencial	1.56	5.10
Julio 2012			Agosto 2012			Septiembre 2012		
	Mts	Pies		Mts	Pies		Mts	Pies
B	0.17	0.56	B	0.17	0.55	B	0.16	0.54
A	1.72	5.65	A	1.72	5.64	A	1.71	5.59
Diferencial	1.55	5.09	Diferencial	1.55	5.09	Diferencial	1.54	5.06
Octubre 2012			Noviembre 2012			Diciembre 2012		
	Mts	Pies		Mts	Pies		Mts	Pies
B	0.15	0.50	B	0.16	0.52	B	0.16	0.52
A	1.70	5.56	A	1.68	5.52	A	1.68	5.51
Diferencial	1.54	5.06	Diferencial	1.53	5.00	Diferencial	1.52	4.99
DiferencialPromedio 2012			1.53	Mts				

Fuente: (INSIVUMEH, 2013)

V. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

El objetivo principal de la construcción del prototipo a escala es demostrar el principio hidráulico a utilizar en el proyecto, tomando en cuenta los elementos básicos pertenecientes al esquema del proyecto en general.

El prototipo a escala consiste en una red de tuberías diseñadas para transportar agua desde un pistón hasta una turbina descartando la posibilidad de que el agua regrese y así lograr únicamente su salida, cabe mencionar que este proceso es lo más importante y complicado en cuanto al funcionamiento del prototipo a escala real, por lo cual era necesario construirlo y ensayarlo para demostrar su efectividad.

A. Esquema del sistema descartado y el sistema mejorado.

1. Prototipo 1. Con el objetivo de visualizar de manera general el funcionamiento del sistema instalado, se realizaron diagramas en donde se muestran diversas vistas tanto del sistema compuesto por varios prototipos trabajando en conjunto y del prototipo en singular para observar sus componentes y su funcionamiento. A continuación, se presenta el diagrama realizado para la primera versión del prototipo a fabricar. En este sistema se pretendía instalar diversos prototipos alineados estratégicamente para aprovechar todo el ancho de la ola, y por lo mismo, toda su energía posible. Estos prototipos estarían conectados a una tubería de presión variable la cual conduciría el líquido a una tubería de presión constante principal encargada de suministrar la presión necesaria para continuar con el proceso de generación en la turbina y el generador eléctrico.

De igual manera, se presenta el diagrama de funcionamiento del primer prototipo seleccionado para el desarrollo y construcción durante el proyecto. Este prototipo consistía en un pistón, preferiblemente prefabricado y puramente adaptado a los requerimientos del sistema. El prototipo pretendía trabajar de manera vertical y bombear agua a presión, preferiblemente dulce para evitar corrosiones y desgastes del material, hacia la tubería principal trabajando únicamente con el movimiento vertical

de las boyas. Por su parte, las boyas estarían posicionadas a una distancia de $\frac{1}{2}$ de la amplitud de la ola, lo cual permite la máxima distancia entre las alturas H_c (Altura de la cresta) y H_v (Altura del valle).

Figura 49

Vista en planta del sistema descartado.

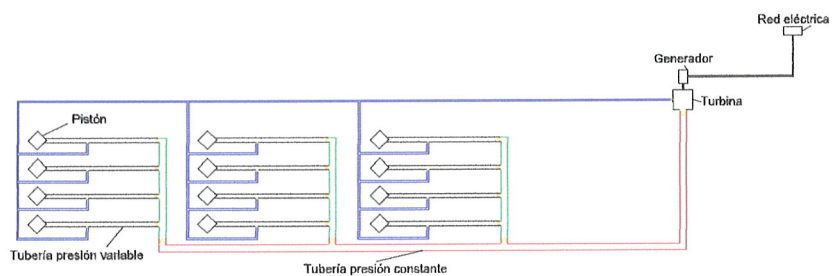
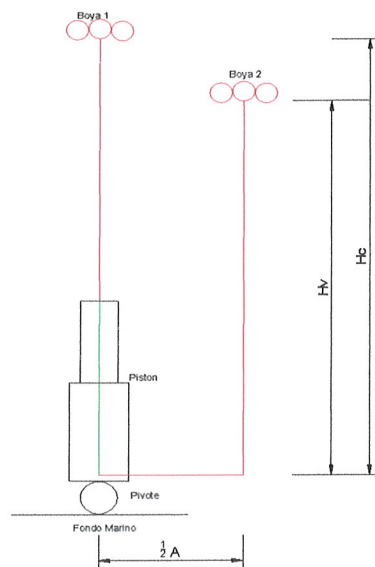


Figura 50

Vista en elevación del sistema descartado.



2. Prototipo 2. Se diseñó el sistema mejorado resolviendo los problemas encontrados en el sistema original. Se logró aprovechar la energía mecánica de las olas en una mejor manera y logrando que el prototipo pueda ser instalado en aguas profundas como en aguas con poca profundidad.

El primer cambio se dio por la fricción entre los sellos y el pistón, ya que tenía un sistema hermético. Se decidió no utilizar sellos. Por lo tanto el sistema no sería hermético por lo que se utilizaría agua salada del mar en lugar de agua dulce. Para minimizar las pérdidas de agua se decidió que los espacios entre las piezas serian de 2 milésimas de pulgada lo que permite tolerar una pérdida de líquido despreciable.

Se encontraron problemas con la instalación en aguas poco profundas ya que el eje del pistón se encontraba perpendicular al fondo marino. Por lo que se necesita una profundidad mínima de 3 veces la longitud de eje del pistón. En efecto se necesita una distancia para la carrera del eje. Finalmente la distancia del cable que va del pistón a las boyas, se decidió orientar el pistón horizontalmente con el eje paralelo al fondo marino. Así se logra reducir la profundidad mínima necesaria ya que se necesita de profundidad el equivalente a el diámetro del pistón y la distancia de los cables que van a las boyas. Se colocó dos poleas en los extremos del eje del pistón para lograr transferir el movimiento de las olas de dirección.

Figura 51

Vista en planta del sistema a utilizar.

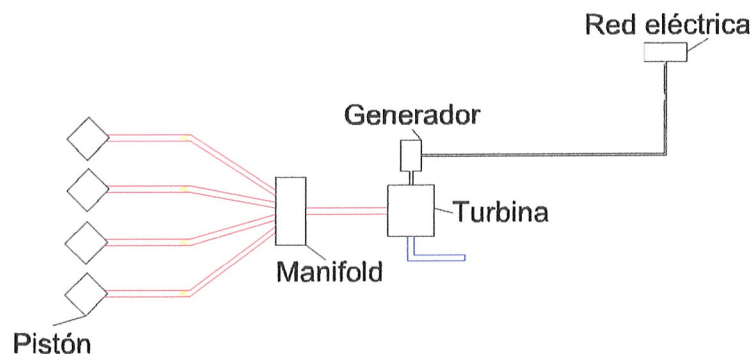
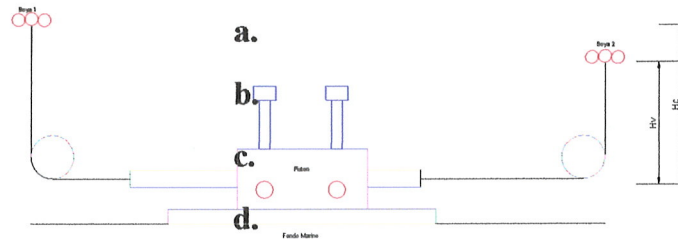


Figura 52
Vista en elevación del sistema a utilizar



B. Funcionamiento de los sistemas.

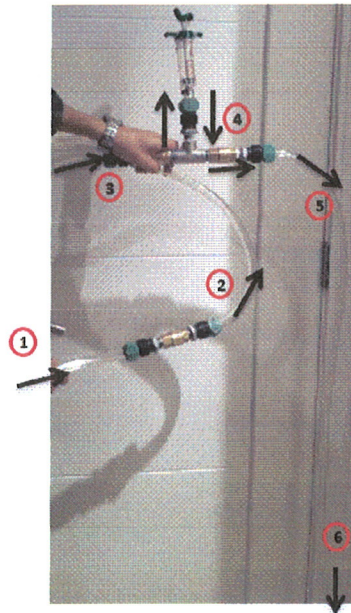
1. Prototipo 1. La función del prototipo construido es transportar el agua con cierta presión acumulada mediante los cheques conectados al sistema desde una tubería de entrada hasta una tubería de salida, en la cual se encontrará la turbina que hará funcionar el generador de energía.

El sistema funciona así:

- El agua ingresa al sistema mediante una tubería de entrada abierta.
- El agua pasa por la conexión descrita en el paso No. 4 del proceso de ensamblaje, la cual lo que consigue es que el agua que ha entrado al sistema no se salga sino se mantenga dentro de él, esto lo logra mediante un cheque.
- Una vez el agua haya pasado por el primer cheque, procede a pasar por el pistón, para ello tiene que pasar por un nuevo cheque (el cheque de la tubería de entrada que pertenece a la conexión de tuberías tipo T), el cual le proporciona más presión.
- El pistón le inyecta más presión al agua que llega a él debido al movimiento de la boya que tiene conectada y la cual se encuentra en la superficie.
- El pistón envía el agua al cheque de salida de la conexión de tubería tipo T.
- El agua sale del sistema hacia la turbina mediante la tubería de salida.

Figura 53

Vista en elevación del sistema a utilizar.



2. Prototipo 2. Se realizaron cambios notorios en el prototipo que se había planteado inicialmente por lo que el funcionamiento ha sido modificado, aunque aún posee la característica principal del sistema: Aprovechar de la mejor manera el movimiento de las olas para la generación de energía eléctrica. A continuación se plantea el funcionamiento del prototipo desde su inicio hasta su fin.

- El agua ingresa por la tubería de entrada la cual contiene chequeos de presión que permiten al agua entrar al pistón pero no salir del mismo.
- Al moverse el pistón en una dirección, el émbolo empuja el agua que contiene en su interior hacia una de las tuberías de salida.
- A la vez que sucede el paso anterior, el desplazamiento del émbolo permite la entrada de líquido al interior del pistón.
- Cuando el émbolo regresa a su posición original debido a un nuevo movimiento del mismo ocasionado por la otra boya, impulsa el líquido que recién ingresó hacia la otra tubería instalada en el otro extremo del pistón.

- El agua recorre la tubería de salida hacia una válvula tipo Manifold en donde junto con los otros fluidos provenientes de uno o más prototipos.
- El Manifold logra captar los flujos esporádicos de la cantidad de tuberías de salida que estén conectados al mismo y crea un flujo de caudal y presión constante a una nueva tubería de salida. Mientras mayor cantidad de flujos entren al Manifold, mayor será el caudal y la capacidad de mantener un flujo constante en la tubería de salida.
- El flujo que expulsa el dispositivo Manifold es ahora utilizado para lograr el movimiento de una turbina cuyo eje se conecta a un generador eléctrico para finalizar el proceso de generación.

C. Procedimiento de diseño de construcción y ensamblaje de los sistemas.

Se observó que se necesita un sistema con un pistón que pueda bombear agua utilizando el movimiento de las olas. Debe estar anclado en el fondo del cuerpo de agua. Este pistón estaría conectado con una serie de tuberías que permitiera llevar el caudal generado a la superficie donde se ubicaran las demás instalaciones.

Para transferir el movimiento de las olas a un movimiento del pistón se definió que se utilizarían boyas con cables que usando un juego de poleas que permita que el pistón genere el máximo caudal posible. Para evitar pérdidas se definió que se colocaría cheques de seguridad en las entradas y salidas del pistón, logrando que se utilice todo el caudal producido.

1. Prototipo 1. Para lograr el buen funcionamiento del prototipo se ensamblaron todas las piezas de la siguiente manera:

- a. Al utilizar los convertidores de rosca y la cinta de teflón se logró la conexión entre el accesorio de tuberías tipo T y los cheques en ambos lados; un lado para la entrada de agua y el otro para la salida.

Figura 54
Sistema de conexión.



Se dividió la manguera en tres partes: una parte que transporta el agua de entrada hacia el primer cheque, otra que transporta el agua desde el cheque hacia el de entrada del agua del sistema de conexión tipo T y otro que lleva el agua desde el último cheque hasta la turbina.

- b. Al utilizar nuevamente convertidores de rosca y cinta de teflón se conectó el sistema construido en el paso 1 con unos empaques, los cuales a su vez sirvieron para colocar las abrazaderas que se conectaron las mangueras ya cortadas con el sistema, según el lado de entrada y el de salida.

Figura 55

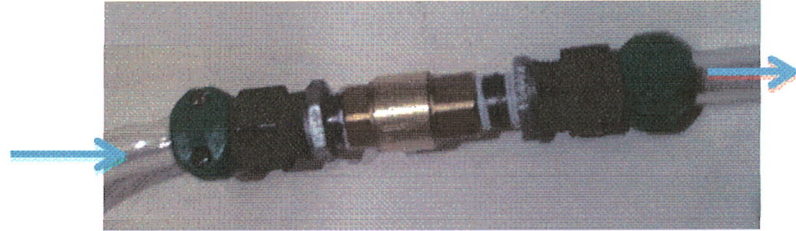
Conexión entre sistema de tipo T, mangueras de entrada y de salida.



- c. Se colocó una nueva conexión en la parte de entrada de la tubería, la cual conecta la manguera de entrada y la manguera en donde ingresará el agua que recorrerá todo el sistema. Dicha conexión se realizó utilizando un cheque, dos empaques con cinta de teflón, y dos abrazaderas.

Figura 56

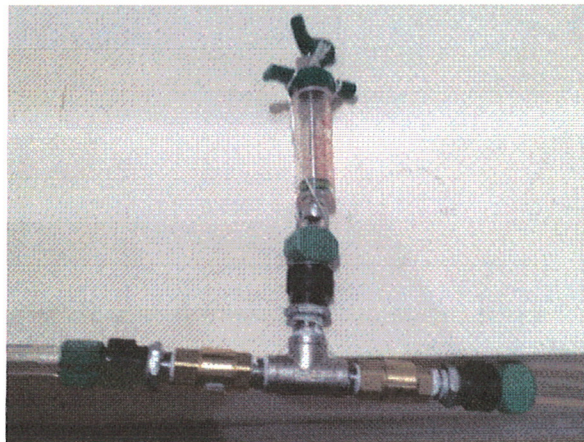
Conexión en la tubería de entrada de agua en el sistema.



- a) El siguiente paso fue lograr la conexión entre el pistón (en este caso, la jeringa) y el sistema de conexión tipo T, para ello se utilizó un empaque, una abrazadera y un cáñamo.

Figura 57

Conexión del pistón al sistema.

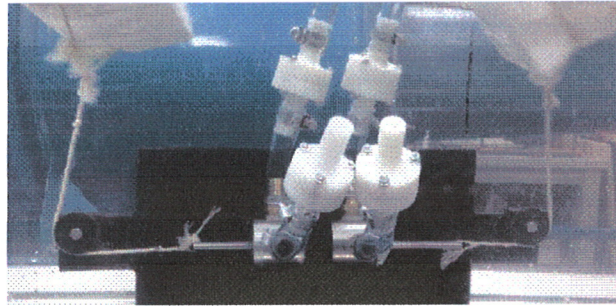


2. Prototipo 2. Para lograr el buen funcionamiento del prototipo se ensamblaron todas las piezas de la siguiente manera:

- Se construyó una base pesada la cual permitiera mantener el prototipo en el fondo del canal de manera fija, la cual soportará el movimiento de las olas y la fuerza boyante que ejercen las boyas.

Figura 58

Base con el pistón y boyas instaladas.



- Se construyó un cilindro de acero inoxidable de 5 centímetros de diámetro externo, 3.3 centímetros de diámetro interno. Con tapas en ambos extremos que están fijadas con 3 tornillos y un agujero en medio de 1.7 centímetros de diámetro. Un eje de 18 centímetros de largo y 1.7 centímetros de espesor que este alineado y rectificado con las 2 tapas del pistón.
- Se preparó la manguera transparente de $\frac{3}{4}$ pulgada de diámetro con las medidas necesarias para poder instalar los chequeos de entrada y salida de agua. Además de esto se prepararon las mangueras que irán de los chequeos de salida al manifold que permite unificar caudales y regular el mismo.

Figura 59

Preparación de la manguera.



- Se instalaron los cheques de entrada y salida a las mangueras y estas al pistón para poder realizar pruebas de funcionamiento, ensamble y lograr determinar que el prototipo estuviera funcionado como lo esperado. Para las uniones se utilizaron abrazaderas de tornillo.

Figura 60

Instalación de manguera y cheques de entrada.

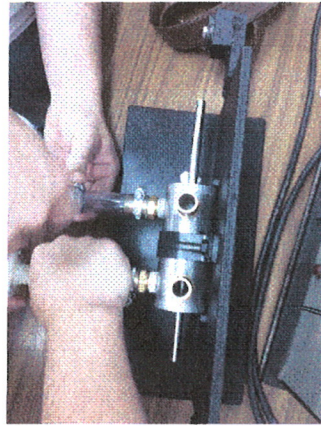
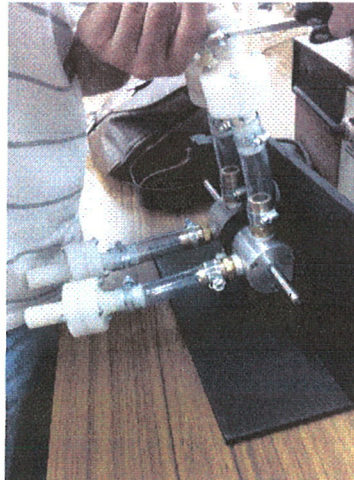


Figura 61

Instalación de manguera y cheques de salida.



- Se armó el manifold y se le instalaron sus mangueras, este cuentan con 4 mangueras de entrada de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro y una manguera de salida de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro. Además el manifold cuenta con dos llaves que permiten aislar los pistones lo que permite simplificar el mantenimiento o pruebas de generación ya que no es necesario que el sistema deje de generar.

Figura 62

Ensamblaje del manifold.



- a) Con el manifold ensamblado, el pistón terminado y colocado en su base con las poleas, se dan los últimos ajustes de alinear el eje con las poleas, se revisa que los cheque estén funcionando correctamente; antes de su instalación en el canal donde se debe cebar la tubería y el pistón.

Figura 63

Alineación del eje del pistón con las poleas.

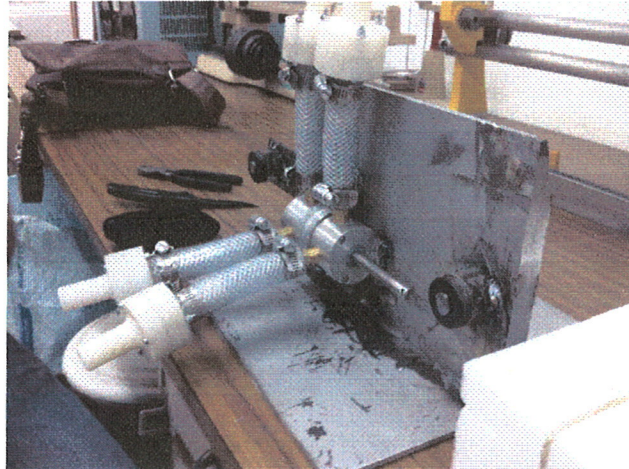
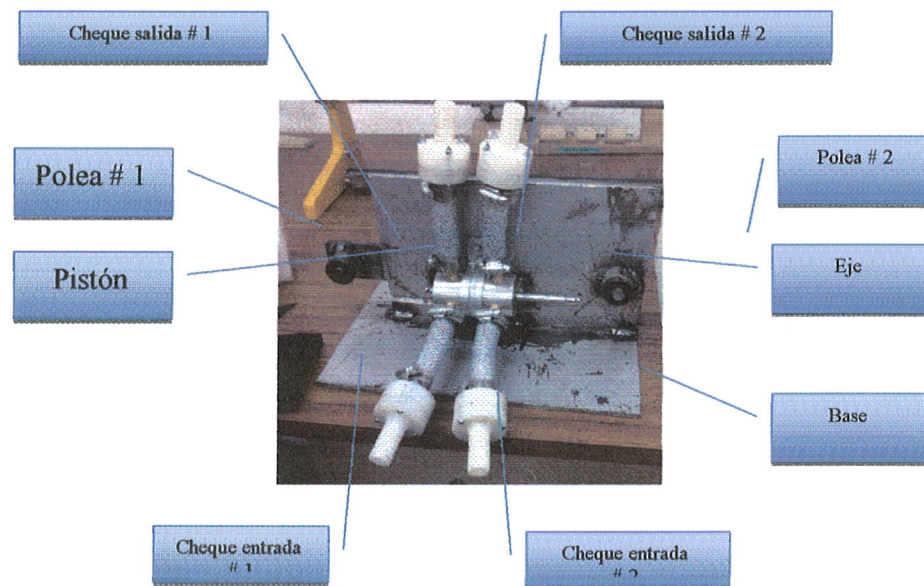


Figura 64
Ensamblaje del pistón.



D. Materiales implementados para la construcción de los sistemas.

1. Prototipo 1. Para la construcción de este prototipo, se tenía la intención de utilizar materiales accesibles y económicos, ya que para esta fase se pretendía optimizar el sistema todo lo posible. A continuación se presentan los materiales utilizados para la construcción de este prototipo y una breve descripción de sus propiedades.

a. Manguera. La manguera de PVC flexible transparente es utilizada principalmente para jardinería, debido a su capacidad para transportar agua bajo caudales y presiones aceptables. Además, es la opción ideal para estos ambientes debido a su resistencia al desgaste y a su precio económico. Para este prototipo se utilizó la manguera de 1/2 pulgada de diámetro como un sustituto para la tubería en el modelo a escala real, ya que el PVC permite que existan mínimas pérdidas de energía en el paso del fluido.

b. Conexión tipo T. La conexión de tubería tipo T es utilizada para conectar tuberías a tres bandas. Este tipo de conexiones es normalmente fabricado con cobre o aleaciones de cobre, material que brinda resistencia tanto al desgaste como a la corrosión, por lo que puede transportar prácticamente cualquier fluido. Para este prototipo se utilizó este accesorio para controlar el suministro y le expulsión de líquido en el punto donde se encuentra el pistón hacia el resto de la tubería.

c. Cheques de presión. Los cheques de presión son dispositivos de válvula que controlan la presión y dirección de un fluido en un punto determinado a lo largo de una tubería. Estos son fabricados normalmente con bronce debido a que se les exige alta resistencia al desgaste y a la corrosión de acuerdo al fluido que transporte, así como alta resistencia mecánica debido a las presiones que puedan soportar. Para este prototipo se utilizaron dos tipos de cheques, uno que no tendrá una presión graduada ya que únicamente permitirá que el agua viaje en una única dirección, mientras que el otro cheque si tendrá un mínimo de presión para que circule el fluido.

d. Convertidor de rosca. El convertidor de rosca para conexiones de tuberías es un instrumento que ayuda a conectar una extensión de rosca tipo NPT. Para este prototipo se utilizó esta pieza para conectar los cheques de presión con la conexión tipo T, estos han sido previamente forrados con cinta de teflón para ofrecer un mayor soporte ante la fuga de líquido.

e. Empaque. El empaque es un instrumento utilizado para conectar un tipo de tubería con otra de rosca distinta o de diámetro distinto. En este caso estos empaques se utilizaron para conectar la abrazadera proveniente de la manguera hacia los cheques de presión, por medio de un convertidor de rosca.

f. Abrazaderas. Las abrazaderas son instrumentos utilizados para ajustar una tubería o para conectar una tubería con un adaptador. Estas son normalmente construidas con un polímero resistente o aluminio en el caso de una conexión sometida a altas presiones. Para este prototipo se utilizaron abrazaderas de plástico para ofrecer una conexión a la manguera que al cortarse tiene un extremo irregular.

g. Cinta de teflón. La cinta de teflón es una cinta adhesiva muy resistente y liviana, capaz de adherirse a cualquier tipo de rosca para tubería de aluminio, cobre, bronce, PVC, galvanizado, etc. Esta cinta es la preferida para este tipo de trabajos debido a su alta elongación, rapidez en el pegado y larga duración sin riesgo de contaminar el fluido dentro de la tubería.

h. Jeringa. La jeringa es un instrumento capaz de inyectar presión a un fluido con la intención de canalizar su dirección por un medio muy estrecho. En este caso, se utilizó una jeringa como sustituto de un pistón vertical ya que este es el encargado de generar la presión y velocidad necesaria para que el fluido pueda pasar por la tubería y crear movimiento en la turbina que se encuentra al final del sistema.

2. Prototipo 2. Para la construcción de este nuevo prototipo, se pretendía utilizar los materiales y procesos necesarios para lograr cumplir con el objetivo de utilizar el movimiento de las olas para generar energía eléctrica. Debido a las

modificaciones que se realizaron con respecto al prototipo anterior, era indispensable desechar muchos de los procesos implementados para la realización del prototipo anterior así como muchos de los materiales utilizados para la construcción del mismo. Para este último prototipo, si bien no se utilizaron materiales poco convencionales, si se trató que el prototipo contara con las propiedades de ciertas partes y materiales que presenten un cambio significativo en el funcionamiento del mismo.

a. Boyas (Flotadores). Las boyas son una parte indispensable en cuanto al funcionamiento del prototipo, ya que son las responsables de absorber el movimiento de las olas y transportarlo hacia el vástago del pistón en forma de movimiento vertical. El principal requisito para el buen funcionamiento de las boyas en este sistema es su capacidad para flotar y su volumen dentro del agua. Para esto se utilizó el material de duroport, o poliestireno expandido, ya que debido a sus características se considera idóneo para esta situación. El poliestireno expandido contiene la característica de ser inmune a los procesos biológicos, por lo que no se caracteriza por ser huésped o portante de microorganismos evitando así su descomposición, enmohecimiento y putrefacción. Este rasgo es muy importante para la construcción del sistema ya que evita que se realice un mantenimiento adicional a las boyas, las cuales estarían expuestas tanto a ambientes marinos como superficiales. Asimismo, este material se caracteriza por su ligereza, resistencia a los impactos y a la humedad, siendo este último rasgo muy importante para buen funcionamiento del prototipo ya que las boyas se exponen a un ambiente totalmente húmedo y con condiciones de trabajo muy perjudiciales en caso que se presenten tormentas o desastres naturales que puedan afectar la composición del material en sí. (Náutica y Embarcaciones, 2012)

b. Cable de acero trenzado. Para conectar de manera eficiente las boyas con las poleas instaladas en la parte inferior del prototipo, se necesita de un conector resistente y flexible que garantice una conexión segura y eficiente. Para esto se utilizó cable de acero trenzado, el cual conectado a un pequeño arnés en la parte inferior de cada boya, pasaría a través de cada una de las poleas y se conectaría a cada extremo del vástago del pistón. El cable de acero trenzado tiene la característica de ser bañado

en zinc para evitar su oxidación al ser expuesto al aire libre o a ambientes propensos a la oxidación. Esta característica resulta muy efectiva a la hora de utilizar este material en la construcción del prototipo ya que el mismo se encontrará expuesto a un ambiente salino y muy propenso al desgaste y la oxidación. Asimismo, este alambre contiene grasas aplicadas a su superficie, ideales para la utilización en este sistema ya que disminuye de manera significativa la fricción que produce con las poleas, lo cual se transmite a pérdida de movimiento por parte del pistón y a la vez a una baja eficiencia en cuanto a la producción de energía eléctrica al final del proceso. (Abina, 2013)

Finalmente, es importante considerar algunos de los reglamentos estandarizados para el uso correcto de los cables de acero, especialmente cuando involucran poleas como este caso. De acuerdo a especificaciones otorgadas por los mismos fabricantes, se recomienda que la relación entre el diámetro de la polea (D) y el diámetro del cable (d), el cual es medido en base al diámetro máximo creado por los cordones que circunscriban la sección, sea mayor a 22 unidades, es decir, $D/d > 22$. De esta forma se podrá evitar de mejor manera la fatiga por parte de los esfuerzos de flexión producidos en el cable debido al rozamiento que se obtenga con la polea durante su funcionamiento. (Sabaté, 2013)

c. Poleas. Las poleas constituyen uno de los grandes papeles dentro del funcionamiento del prototipo ya que son encargadas de transformar el movimiento vertical e irregular de las boyas ocasionado por el paso de las olas a través de ellas, hacia un movimiento totalmente horizontal que ocasione el movimiento del vástago del pistón y así generar presión en el líquido que se utilizará para la generación eficiente de energía. Para esto se necesita que el material del que sean fabricadas contenga un coeficiente de fricción lo más bajo posible y aun así su fabricación sea accesible. Contemplando las características y requisitos para su fabricación se seleccionó utilizar el polímero tipo delrin copolímero. Este material posee muchas características favorables para su utilización entre las que sobresalen su alta resistencia mecánica y a fluencia, rigidez y dureza. Esta característica es ideal para la fabricación de una polea ya que esta se encuentra sometida a esfuerzos constantes y

no se le permite ningún tipo de deformación ya que afecta de manera significativa su desempeño. De igual manera este material es resistente a los impactos y a las bajas temperaturas y contiene excelentes propiedades de deslizamiento, siendo esta última característica sobresaliente a la hora de construir una polea de este material debido a que se requiere de la mínima fricción posible con respecto a su superficie por donde transite el cable de acero. (Loarca, 2011)

d. Pistón. El pistón es quizá la pieza más importante existente en el prototipo y en este sistema de generación vía undimotriz. El pistón consta de un vástago que constituye una pieza generalmente cilíndrica capaz de moverse únicamente en una dimensión. Este vástago contiene en su centro un émbolo el cual consiste en una pieza del diámetro completo del interior de la camisa del pistón. El émbolo es quien realiza casi todo el trabajo del pistón ya que se encarga de desplazar y presurizar cualquier fluido que se encuentre dentro del pistón. Para la fabricación del pistón y todos sus componentes se requerían materiales capaces de sobrellevar tanto las condiciones externas como las fuerzas de fricción y las presiones en su interior. Para esto se logró implementar el uso de acero inoxidable para la composición de la camisa exterior del cilindro y para la elaboración del vástago que contiene. La utilización del acero inoxidable se debe, valga la redundancia, a la necesidad del prototipo de tolerar duros ambientes salinos y a su capacidad de resistencia a la corrosión. Asimismo, se necesita de un material manejable para la construcción de este prototipo debido a las especificaciones necesarias para garantizar su eficiencia. Luego para la elaboración de la camisa interior y el émbolo del pistón, se utilizó el polímero tipo Vekton, cuya característica principal es su contenido de un lubricante de tipo sólido que a pesar del desgaste del material, mantiene la superficie totalmente lubricada lo que le permite moverse libremente dentro del cilindro sin necesidad de mantenimiento constante o debido a un cambio inesperado en el movimiento del vástago. (Loarca, 2011)

e. Tubería y cheques de presión. La tubería es la encargada de conectar el prototipo con el resto del sistema mediante el transporte del fluido desde el inicio del proceso hasta su desembocadura final en la turbina de generación. La tubería que se

implementó para la construcción de este prototipo fue tubería tipo PVC o policloruro de vinilo. Se contempló este tipo de tubería de acuerdo a diversas ventajas que la convertían en el candidato ideal para los requisitos de funcionamiento de este prototipo. Entre estos beneficios se encuentra principalmente su bajo costo y su alta resistencia y durabilidad. Además, en cuanto a la tubería flexible implementada en la construcción de este sistema, es importante resaltar su capacidad de adaptar cualquier forma respecto a las condiciones topográficas donde se quiera instalar. Finalmente, cabe resaltar su resistencia mecánica y su estabilidad, lo cual permite que se realicen reacciones con el contenido del agua a utilizar y con el entorno de donde se pretenda instalar el sistema. El PVC también se utilizó para la elaboración de los cheques de presión que contiene la tubería del sistema. Estos cheques se utilizaron únicamente para controlar el paso del agua a presurizar más no controlar su presión. Esto se debe a que la presión que se contempló para el prototipo es mucho menor a la que manejan los cheques de bronce comerciales, por lo que resulta de manera eficiente la fabricación de cheques personalizados donde solo se regule el paso del agua. De igual manera, como se había mencionado anteriormente se había removido del sistema los cambios de presión entre tuberías (variable y constante), por lo que no era necesario un cheque que controlara la presión en ningún punto de la red de tuberías. (Loarca, 2011)

f. Válvula Manifold. El prototipo requiere de un flujo constante en la parte final de la tubería que sea capaz de suministrar una velocidad y fuerza aceptable para el trabajo eficiente de la turbina generadora. Para esto, se consideró una opción viable la instalación de una válvula tipo Manifold en las terminaciones de cada tubería proveniente de la cantidad de prototipos instalados. Con este dispositivo, se garantiza la regulación del caudal y el flujo constante que se produce en la salida de esta válvula. Al igual que muchos de los accesorios utilizados en este prototipo, este no fue la excepción ya que se tuvo que fabricar de forma personalizada. El material idóneo para la construcción de este accesorio se contempló que sería el PVC debido a sus propiedades mencionadas anteriormente y a su capacidad de resistencia bajo altas presiones, un requisito fundamental para una pieza como esta ya que es necesario que

resista las presiones de fluidos de cuantas terminales se encuentren conectadas al mismo.

E. Fotografías del prototipo.

Figura 65
Instalación de cheques

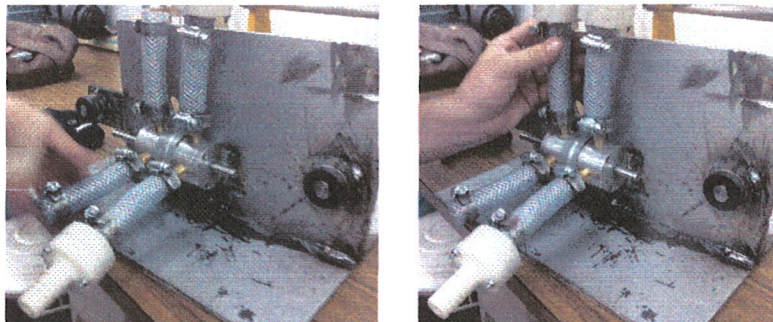


Figura 66
Cheques instalados.

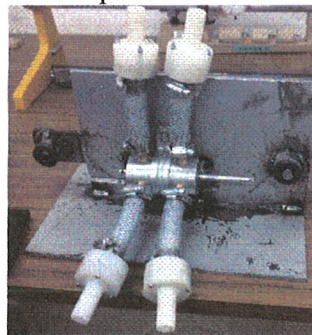


Figura 67
Pistón 1 instalado.

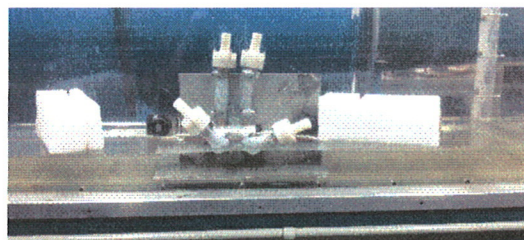


Figura 68
Pistón 1 instalado.

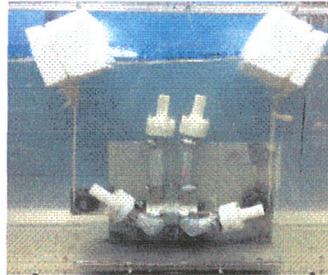


Figura 69
Cebando pistón 1.

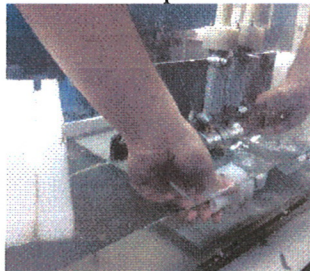


Figura 70
Pistón 1 funcionando, vista lateral.

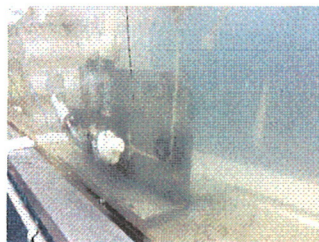


Figura 71
Pistón 1 funcionando.

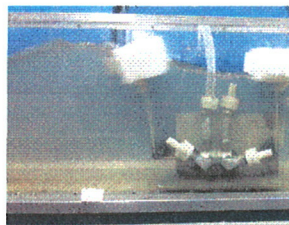


Figura 72
Ajustes pistón.

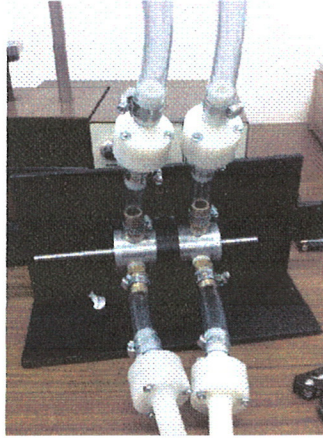


Figura 73
Ajustes pistón 2.

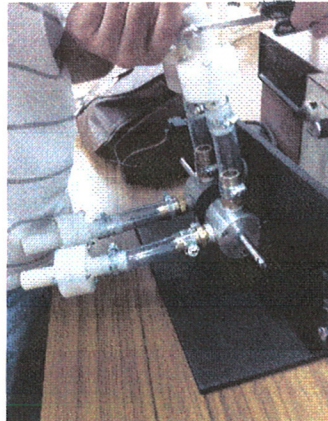


Figura 74
Instalando pistón 1 + pistón 2.

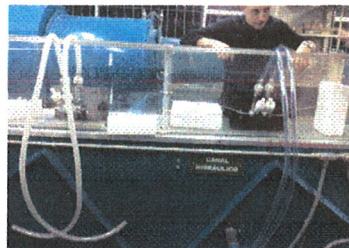


Figura 75
Pistón 2 instalado.

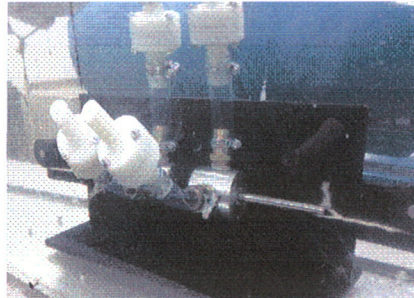


Figura 76
Manifold instalado.

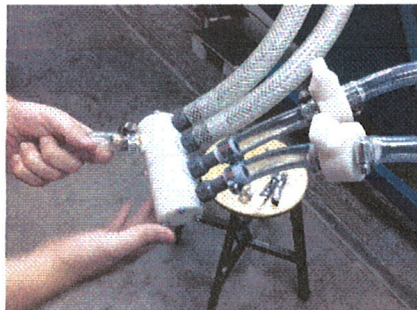
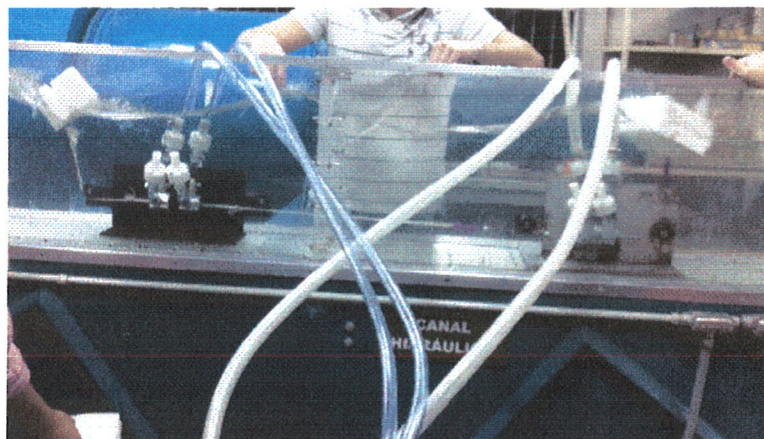


Figura 77
Pistón 1 + Pistón 2 instalado.



VI. MEJORAMIENTO DEL MODELO.

A. Recomendación de nuevos materiales.

Para la realización del prototipo y del sistema en general, se utilizaron materiales al alcance dentro de un rango de precio como también dentro del alcance para su fabricación sin muchas obstaculizaciones. Como se mencionó anteriormente, estos materiales si bien no fueron los ideales para resaltar la optimización de este prototipo y que necesitara del mínimo mantenimiento posible debido a esto, sí fueron pensados y utilizados con el objetivo que el prototipo y el resto del sistema se desempeñe de manera eficiente.

1. Materiales recomendados para las boyas. Para empezar con esta lista de materiales y aspectos a modificar en el prototipo y el sistema en sí, se puede empezar con las boyas a utilizar. Las boyas marinas normalmente se encuentran compuestas de acero galvanizado en su mayoría, principalmente en la parte del armazón y los tornillos. Asimismo, se colocan contrapesos de hierro reforzado en la parte inferior o faldón con el objetivo de brindar estabilidad a la boya mientras se encuentra en el agua. Este tipo de materiales es mayormente utilizado en la zona marina debido a las condiciones en las que deben trabajar los materiales. Para este proyecto, se utilizaron boyas de poliestireno expandido como se mencionó anteriormente, las cuales tenían un propósito puramente experimental. Sin embargo, si se quiere extender un poco más el concepto y los retos que esto conlleva, se podría utilizar un material como el aluminio con algún tipo de recubrimiento contra la corrosión ya sean soluciones cromatizantes o fosfotizantes. El aluminio se emplearía con el objetivo de adecuar las dimensiones de la boya con los requerimientos que se tienen para el funcionamiento del prototipo y a la vez que no sea muy densa como para que evite el libre movimiento de las olas a través de ella cuando se pretenda obtener un modelo lo más apegado a la realidad que se presentaría en una instalación en campo.

De igual manera, podría utilizarse la espuma de poliuretano como un elemento de relleno en la boya, ya que el poliestireno expandido mencionado anteriormente

presenta problemas tanto durante su elaboración debido a los gases cancerígenos que emite como a su instalación debido a la contaminación que emite al estar en contacto con los rayos UV del sol. Debido a estas desventajas por parte del poliestireno expandido, es poco recomendable utilizarlo en un proyecto debido a los problemas ambientales que produce a la flora y fauna del lugar, siendo la espuma de poliuretano el material ideal para suplirlo en estos casos gracias a su baja densidad y alta resistencia. (Náutica y Embarcaciones, 2012)

2. Materiales recomendados para el pistón. Se recomienda poner una atención particular al material del pistón. El pistón es quizá el componente más importante en cuando al funcionamiento y generación eficiente de energía mediante este método undimotriz por lo que es importante que los materiales que se empleen en su construcción sean de la mejor calidad y puedan rendir de manera aceptable bajo cualquier condición externa. El material ideal para la construcción de un pistón bajo estas características es principalmente un acero inoxidable con recubrimientos especiales contra la corrosión debido al agua salina o directamente el titanio, un material bastante costoso pero a la vez muy eficiente y resistente al desgaste y a cualquier condición extrema. Asimismo, se puede considerar el uso de teflón u otro polímero con propiedades avanzadas capaz de mantener siempre un coeficiente de fricción muy bajo en la parte interior y el émbolo, así como poseer la capacidad de funcionar de manera eficiente aun cuando se encuentren impurezas en el agua capaces de obstaculizar el libre movimiento del vástago y el émbolo dentro del pistón y retrasando así el proceso de generación. (Loarca, 2011)

3. Materiales recomendados para la instalación de tubería. Para la instalación de la red de tubería que transporta el agua a presión obtenida del movimiento del pistón hacia el turbo-generador ubicado en la costa se deben considerar factores que afecten su integridad directamente, especialmente la corrosión y el ataque del agua salina del mar. Para esto, se considera la instalación de tubería de polietileno de alta densidad o HDPE por sus siglas en inglés (High Density Polyethylene). Esto se debe a que sus características son ideales para este tipo de instalación, entre las que se incluyen: Bajo coeficiente de fricción (Pérdidas por

fricción mínimas), anticorrosivo, flexible, peso y costo reducido, larga vida útil, larga vida útil, resistencia ante movimientos sísmicos y resistencia hacia agentes biológicos y químicos. Gracias a estas características, este material parece el ideal para este tipo de instalación y así lograr el funcionamiento ideal y el mínimo mantenimiento hacia esta sección del sistema. (Universidad del Valladolid, 2008)

4. Tratamientos anticorrosivos. La corrosión es un factor que afecta de manera significativa a los materiales expuestos a un ambiente de tipo marino, especialmente a los metales. Para combatir este fenómeno natural, es necesaria la aplicación de pinturas y otro tipo de tratamientos a la superficie de los materiales y así aumentar su protección hacia este deterioro. Entre estas soluciones se encuentran las pinturas para protección naval utilizadas en los cascos de los barcos. Las pinturas tipo Antifouling se especializan en sus propiedades anticorrosivas, las de tipo epóxico resaltan su resistencia a la abrasión, a los agentes químicos y biológicos y las de serie vinílico que son ideales para la resistencia contra el agua de mar y la intemperie. Considerando estos recubrimientos se puede combatir de manera eficiente estos fenómenos que ocasionan la degradación de los materiales.

5. Materiales recomendados para una base. Finalmente, otra mejora de este prototipo con respecto a los materiales sería la creación de una base sólida, pesada y duradera. Para la creación de esta base, o anclaje en el caso del prototipo, se podría considerar la aplicación del hierro fundido debido a sus características tanto físicas como mecánicas. El hierro fundido cuenta con excelentes propiedades con las que puede contar para resistir los ambientes más duros en los que se exponga, incluyendo el fondo marino en este caso. El hierro fundido cuenta con una alta resistencia a los golpes y a los impactos, así como a los grandes esfuerzos de compresión principalmente, una característica importante a la hora de considerar las altas presiones que se manejan en el fondo marino. Para terminar, el hierro fundido es uno de los aceros más pesados que existen, lo cual es una ventaja en la aplicación de este tipo ya que es importante que brinde un peso y estabilidad a la estructura del prototipo y que este sea inmune a las altas corrientes o movimientos dentro del agua. (Loarca, 2011)

B. Mejoras en el proceso de construcción.

Existen muchas formas en las que podría mejorarse el prototipo elaborado, una de ellas es durante su proceso de construcción. Cabe resaltar que el prototipo seleccionado consta de una remodelación de una idea original de un prototipo propuesto. Sin embargo, el prototipo seleccionado no funciona aún a su máxima eficiencia, por lo que es necesario considerar la realización de mejoras en cuanto a la construcción de su estructura.

1. Proporcionar estabilidad. Una de las más notorias modificaciones que pueden realizarse a este prototipo radica principalmente en su estabilidad. Durante el proceso de construcción se puede considerar la aplicación de una base más estable, sólida y pesada que pueda permitirle al prototipo resistir cualquier fuerza externa que amenace con interrumpir el constante proceso de generación por medio de las olas, o en el peor de los casos que voltee completamente el prototipo. Es importante señalar que debido a la posición horizontal del pistón, su máxima eficiencia, independientemente del aporte de las boyas, recae en qué tan horizontal se encuentre su movimiento. Esto se debe a que mientras más grado de inclinación contenga el pistón con respecto a la horizontal, se aumentará de manera significativa la fricción que hace en su interior, causando así un menor desplazamiento y una menor velocidad del flujo respectivamente. Debido a este detalle es importante que se considere como una modificación importante la implementación de una base resistente y fuerte en la parte inferior del prototipo a la hora de su construcción, especialmente cuando se realicen pruebas de campo.

2. Flexibilidad ante cambios. Es importante señalar otro aspecto que sobresale en cuanto a las mejoras que se pueden realizar durante el proceso de construcción del prototipo, el cual consiste en mejorar la flexibilidad del prototipo con respecto a los cambios que se presenten principalmente en la amplitud de las olas. Como se había mencionado anteriormente, el prototipo funciona de manera ideal mientras las boyas se encuentren separadas a una distancia de $\frac{1}{2}$ la amplitud de la ola que se acerca ya que esto permite que se aproveche la diferencia de altura total entre la cresta y el valle

de la ola, transportando así un desplazamiento mayor al vástago del pistón. Por eso mismo, es importante considerar dentro del proceso de construcción que la distancia a la que se encontrarán separadas las boyas debe ser flexible a estos cambios, por lo que el posicionamiento de las poleas debe encontrarse bajo cambios frecuentes, algo a considerar dentro del mantenimiento del sistema. Este posicionamiento depende directamente de la amplitud de las olas que se prevea para cierta temporada, modificando así la geometría del prototipo. De esta forma, se podrá garantizar que el prototipo funcione siempre de la manera más eficiente posible, especialmente cuando esta diferencia de alturas entre cresta y valle alcance su máximo, y logre cumplir el objetivo de generar una cantidad aceptable de energía eléctrica que lo posicione a la par de otros métodos de energías limpias.

3. Válvula Manifold más eficiente. Otro factor que se puede considerar como una modificación para la construcción tanto del prototipo a escala como para un sistema que funcione con el oleaje marino, es la creación de una válvula Manifold más eficiente. Como se puede observar en las imágenes del prototipo construido a escala, la válvula tipo Manifold construida sirve simplemente como una caja unificadora de caudal ya que recibe los caudales de la cantidad de prototipos que estén conectados a él y los unifica y distribuye hacia una sola tubería principal, conservando la presión. Sin embargo, este dispositivo presenta unas pérdidas considerables en cuando a la velocidad del fluido, debido principalmente a su geometría. Por eso mismo, es importante considerar un aumento de la eficiencia de este dispositivo suavizando las curvas de las tuberías en su exterior y controlando que todos los flujos viajen en la misma dirección a la hora de su encuentro. De esta forma, se lograrán aminorar las pérdidas existentes y se obtendrá una mejor calidad en el flujo proveedor a la turbina generadora.

4. Protección a los componentes del sistema. Finalmente, es importante señalar que a la hora de planificar la construcción del sistema para su instalación en algún sector marino se deben proteger los componentes más sensibles de cualquier amenaza externa que pueda dañar tanto la estructura del sistema como su funcionamiento. Entre estos elementos se incluye la instalación de una carcasa de recubrimiento para

las poleas. Esto es un factor importante ya que una carcasa de recubrimiento sirve tanto como protector contra cualquier cuerpo o contaminante que pueda afectar el sistema como para marcar una guía para el cable y que este no se desborde de la polea en caso de cualquier fuerza externa que lo obligue a hacerlo. Además también se puede considerar el seccionamiento del cableado, el cual consiste en seccionar el cable en tres grandes secciones. Dos de estas secciones, las que no atraviesan por las poleas pueden recubrirse con espuma de poliuretano con el objetivo de proteger y reducir el desgaste en estos sectores. De esta manera, si el desgaste o la corrosión llegar a ser un problema solo se necesitaría reparar la sección que sea necesaria, la que esté constantemente en contacto con las poleas.

C. Mejoras en el funcionamiento.

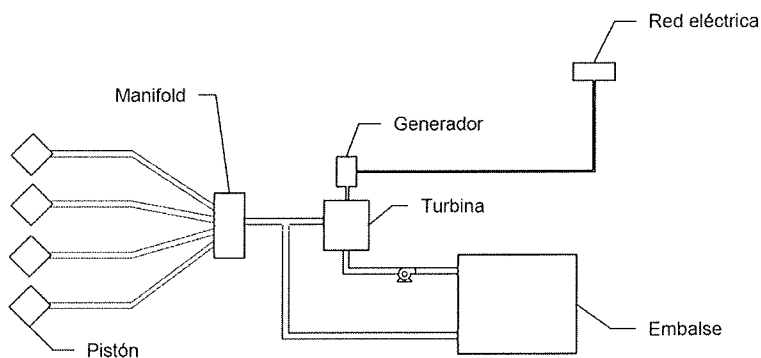
Existen diversas modificaciones que pueden realizarse no sólo al prototipo sino al sistema completo para aprovechar al máximo su eficiencia y tener una capacidad generadora aún mejor. Luego de analizar muchas de las posibles modificaciones que se pueden implementar, tanto a nivel experimental como una posible instalación en campo, se han logrado encontrar algunas que podrían presentar una mejora significativa en cuanto al mejor funcionamiento del sistema.

1. Implementación de un embalse. La primera de ellas consiste en la construcción de un embalse a cierta altura capaz de producir una caída de agua que logra funcionar una turbina y luego un generador, similar al proceso de generación que implementa una planta hidroeléctrica. La implementación de esta alternativa radica principalmente en la incertidumbre de la velocidad del fluido que procede de la válvula Manifold al terminar el proceso de movimiento de líquido, ya que es posible que dicha velocidad del fluido no sea suficiente para lograr accionar la turbina de manera eficiente y que no se obtenga la mayor cantidad de generación como se esperaba. Asimismo, debido a la incertidumbre en cuanto a la constancia del suministro de líquido hacia la turbina, se podría considerar una opción viable la instalación de un embalse ya que de esta forma la turbina generadora podría estar siempre trabajando y esto generaría obviamente mejores resultados dentro de un rango de tiempo.

2. Sistema combinado. Dentro del mismo concepto sobre la construcción de un embalse en un punto elevado surgió una nueva alternativa para mejorar el funcionamiento del sistema, el cual consiste en la instalación de un embalse que sea alimentado utilizando parte de la energía generada para accionar una bomba que transporte el líquido. Para explicar mejor esta propuesta se toma como referencia el proceso original del líquido mediante su paso por el sistema. El líquido es transportado desde la válvula Manifold al final de la tubería, este luego se dirige tangencialmente a una turbina la cual se encuentra conectada al eje de un generador cuyo movimiento logra la generación de energía eléctrica. Con esta nueva alternativa, se considera la instalación de un embalse conjunto el cual aprovechará el agua “desechada” por el primer paso hacia la turbina para alimentar el embalse como un medio sustituto o asistente hacia el proceso de generación. Esta alternativa sería muy útil cuando se presente una demanda mayor por energía eléctrica y el sistema no pueda abastecerse únicamente con la generación provocada por la tubería a presión. De esta forma, el embalse será alimentado cuando la demanda no sea muy alta y servirá como un complemento para cumplir la demanda de generación mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua.

Figura 78

Modelo de un sistema combinado (tubería a presión y embalse).



3. Modificación de la tubería. Entre otras opciones a considerar para magnificar la capacidad generadora del prototipo y el resto del sistema, se encuentra la instalación de tuberías de diámetro variable principalmente al final de la tubería que lleva a la turbina. Como se puede experimentar con cualquier líquido incompresible siendo transportado mediante una tubería, la reducción del diámetro de la tubería ocasiona un aumento significativo de la velocidad del líquido. Es importante tener una alta velocidad del fluido, especialmente en su tramo final, ya que esto permite un movimiento más acelerado de la turbina y por lo mismo una mayor generación de energía al final del proceso. Esta podría ser una opción muy viable cuando se tengan pocos prototipos conectados al sistema, ya que permitiría obtener la misma velocidad y hasta un suministro de líquido más constante a que si se dejara una tubería de diámetro constante a lo largo del sistema.

4. Modificaciones a la turbina. Uno de los factores que surgió durante la construcción y experimentación del prototipo a escala fue poca eficiencia que presentaba un modelo de turbina estandarizado. Esto se debe a que debido a las características del flujo en cuestión (posición, cantidad, velocidad, etc.) una turbina estándar no lograba captar el máximo de potencial para dicho fluido y por lo mismo se debían realizar modificaciones en cuanto a la estructura de una turbina estandarizada, en especial la turbina tipo Pelton que sería la ideal para este tipo de flujo. Una de las principales modificaciones que debían realizarse a la turbina Pelton utilizada sería la geometría de sus paletas, ya que como se trabajaría con un flujo de muy poco caudal las paletas tendría que tener la forma más de un molino de agua ya que de esta forma se podrá lograr un mejor movimiento debido al brazo de palanca que se aplicaría sobre el eje de la turbina.

5. Modificaciones de bajo costo. Finalmente, algunas posibles mejoras que se pueden realizar sin necesidad de agregar ningún componente adicional al modelo que se tiene implementado. Una de ellas es garantizar la generación de movimiento del pistón cuando la marea se incremente o disminuya. Esto es una preocupación ya que las boyas son la fuente principal de movimiento por parte del pistón y si estas se encuentran sujetas a una altura fija, no se logrará tener una efectividad constante por

parte del prototipo cuando las condiciones del ambiente sean sometidas a un cambio, principalmente el incremento de las mareas o un oleaje muy variado al que se tiene previsto. Debido a estos cambios inevitables, es importante que se considere un rango de altura a la que se encontrarían las boyas, por lo que se deberá contar con un alambre lo suficientemente flexible y resistente que permita a las boyas flotar de manera constante mediante un diferencial positivo entre la fuerza boyante y la tensión generada por el cable que las conecta con el resto del sistema. La instalación de diversos prototipos en un orden paralelo es una fuente importante de incremento en cuanto a la efectividad del sistema. Es importante señalar la dirección en la que deben instalarse los prototipos. Esta debe ser paralela a la costa (de frente a las olas) ya que de esta forma se lograría obtener la máxima capacidad de energía por ola y no una disminución del movimiento de las olas por parte de un rebote en caso que se instalaran de manera perpendicular a la costa. Con estas modificaciones sugeridas es posible que la eficiencia del sistema en general aumente de manera significativa al que ya se tiene, aún más si se consideran algunas de estas al mismo tiempo.

D. Métodos alternativos para su instalación.

1. Colocación de prototipos de forma paralela. Con vista a la instalación de un dispositivo real, se deben considerar algunas sugerencias observadas durante la construcción del prototipo a escala. La primera de ellas radica en cuanto a la eficiencia en el bombeo del prototipo. La opción ideal para la instalación de prototipos en serie consta en colocarlos de manera paralela a la ola. De esta forma, se logra que cada prototipo aproveche la energía inicial de la ola y así poder transformar todo ese movimiento en un mayor bombeo del líquido. Sin embargo, gracias a las pruebas de laboratorio realizadas con el prototipo a escala construido, se pudo observar que cuando se colocaba una placa de metal al final del canal hidráulico y las olas chocaban contra la misma, el rebote de las olas podría ser aprovechado mediante la instalación de otro prototipo colocado atrás del primero. Obviamente se obtiene una

menor altura y velocidad de la ola, pero aún es suficiente para lograr un movimiento aceptable en el pistón y lograr una generación moderada cuando no se tiene el espacio necesario. Este caso podría aplicarse cuando se tiene un risco o un rompeolas justo en la parte de atrás del prototipo instalado.

2. Instalación de tubería flexible. Otra alternativa que se puede tomar en cuenta para mejorar la eficiencia de generación de energía de este prototipo es la disminución en pérdidas de energía debido a accesorios en las tuberías. Para esto se considera la implementación de tubería flexible de PVC con el objetivo de disminuir las pérdidas localizadas en cuanto a la instalación de accesorios debido a la topografía del terreno. De esta forma, la tubería que conduce el líquido a presión podría adaptarse a la geometría del terreno y así contar únicamente con las pérdidas por fricción que se generen a lo largo del tramo. Es importante añadir que aunque las pérdidas por fricción se consideren prácticamente insignificantes en este sistema, es una alternativa viable para incrementar la eficiencia del prototipo y el sistema en general.

3. Combinación de métodos. Finalmente, es importante considerar algunas de las opciones mencionadas para el proceso de utilización del fluido proveniente del Manifold. La creación de un embalse es una idea viable ya que de esta forma se garantiza un flujo constante hacia la turbina generadora y se aprovecha la energía potencial del agua almacenada en el embalse para la generación de energía eléctrica. De igual manera, se considera la idea de contar con un sistema doble de generación, el cual contiene tanto el flujo debido a la tubería a presión por un lado como el flujo aprovechado por la caída de agua desde un embalse por el otro. Es importante considerar que para la creación de estas alternativas se necesita de un diferencial de altura muy alto desde la superficie marina hasta el paso por las turbina, especialmente en la segunda opción debido a la adición del embalse que se desea alimentar. Esto significa que esta altura se transmite directamente a la cantidad de prototipos necesarios para lograr dicho trabajo de bombeo, aumentando de manera considerable

el costo total de la instalación. Si bien es importante que ambos métodos signifiquen el incremento en cuanto a la energía eléctrica generada y el aumento en la eficiencia del sistema, el aumento significativo del costo total podría representar una amenaza para la instalación de estas alternativas, disminuyendo su viabilidad.

VII. TEORÍA HIDRÁULICA APLICADA

A. Análisis de las olas.

En el mar existen un número muy elevado de tipos de olas que ni la matemática y la física han logrado describir y modelar en su totalidad, entre estas ondas se pueden encontrar las senoidales o compuestas de varias sinusoidales, ondas trocoidales, ondas progresivas y estacionarias, ondas amortiguadas, ondas superficiales, ondas medias, ondas que llegan a la superficie del mar y ondas que se manifiestan en profundidad en contacto con aguas de temperatura y salinidad diferentes. (Fernández, 2010)

Como ya se observó, los tipos de ondas dependen de factores físicos que alteran su movimiento, los cuales se profundizarán a continuación.

1. Origen de las olas. De la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, una fracción se invierte en un calentamiento desigual de la misma, lo cual provoca en la atmósfera zonas de altas y bajas presiones, generando así desplazamientos del aire (viento) de menor o mayor intensidad. El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar y tomando en cuenta que la energía solar absorbida por la superficie de la tierra es de 375 W/m^2 , se estima que aproximadamente 1 W/m^2 se transmite al mismo, el cual actúa como un acumulador de energía debido a que no sólo la recibe, sino la transporta de un lugar a otro y la almacena. La intensidad del oleaje depende de la intensidad del viento, su duración y la longitud sobre la cual este transmite energía a la ola. (Fernández, 2010)

Aún no se encuentra esclarecido perfectamente el mecanismo con el que se generan las olas creadas por el viento; probablemente proviene de la acción de oscilaciones de la presión atmosférica de período corto combinada con la acción del viento. Por la turbulencia asociada con el movimiento de las olas, estas se pueden asimilar como la asociación entre la corriente de viento que fluye paralela a la

ortogonal a la dirección del viento. Estas oscilaciones llegan a tener períodos del orden de uno a varios segundos y corresponden a auténticos golpes alternados con acciones de reflujo, los cuales se desplazan con el avance del viento, por lo que la superficie aparece alterada por una agitación. (Fernández, 2010)

2. Clasificación de las olas. En el mar existen un número indefinido de ondas; sin embargo, el movimiento de las mismas puede describirse reduciendo la clasificación a dos tipos generales: *Ondas estacionarias* y *ondas progresivas y transitorias*. (Fernández, 2010)

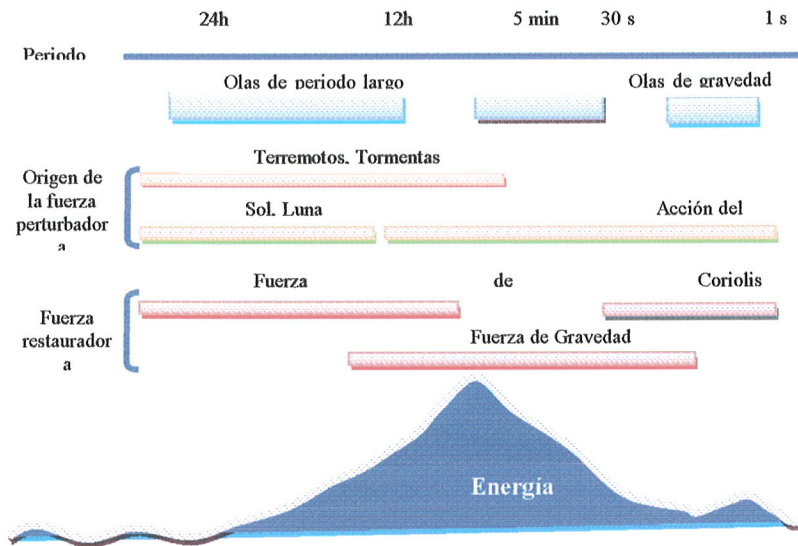
a. Ondas estacionarias. En una onda marina estacionaria, existen uno o varios puntos en los que el movimiento es nulo (puntos nodales), y uno o más puntos en los que el desplazamiento es máximo (puntos ventrales). La distancia entre los nodos y la frecuencia de la oscilación, dependen de las dimensiones geométricas de la cuenca en que se produzcan. (Fernández, 2010)

Las **Secas** son ondas estacionarias como las oscilaciones propias de las cuencas marinas y las co-oscilaciones de las mareas. Para explicar su funcionamiento se puede recurrir al siguiente ejemplo: cuando se sacude un recipiente lleno de líquido se observa que toda la masa líquida oscila y se obtiene que tras un número mayor o menor de oscilaciones, el nivel vuelve a las condiciones de equilibrio iniciales. (Fernández, 2010)

En una cuenca marina o en un lago, las Secas se manifiestan cuando la masa de agua sufre sacudidas bruscas tanto por la acción del viento y variaciones de la presión atmosférica, como por sacudidas costeras submarinas.

Las **co-oscilaciones de marea** son una especie de secas originadas en un mar semicerrado por las mareas externas, que se desarrollan en amplitud oceánica abierta. Sólo en extensiones oceánicas grandes, la fuerza de la marea puede imponer directamente oscilaciones amplias (mareas independientes). (Fernández, 2010)

Figura 79
Representación esquemática de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de la energía contenida en ellas.



Fuente: Adaptación de Fernández., 2010.

Según lo observado en la Figura 80, las ondas originadas por el viento son las de mayor contenido energético y por ende serán las destinadas a la obtención de la energía undimotriz.

b. Ondas transitorias o progresivas. Una onda marina progresiva es aquella que varía en el tiempo y en el espacio, pueden formarse en la superficie (por ejemplo, ondas superficiales debidas al viento) o en el seno de la masa oceánica (ondas internas que se producen a lo largo de las discontinuidades de temperatura y salinidad entre las diversas masas de agua). (Fernández, 2010)

Las ondas solitarias y los tsunamis (frecuentes en el pacífico) se identifican como **ondas largas** típicamente progresivas; estas se generan en relación con terremotos costeros y oceanográficos y se propagan desde el epicentro oceánico hasta

las costas, provocando a menudo cuantiosos y significativos daños, incluso hasta mayores que los terremotos. (Fernández, 2010)

Como se observó en la Figura 1, las olas se pueden clasificar atendiendo a los siguientes parámetros:

c. *Fuerza perturbadora.* Una fuerza perturbadora es una fuerza que proviene de fuentes de energía externas y ajenas al sistema a analizar (el mar), pero que interactúan con él. (Fernández, 2010)

- Acción del viento
- Terremotos y tormentas
- El Sol y la Luna

Las olas debidas al viento son las que contienen más energía y son las que se aprovechan para obtener electricidad; la energía de las olas debidas al viento, procede en última instancia, de la energía solar. (Fernández, 2010)

d. *Olas libres y olas forzadas.* Las olas libres son las generadas por una aplicación instantánea de la fuerza perturbadora que cesa al momento y, por lo tanto, la ola evoluciona libremente. Las olas forzadas son aquellas en las que la perturbación se aplica de manera continua, por ejemplo, las olas de marea. (Fernández, 2010)

Periodo de duración:

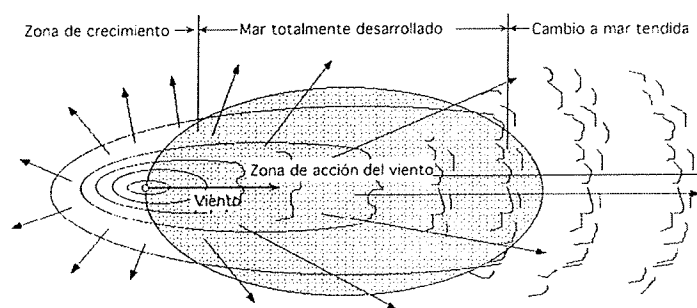
- Olas de periodo largo (de 5min a 24hr)
- Olas de gravedad (de 1seg a 30seg)
- Olas capilares (menos de 0.1seg)

3. Comportamiento y características de las olas generadas por el viento. Estas olas se forman cuando el viento fluye sobre la superficie marina; cuando surge este movimiento se generan olas sin una dirección definida, aunque siempre existan algunas predominantes. Cuando las olas abandonan la zona en que sopla el viento se van propagando de acuerdo con su velocidad

(c), que es función de la longitud de onda (λ), que es la distancia entre las crestas de dos olas consecutivas. Las olas se agrupan por sus longitudes de onda, formándose así olas casi regulares, que dan lugar a la mar tendida (mar abierto), la cual es la que se aprovecha para generar energía, como se puede observar a continuación en la Figura 81. (Fernández, 2010)

Figura 80

Acción de un viento constante sobre una zona determinada del mar.



Fuente: Fernández., 2010.

Las olas son un conjunto de ondas irregulares, debido a que su amplitud, energía y dirección varían aleatoriamente a lo largo del año; cambian desde la calma absoluta, aproximadamente hasta 1 MW/km al año, hay lugares en los que durante períodos de varios minutos pueden llegar a alcanzar hasta 10MW/km. También pueden estar sometidas a variaciones instantáneas. (Fernández, 2010)

En el oleaje es fundamental la distinción entre la forma del perfil de la onda, que en la onda progresiva se mueve con velocidad c , y la trayectoria del movimiento de las partículas de agua que constituyen la ola; las dos curvas, perfil y trayectoria, son muy diferentes.

Las olas se trasladan, pero no las partículas de agua que se mueven en trayectorias elípticas o circulares; las órbitas elípticas en las olas largas pueden

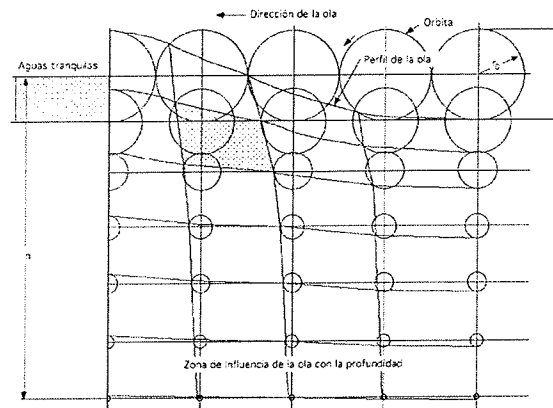
comprimirse hasta formar segmentos circulares. Las órbitas se consideran cerradas, por motivos prácticos para su análisis, aunque en realidad son abiertas, es decir, el oleaje está asociado a un transporte de corriente. (Fernández, 2010)

En las ondas largas, en particular las de mareas, el desplazamiento horizontal de las partículas es prácticamente igual tanto en superficie como en el fondo, describiendo trayectorias (órbitas) del mismo radio en la misma horizontal, pero de distinta fase; las partículas situadas en la misma vertical describen órbitas de igual fase, pero sus radios disminuyen con la profundidad, como se ilustra en la Figura 82.

Las partículas de agua en la cresta se mueven conforme a la dirección o propagación de la ola, mientras que las partículas ubicadas en los valles se mueven del lado contrario.

Figura 81

Movimiento de las partículas de agua en una ola.

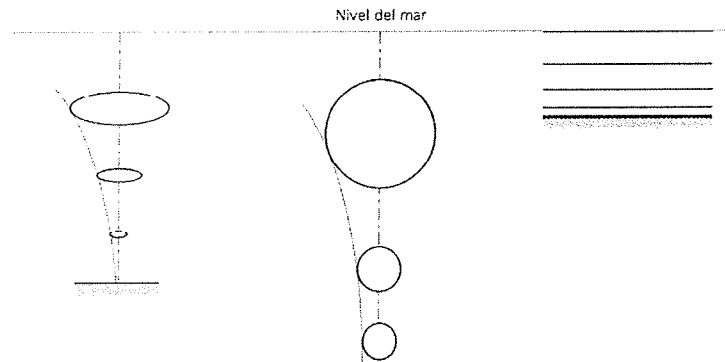


Fuente: Fernández, 2010.

Si no existe suficiente profundidad, el fondo afecta al desplazamiento vertical de las órbitas que tendrán forma de elipses. Si la profundidad es muy pequeña, el movimiento vertical queda totalmente impedido y las trayectorias de las partículas serían rectas horizontales, como se observa en la Figura 83.

Figura 82

Influencia del fondo en el desplazamiento vertical de las órbitas.



Fuente: Fernández., 2010.

Como se muestra en la Figura 82, las dimensiones de la órbita de las ondas disminuyen exponencialmente comenzando por las ondas superficiales. Suponiendo que el movimiento de la órbita superficial se reduce a un círculo de radio r_0 , se obtiene que el radio disminuirá según la profundidad (h), la cual es la altura desde la superficie hasta el fondo del mar (Figura 83), de acuerdo a la siguiente relación:

$$r = r_0 e^{\frac{-2\pi h}{\lambda}}$$

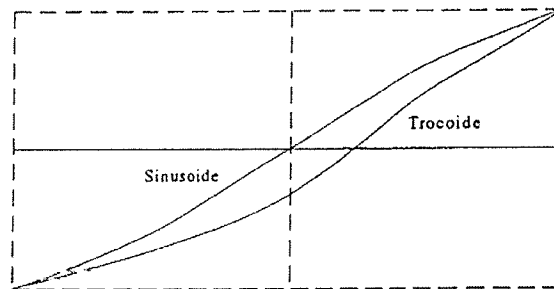
Se debe tomar en cuenta que para definir las características cinemáticas de una ola, influye directamente de la magnitud de la relación $\frac{H}{\lambda}$ (altura de la ola/longitud de onda); esto es debido a que si esta relación es muy pequeña (de orden 1/50 o menor), las olas son caracterizadas por un periodo (T) alto, amplitud de onda (λ) grande y altura (H) pequeña. El tipo de ola que se adecua a estas condiciones son las secas y las co-oscilaciones de marea, las cuales se considera que tienen un movimiento sinusoidal y su movimiento se puede describir mediante la *Teoría de ondas lineal*. (Fernández, 2010)

Si la relación $\frac{H}{\lambda}$ tiene valores apreciables, el perfil de las olas se define como Trocoidal o irregular. (Fernández, 2010)

Un movimiento trocoidal se define como una curva plana que describe un punto, vinculado a una circunferencia generatriz, que rueda sobre una línea recta directriz, tangencialmente, sin deslizamiento. Las características cinemáticas de las olas trocoidales se pueden describir mediante la *Teoría de ondas no lineal*.

Figura 83

Diferencia entre una onda senoide y una onda trocoide.



Fuente: Olivella, 1998.

Es indispensable aplicar este tipo de consideraciones para el análisis del oleaje sobre los fondos marinos, así como también sobre las instalaciones portuarias y construcciones costeras.

A continuación se dará una breve explicación sobre los conceptos básicos de la teoría de ondas lineal, y más adelante sobre la teoría de ondas no lineal.

4. Teoría de ondas lineal. Se definen como *olas cortas* aquellas en las que la velocidad de la ola es dependiente de la longitud de la onda (λ), pero independiente de la profundidad del mar (h). Las olas de viento (de superficie) son las que se describen mediante esta teoría. En el siguiente estudio se realizarán consideraciones sobre el desplazamiento vertical de las ondas, periodo, longitud, velocidad de traslación, rotura, energía de las olas, potencia, entre otras. (Fernández, 2010)

a. Desplazamiento vertical de la ola. La ecuación que describe la oscilación de la superficie libre o desplazamiento vertical de una ola en un sistema de coordenadas (x,y), es la siguiente:

$$y = \frac{H}{2} \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T} \right)$$

La deducción de la misma está dada mediante una aplicación simplificada de la primera parte de la ecuación general de Navier-Stokes del flujo no permanente, suponiendo que el flujo no es rotacional. El resultado es una ola sinusoidal que se describe integrando la teoría del movimiento de las ondas.

Ecuación de Navier-Stokes:

$$y(x, t) = a \cos (kx - ft)$$

Donde:

- $n(x,t)$: variación instantánea de la superficie (desplazamiento vertical de la ola)
- a : altura media de la ola (radio de la circunferencia del recorrido de la partícula de agua).

$$a = \frac{H}{2}$$

- k : número de onda (número de ola).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

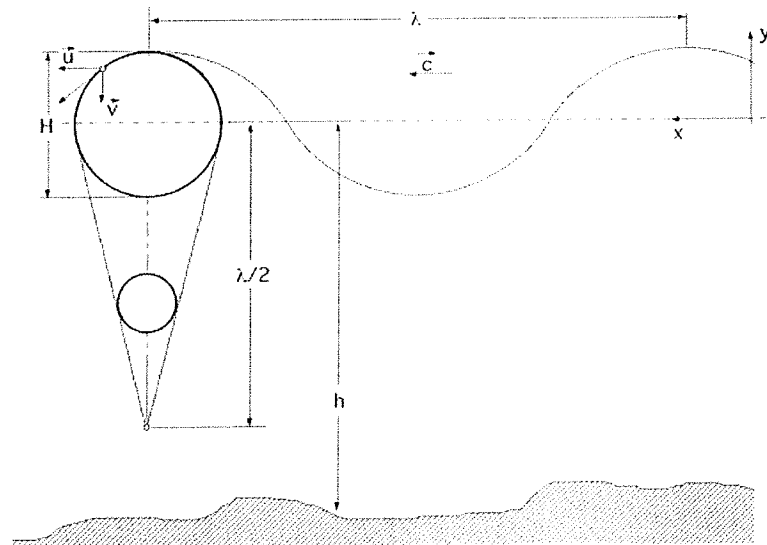
- f : frecuencia angular.

$$f = \frac{2\pi}{T}$$

- T : período de la ola.

En la Figura 85 se encuentra el esquema que describe el movimiento de una ola lineal.

Figura 84
Esquema de una ola la lineal.



Fuente: Fernández,, 2010.

b. Periodo. El periodo T de las olas es el tiempo transcurrido para que pasen por un punto dos crestas o dos valles sucesivos pertenecientes a un mismo tren de olas. El periodo que describe a un conjunto de ondas sinusoidales es el siguiente:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda} T h \left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)}} = \frac{2\pi}{w}$$

Donde:

- g : aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).
- λ : amplitud de la ola.
- h : profundidad.
- w : velocidad angular.

$$w = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Si el agua tiene suficiente profundidad $h > \frac{\lambda}{2}$, el periodo es $T = \frac{\lambda}{c}$; en las olas cortas se determina inmediatamente una vez conocidos λ y c , en la forma:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi}$$

Por lo tanto;

$$T = \frac{2\pi c}{g}$$

Donde:

- c : velocidad de traslación de la ola (celeridad)

c. Longitud de onda. La expresión que describe la longitud de onda de las olas es la siguiente:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} Th \frac{2\pi h}{\lambda}$$

Para las olas superficiales de viento, las olas cortas con $h > \frac{\lambda}{2}$, se cumple:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$$

d. Velocidad de traslación. La velocidad de traslación de la onda o celeridad, es el parámetro que permite diferenciar las ondas cortas de las largas y obedece a la siguiente ecuación:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} Th \frac{2\pi h}{\lambda}$$

En aguas profundas, donde $h > \frac{\lambda}{2}$, la ecuación se transforma en:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = f(\lambda)$$

La velocidad de propagación de este tipo de olas es notablemente inferior a la de las olas largas (superficiales), ya que estas pueden alcanzar longitudes de onda del orden de 200 ó 300 metros, aunque a veces se encuentran longitudes de ola hasta un máximo de 600 metros.

En aguas poco profundas, donde $\frac{\lambda}{20} < h < \frac{\lambda}{2}$, la ecuación (6) se convierte en:

$$c = f(h) = \sqrt{gh} ; \lambda = \sqrt{gh}T$$

Las ondas largas o superficiales, son aquellas en las que la velocidad de traslación c , depende sólo de la profundidad h del mar, pero es independiente de λ . En canales de profundidad limitada:

$$c = \sqrt{g(h + H)}$$

Mediante el análisis de la ecuación descrita anteriormente, se observa que la longitud de la ola y su celeridad, disminuyen considerablemente conforme disminuye la profundidad, es decir, que estas son menores mientras más se acerca esta al litoral.

e. Rotura de la ola. Las componentes de la velocidad (u, v) del movimiento circular (tangencial) de las partículas de agua en la ola, se describen con las siguientes ecuaciones:

Componente horizontal.

$$u = \frac{\pi H}{T} * \frac{\cosh\left\{\frac{2\pi}{\lambda}(y + h)\right\}}{\sinh\left(\frac{2\pi}{\lambda} * h\right)} * \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - wt\right)$$

Componente vertical.

$$v = \frac{\pi H}{T} * \frac{\sinh\left\{\frac{2\pi}{\lambda}(y + h)\right\}}{\sinh\left(\frac{2\pi}{\lambda} * h\right)} * \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - wt\right)$$

Donde:

- X: la coordenada horizontal en la dirección de propagación de la ola.
- Y: La coordenada vertical.

Las ecuaciones (7) y (8), en aguas profundas se transforman en:

Componente horizontal.

$$u = \frac{\pi H}{T} * e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} * \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - wt\right)$$

Componente vertical.

$$v = \frac{\pi H}{T} * e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} * \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - wt\right)$$

Por lo tanto, para aguas poco profundas:

Componente horizontal.

$$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - wt\right)$$

Componente vertical.

$$v = \frac{\pi H}{T} * \frac{y + H}{h} * \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - wt\right)$$

La rotura de la ola ocurre cuando la componente horizontal de la velocidad de las partículas de agua se iguala a la celeridad ($u=c$), este es un proceso que va acompañado de una importante pérdida de energía; la condición de rotura implica lo siguiente:

$$\sqrt{gh} = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - wt\right) = |x = 0; t = 0; H = H_r| = \frac{H_r}{2} \sqrt{\frac{g}{h}}$$

Donde:

- H_r : altura de la ola al romper.

f. Energía de la ola. En una ola, cada partícula está dotada de energía cinética y energía potencial; en las ondas regulares (sinusoidales), los valores de la longitud de onda λ y el periodo T , permanecen constantes; por lo que la energía de una onda de este tipo es la suma de la energía potencial E_p y la cinética E_c :

$$E = E_p + E_c = \frac{\rho g \lambda b H^2}{8} \text{ Kgm}$$

Donde:

- ρ : densidad del agua en kg/m^3 .
- H : altura de la ola, distancia entre la cresta y el valle.
- b : anchura de la cresta o longitud del frente de ondas.

Para aguas profundas la ecuación se transforma en:

$$E = E_p = E_c = \frac{\rho g \lambda b H^2}{16} = \left| \lambda = \frac{g T^2}{2\pi} T h * \frac{2\pi h}{\lambda} \right| = \frac{\rho g^2 T^2 b H^2}{32\pi} T h * \frac{2\pi h}{\lambda}$$

Para aguas poco profundas se obtiene que:

$$T h * \frac{2\pi h}{\lambda} \approx 1$$

Al sustituir los valores de la densidad del agua del mar (1020 kg/ m^3) y la gravedad (9.810 m/s^2), se obtiene que:

$$E = 976.4 b T^2 H^2$$

Debido a que la energía de las olas depende del cuadrado de su altura H es evidente que la disminución de esta altura con la profundidad h es importante en el estudio de la distribución de la energía de las olas en profundidad. La determinación de la presión ejercida por una ola contra un obstáculo, debida a la transferencia de su

energía cinética sobre el mismo, es de gran interés para el aprovechamiento de la energía de las olas.

Se pueden medir presiones de orden de la tonelada por metro cuadrado e incluso de decenas de toneladas por metro cuadrado durante las tempestades más fuertes, por lo que fácilmente se deduce la importancia que tienen estos valores en la construcción de obras portuarias o en mar abierto o en la misma navegación. La presión de las olas varía, al igual que la energía, con el cuadrado de la amplitud y se atenúa con la profundidad en forma exponencial.

g. Potencia de la ola. La potencia (N_L) del frente de la ola por unidad de longitud ($b=1$), se describe con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} N_L &= \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H}{2}\right)^2 c * \text{sen}^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t\right) \left(1 + \frac{4\pi * \frac{h}{\lambda}}{Sh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)}\right) \\ &= \rho g \left(\frac{H}{2}\right)^2 c_g \text{sen}^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t\right) \end{aligned}$$

Donde:

- c_g : Velocidad del grupo de olas (asociada al avance de la energía), es diferente a la velocidad c de la ola.

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{4\pi * \frac{h}{\lambda}}{Sh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)}\right)$$

En aguas profundas, en donde $h > \frac{\lambda}{2}$, se cumple que $c_g = \frac{c}{2}$, ya que las olas que están encabezando al grupo van perdiendo energía y acaban por desaparecer; mientras tanto, en la cola del grupo aparecen olas nuevas. Para este caso, la ecuación (11) de la potencia de la ola se transforma en:

$$N_L = \frac{\rho g H^2 c_g}{8} = \frac{\rho g H^2 c}{16} = \left| c = \frac{gT}{2\pi} ; T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} = \frac{\rho g H^2 g^2 T}{32\pi} = \frac{\rho H^2}{16} \sqrt{\frac{\lambda g^3}{2\pi}} \right.$$

En aguas poco profundas, en donde $h < \frac{\lambda}{2}$, se cumple que $c_g = c$, por lo tanto, la ecuación (11) se convierte en:

$$N_L = 0.955 H^2 T \frac{kW}{m}$$

Donde:

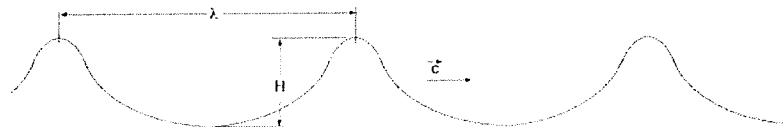
- H: se mide en metros.
- T: se mide en segundos.
- ρ : 1020 kg/m³.

5. Teoría de ondas no lineal. Para describir el movimiento de una onda no lineal existen dos teorías: la Teoría de Stokes y la Teoría de la Onda Solitaria. (Fernández, 2010)

a. Teoría de Stokes. La Teoría de Stokes describe una onda de superficie no lineal y periódica sobre una capa de fluido no viscoso de profundidad media constante. Esta teoría fue creada por Sir George Stokes a mediados del siglo XIX.

Figura 85

Esquema de la ola no lineal de Stokes.



Fuente: Fernández, 2010.

Para describir la ola en aguas poco profundas, Stokes propone una ecuación en la que el desplazamiento vertical se obtiene de la siguiente forma:

$$y = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{3}{64} \frac{\lambda^2 H^2}{\pi^2 h^3} \cos\left\{2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)\right\}$$

De la ecuación (15) se obtiene que para la longitud de onda λ , la celeridad c y la componente v de la velocidad de la partícula se utilizan las mismas fórmulas que en la teoría lineal.

La componente u de la velocidad es la siguiente:

$$u = \frac{\lambda H}{2hT} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{3}{64} \frac{\lambda^3 H^2}{\pi^2 h^4 T} \cos\left\{2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)\right\}$$

La ecuación para definir la altura de la ola al romper (condición de rotura de la ola H_r), es:

$$H_r = \frac{16}{3} \frac{h^2 \pi^2}{T^2 g} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{3gT^2}{4\pi^2 h}} \right)$$

La energía del frente de la ola (b), es:

$$E = \frac{\rho g \lambda b H^2}{8} \left(1 + \frac{9H^2}{64 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 h^6} \right)$$

La potencia del frente de la ola (b), es:

$$N = \frac{\rho g b H^2 c_g}{8} \left(1 + \frac{9H^2}{64 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 h^6} \right)$$

Donde la celeridad es: $c_g = c = \sqrt{gh}$

Al comparar las ecuaciones de la Teoría de Stokes para la descripción cinemática de las ondas no lineales con las de la Teoría de ondas lineal descrita con anterioridad, se obtiene que Stokes modifica las ecuaciones lineales mediante un factor de corrección de la forma:

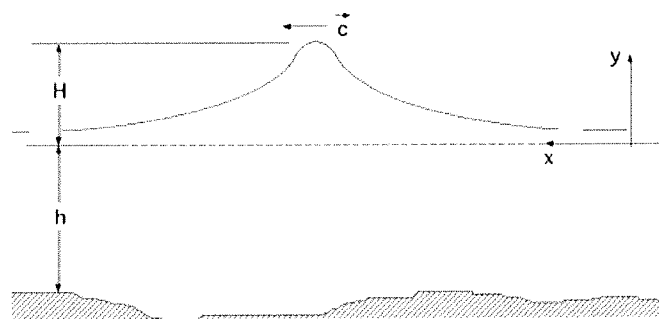
$$\text{Factor de corrección de Stokes} = \frac{9H^2}{64 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 h^6}$$

La cual, para grandes profundidades tiende a 0.

b. Teoría de la onda solitaria. La onda solitaria cuenta con la característica principal de que su superficie está en cada instante por encima del nivel normal del mar (Figura 18), este tipo de onda sucede en situaciones de desastres naturales como por ejemplo, un tsunami. (Fernández, 2010)

Figura 86

Esquema de la ola solitaria.



Fuente: Fernández, 2010.

El perfil de la ola se describe mediante el desplazamiento vertical y , para cada posición x y tiempo t de la siguiente manera:

$$y = H \operatorname{sech}^2 \left\{ \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right\}$$

Donde:

- El valor de la celeridad c , se describe como:

$$c = \sqrt{gH \left(1 + \frac{H}{h}\right)}$$

La componente horizontal de la velocidad de las partículas del agua se define como:

$$u = \sqrt{\frac{g}{h}} y = \sqrt{\frac{g}{h}} y * \operatorname{sech}^2 \left\{ \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right\}$$

La condición de rotura de la ola es:

$$H_r = 0.714h_r$$

Donde h_r es la altura de la ola al romper (de una onda en su estado normal).

La energía de la ola en la zona más profunda del mar cerca del litoral, viene dada por la expresión:

$$E = 1.54\gamma\sqrt{(Hh)^3}b$$

Donde H , h y b están dados en metros y γ es el peso específico del agua del mar ($10,006.2\text{N/m}^3$).

Al observar la ecuación de la energía tanto en la Teoría de ondas lineal como en la no lineal, se obtiene que la energía de la ola disminuye conforme disminuye su profundidad, por lo que las zonas cercanas al litoral no son recomendables para la instalación de prototipos o sistemas de generación de energía mediante las olas, ya que el movimiento de las mismas es casi nulo.

B. Ecuación del caudal.

Caudal es el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. (Díaz, 2006)

El caudal se puede determinar mediante las ecuaciones que a continuación se plantean.

$$Q = vA$$

Donde:

v: velocidad (m/s).

A: área transversal (m²).

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

V: volumen (m³).

t: tiempo (s).

C. Principio de Arquímedes (Fuerza boyante).

El principio afirma que: «un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido, recibe un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen del fluido que desplaza» (Ortega, 2006), se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$F = mg = \rho g V_d$$

Donde:

F: fuerza de empuje hidrostático.

m: masa del objeto.

g: aceleración por la gravedad (9.810m/s²).

ρ : densidad del fluido (1000 kg/m³ para agua dulce, 1020 kg/m³ para agua de mar).

V_d: volumen de agua desplazado por el objeto.

D. Cilindro hidráulico de movimiento lineal.

Un cilindro hidráulico es un cilindro cerrado con un pistón en su interior que desliza y que transmite su movimiento al exterior mediante un vástago. Se compone de las tapas trasera y delantera, de la camisa donde se mueve el pistón, del propio pistón, de las juntas estáticas y dinámicas del pistón y del anillo rascador que limpia el vástago de suciedad. (Creus, 2011)

1. Funcionamiento básico. La presión hidráulica actúa en el pistón contenido en el cilindro hidráulico para producir un movimiento de forma lineal. (Creus, 2011)

2. Tipos de cilindros hidráulicos. Los cilindros hidráulicos se dividen de la siguiente manera: cilindro de doble efecto, de simple efecto, guiado o de impacto.

a. Cilindro hidráulico de doble efecto. En este tipo de cilindros, el aire a presión entra por el orificio de la cámara trasera y, al llenarla, hace avanzar el vástago, que en su carrera comprime el aire de la cámara delantera que se escapa al exterior a través del correspondiente orificio. En la carrera inversa del vástago se invierte el proceso, penetrando ahora el aire por la cámara delantera y siendo evacuado al exterior por el orificio de la cámara trasera. (Creus, 2011)

b. Cilindro hidráulico de simple efecto. Este cilindro funciona de forma similar a los de doble efecto, exceptuando que la carrera inversa se efectúa gracias a la acción del muelle. (Creus, 2011)

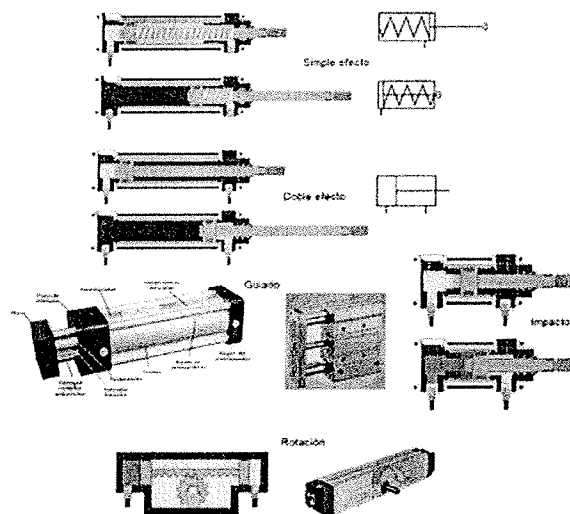
c. Cilindro hidráulico guiado. Dos o más vástagos rígidos proporcionan una fijación al mecanismo (no existirá rotación) acoplado al cilindro, evitando las fuerzas radiales y de torsión que la carga ejercería en un cilindro normal. (Creus, 2011)

d. Cilindro hidráulico de impacto. Este cilindro mueve el vástago a gran velocidad (hasta 10 m/s) y se utiliza en las prensas para trabajos de embutición, remachado, etc. (Creus, 2011)

e. Cilindro hidráulico de rotación. Proporciona un movimiento de rotación gracias a una cremallera unida al vástago o a un elemento rotativo de paletas. (Creus, 2011)

Figura 87

Cilindro hidráulico de simple efecto, doble efecto, guiado y rotación.



Fuente: Creus, 2011.

E. Presión hidráulica.

Se le llama presión a la fuerza normal por unidad de área, la presión está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde:

F: fuerza normal aplicada a una superficie.

A: área en la que es aplicada la fuerza.

En las unidades del Sistema Internacional (S.I.) la unidad de presión es el Pascal, lo cual equivale a la fuerza normal de un Newton cuando se aplica en un área de un metro cuadrado (1 Pascal = 1 N/m²); su equivalente en el Sistema Inglés es de 0.145 Lb/in² o PSI (Pounds Square Inches). (Díaz, 2006)

F. Ecuación de Bernoulli.

En 1738, Bernoulli propone un principio en su obra *Hidrodinámica* apoyado en la ley de la conservación de energía, el cual describe el comportamiento de un flujo laminar que se mueve a lo largo de una corriente de agua y expresa que un fluido ideal (sin viscosidad y rozamiento) durante su circulación por un conducto cerrado posee energía constante a lo largo de su recorrido. (Mott, 2006)

El principio viene dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + h_B = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + h_f + h_L \quad (28)$$

Donde:

z: elevación de la tubería.

V: velocidad en la tubería.

g: gravedad (9.810m/s²).

P: presión en la tubería .

γ: peso específico del agua (9,810N/m³ para agua dulce).

h_B :altura de carga de una bomba .

h_f : pérdidas por fricción .

h_L: pérdidas localizadas (por accesorios).

G. Número de Reynolds.

Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que es posible pronosticar el flujo laminar o turbulento si se conoce la magnitud de un número adimensional. Reynolds estudió las características de flujo de los fluidos inyectando un trazador dentro de un líquido que fluía por una tubería. A velocidades bajas del líquido, el trazador se mueve linealmente en la dirección axial; sin embargo, a mayores velocidades, las líneas de flujo del fluido se desorganizan y el trazador se dispersa de forma rápida después de su inyección en el líquido. El flujo lineal se denomina Laminar, mientras que el flujo errático obtenido a mayores velocidades del líquido se denomina Turbulento. (Mott, 2006)

El número de Reynolds es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa. La fuerza de inercia se desarrolla a partir de la segunda ley del movimiento de Newton ($F = ma$), mientras que la fuerza viscosa se relaciona con el producto del esfuerzo cortante por el área. (Mott, 2006)

La ecuación que muestra la definición del número de Reynolds es la siguiente:

$$N. R. = \frac{V\phi}{\nu}$$

Donde:

V: velocidad del flujo.

ϕ : diámetro de la tubería.

ν : viscosidad cinemática.

Para aplicaciones prácticas del flujo en tuberías, se obtiene que si el Número de Reynolds para el flujo es menor que 2000, éste será laminar. Si el Número de Reynolds es mayor que 4000, el flujo será turbulento. En el rango de Números de Reynolds entre 2000 y 4000 es imposible predecir qué tipo de flujo existe; por lo que se le denomina región crítica. (Mott, 2006)

Se denomina viscosidad a la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama *fluido ideal*. La viscosidad cinemática se presenta cuando un fluido está en movimiento, esta resulta ser igual al cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido. (Mott, 2006)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

μ : viscosidad dinámica.

ρ : densidad del fluido.

La viscosidad cinemática de un fluido se determina mediante la temperatura a la que se encuentre el mismo, tales valores se encuentran en la Tabla 8.

Tabla 8

Valores de la viscosidad cinemática.

°C	Viscosidad cinemática (m ² /s)
0	0.000001785
5	0.000001519
10	0.000001306
15	0.000001139
20	0.000001003
25	0.000000893
30	0.000000800
40	0.000000658
50	0.000000553
60	0.000000474
70	0.000000413
80	0.000000364
90	0.000000326
100	0.000000294

Fuente: Mott, 2006.

H. Pérdidas por fricción en una tubería.

A medida que un fluido fluye por una tubería o cualquier otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción que existe entre el líquido y la pared de la tubería; dichas energías traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo. (Mott, 2006)

La ecuación de Darcy-Weisbach permite calcular la pérdida de carga debida a la fricción dentro de una tubería que se encuentra totalmente llena. Permite la evaluación apropiada del efecto de cada uno de los factores que inciden en la pérdida de energía en una tubería, es posible aplicar esta fórmula a todos los tipos de flujo hidráulico (desde laminar hasta turbulento), siendo la única variante el coeficiente de fricción.

$$h_f = \frac{fLV^2}{\phi 2g}$$

Donde:

f: coeficiente de fricción .

L: longitud de la tubería.

V: velocidad del fluido.

ϕ : diámetro de la tubería.

El coeficiente de fricción para un flujo laminar (N.R.< 2000) se calcula según la fórmula:

$$f = \frac{64}{N.R.}$$

Donde N.R. es el número de Reynolds.

Mientras que para un flujo turbulento (N.R.>4000), el coeficiente de fricción se calcula mediante la ecuación de Swamee-Jain, la cual es una forma simplificada de la ecuación de Colebrook-White. Para desarrollar esta ecuación, los investigadores

Prabhata K. Swamee y Akalank K. Jain, resolvieron la ecuación de Colebrook-White calculando el factor de fricción para los dos extremos de flujo turbulento: flujo turbulento hidráulicamente liso y flujo turbulento hidráulicamente rugoso con altos números de Reynolds. Swamee y Jain combinaron las dos ecuaciones con el fin de obtener una ecuación explícita para el factor de fricción en la zona de transición de flujo turbulento en tuberías circulares; por lo tanto, la ecuación final para calcular el coeficiente de fricción para todo rango de flujo turbulento. (Mott, 2006)

La ecuación viene dada por la siguiente expresión:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7\phi} + \frac{5.74}{N.R.^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Donde:

ε : coeficiente de rugosidad del material.

ϕ : diámetro de la tubería.

La ecuación de Darcy-Weisbach en función del caudal viene dada por la siguiente ecuación:

$$hf = f \frac{8 * L * Q^2}{g * \pi^2 * \phi^5}$$

e. Pérdidas localizadas en una tubería. Para calcular las pérdidas localizadas debido a accesorios utilizados en la tubería, es necesario evaluar el tipo de accesorio para así poder calcular su longitud equivalente (L/ϕ) mediante la Tabla 9.

Tabla 9

Longitud equivalente en diámetros de los accesorios de una tubería.

Accesorio	Longitud equivalente en diámetros
Codo de calle de 45°	26
Codo de devolución cerrada	50
Codo de radio corto de 90°	32
Codo de radio largo de 90°	20
Codo estándar de 45°	16
Codo estándar de 90°	30
T estándar flujo a través de un tramo	20
T estándar flujo a través de una rama	60
Válvula de ángulo totalmente abierta	150
Válvula de compuerta 1/2 abierta	160
Válvula de compuerta 1/4 abierta	900
Válvula de compuerta 3/4 abierta	35
Válvula de compuerta totalmente abierta	8
Válvula de globo totalmente abierta	340
Válvula de mariposa totalmente abierta	45
Válvula de retención totalmente abierta	135
Válvula de verificación tipo de bola	150
Válvula de verificación tipo giratorio	100

Fuente: Mott, 2006.

Tras obtener el valor para la longitud equivalente del accesorio, se procede a calcular el valor f (coeficiente de fricción) y el número de Reynolds del fluido y con esto obtener el factor k , el cual se utilizará para el cálculo final de la pérdida por accesorio utilizando la siguiente fórmula:

$$h_L = \frac{kV^2}{2g}$$

Donde:

k : factor dependiente del tipo de accesorio en la tubería.

V : velocidad del fluido.

a. Pérdidas por contracción súbita. Este tipo de pérdidas se dan cuando ocurre una reducción de sección. Para su cálculo se requiere el conocimiento de la velocidad del fluido y el factor k , el cual en este caso, depende principalmente del diferencial de diámetro que se encuentra en ambas tuberías. El factor k se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$k = 0.42 \left[1 - \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right]^2 \right]^2$$

Donde:

φ_1 : diámetro de la sección mayor.

φ_2 : diámetro de la sección menor o reducida.

Finalmente, se utiliza la ecuación (33) para determinar la pérdida por contracción súbita de la tubería, utilizando el factor k obtenido con la ecuación (34).

b. Pérdidas por ampliación súbita. Para calcular las pérdidas por ampliación súbita se utiliza el mismo procedimiento para calcular las pérdidas debido a la contracción de sección; sin embargo, en este caso se calcula el factor k de la siguiente manera:

$$k = \left[1 - \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right]^2 \right]^2$$

J. Potencia.

Se define como potencia a la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo. (Resnick, 2004). Las dimensionales utilizadas para la potencia en el Sistema Internacional (S.I.) son: J/s (Joules/segundo), lo cual equivale a Watts.

1. Potencia teórica. La potencia teórica es la potencia que generará un sistema considerando de la turbina utilizada para la generación de energía es 100% eficiente y trabaja de la manera ideal. (Resnick, 2004). Para calcular la potencia teórica se utiliza la ecuación general de la potencia para una bomba o turbina hidráulica:

$$P_T = \rho g Q H_n$$

Donde:

P: potencia teórica (Watts).

ρ : densidad del fluido (1000 kg/m³ para agua dulce).

g: aceleración por la gravedad (9.810m/s²).

Q: caudal calculado (m³/s).

H_n: altura piezométrica neta de diseño (m).

2. Potencia real. La potencia real de un sistema se obtiene al multiplicar la potencia teórica por la eficiencia real de la turbina, por lo tanto:

$$P_R = P_T \eta$$

Donde:

P_T: potencia teórica.

η : eficiencia de la turbina utilizada.

K. Conceptos generales de Turbinas Hidráulicas: funcionamiento y clasificación.

Una turbina hidráulica es una máquina motriz que transforma la energía contenida en el agua en energía mecánica. Las principales partes que la conforman son las siguientes:

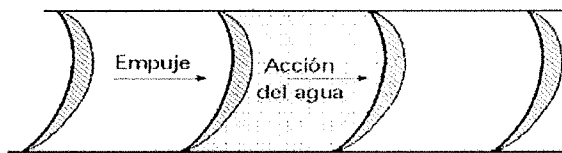
- **Distribuidor:** Es una parte fija de la turbina, su función mecánica es direccionar y regular el caudal que llega al rodete y su función hidráulica es la de transformar la energía potencial del agua en energía cinética. (Maldonado, 2005)

- **Rodete:** Es la parte móvil de la turbina, es puesto en movimiento por el agua que sale del distribuidor y su función es trasladar la energía mecánica al eje que se conectará con el generador para generar la energía eléctrica. (Maldonado, 2005)

Las turbinas se pueden clasificar en turbinas de acción y turbinas de reacción.

1. **Turbinas de acción.** Estas turbinas se utilizan para el caso en el cual se considera que la energía del agua que sale del distribuidor es totalmente cinética. Otra condición para utilizar este tipo de turbinas es que el recorrido del agua que pasa por el rodete debe estar a presión atmosférica. En las turbinas de acción, el empuje y la acción del agua coinciden (Figura 89). Las turbinas más utilizadas para esta clasificación son las turbinas tipo PELTON, las cuales son aplicables a condiciones en las que el salto es grande y el caudal reducido; también se encuentran las turbinas de Flujo Cruzado o BANKI, que trabajan con un salto bajo pero caudal grande y las turbinas tipo TURGO, que funciona para un caudal reducido y saltos medios. (Maldonado, 2005)

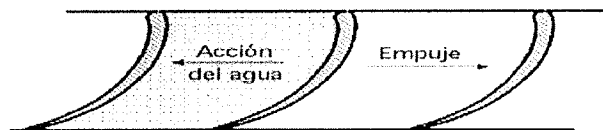
Figura 88
Demostración del funcionamiento de una turbina de acción (tipo PELTON).



Fuente: Maldonado, 2005.

2. *Turbinas de reacción.* La consideración principal con la cual se debe implementar este tipo de turbinas es que la energía del agua que sale del distribuidor es parte cinética y parte a presión, esto quiere decir que el agua sale con una velocidad inferior a la de las turbinas de acción, pero con una presión no nula. Las turbinas de reacción trabajan completamente sumergidas en el agua. En las turbinas de reacción, el empuje y la acción del agua son totalmente opuestos (Figura 90). Se puede enumerar una gran cantidad de tipos de turbinas que abarca esta clasificación, pero entre las más comerciales se encuentran las siguientes: PELTON, FRANCIS (utilizable cuando se cuenta con valores medios de salto y caudal), KAPLAN (utilizable cuando el salto es pequeño y el caudal es de gran magnitud). (Maldonado, 2005)

Figura 89
Demostración del funcionamiento de una turbina de reacción.



Fuente: Maldonado, 2005.

VIII. CÁLCULOS Y RESULTADOS.

La Hidráulica es una rama de la mecánica de fluidos que se encarga de determinar las propiedades mecánicas de los mismos mediante la interacción entre fuerzas, masas y condiciones externas a las que se expongan los fluidos. (Mott, 2006)

Para realizar un análisis completo del desarrollo del proyecto, es necesario documentar todas las teorías y principios propios de la hidráulica por medio de los cuales el proyecto funcionará de la manera correcta. Estas teorías y principios describen mediante cálculos matemáticos el funcionamiento del sistema en general y cómo este se adaptará a nuevas condiciones externas si llegara a existir un cambio en la localización del prototipo.

A. Análisis de las olas.

Para este proyecto, es esencial conocer las características generales y cinemáticas de las olas existentes, debido a que a partir de estas se determinan las condiciones de diseño fundamentales para la construcción del prototipo con el que se generará energía mediante ellas.

1. Características del oleaje. Para identificar las características del oleaje con el cual el prototipo a escala trabajaría en los ensayos de laboratorio, se realizó una medición de forma experimental las dimensiones de las olas con las que se trabajarían en el canal hidráulico (Figura 91), para ello se realizaron una serie de ensayos y se determinó la amplitud y altura de la ola promedio, los resultados se muestran en la Tabla 10.

Figura 90
Determinación de dimensiones de las olas experimentalmente.

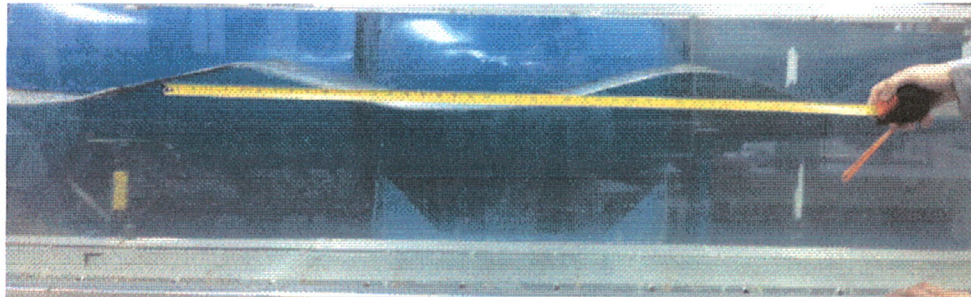


Tabla 10
Resultados de las dimensiones de las olas mediante ensayos experimentales.

No. de Ensayo	λ (cm)	H (cm)
1	30	10
2	29	9
3	32	10
4	30	11
5	30	9
PROMEDIO	30.2 \approx 30	9.8 \approx 10

Al utilizar la ecuación (1), se puede determinar el radio de las órbitas formadas por el movimiento de las partículas de agua según la profundidad del canal de olas; la cual se obtuvo que es de 40cm. Para realizar dicho cálculo se necesita considerar el radio que tendrá la órbita formada en la superficie, cuyo diámetro se considera que será igual a la altura de la ola, por lo tanto el radio de la órbita superficial es:

$$r_o = \frac{H}{2} = \frac{10\text{cm}}{2} = 5\text{ cm}$$

Tabla 11
Radio de la órbita del movimiento de las partículas de agua según su profundidad.

r0 (cm)	h (cm)	r
5	0	5
5	5	1.658E-45
5	10	5.499E-91
5	15	1.824E-136
5	20	6.049E-182
5	25	2.006E-227
5	30	6.654E-273
5	35	0
5	40	0

Como se puede observar en la Tabla 11, el radio de las órbitas disminuye de acuerdo a la profundidad del canal, por lo tanto se comprueba que efectivamente existe más movimiento por parte de las partículas de agua en la superficie que en el fondo, donde el movimiento se considera que es casi nulo.

2. Determinación de teoría de ondas a aplicar. Tras obtener las dimensiones de las olas con las cuales trabajaría el prototipo diseñado, se procede a calcular la relación $\frac{H}{\lambda}$ para determinar la teoría con la que se analizarían las mismas. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12.
Cálculo de la relación H/λ .

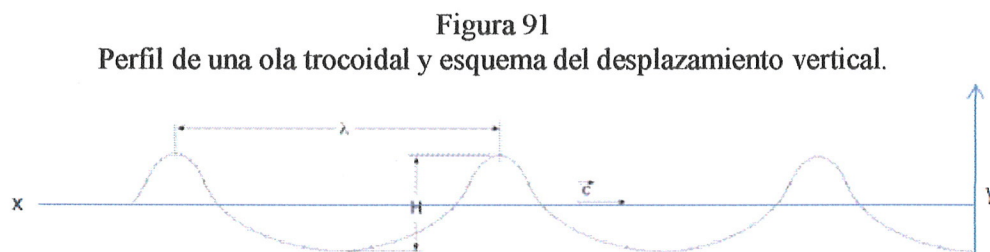
λ (cm)	H (cm)	H/λ
30	10	$1/3 \approx 0.333$

Debido a que la relación $\frac{H}{\lambda}$ es de orden $1/3$, es decir, mayor que $1/50$, las olas del canal no entran en la categoría de ondas regulares o lineales, por lo tanto se categorizan como olas trocoidales o irregulares y sus características cinemáticas se

describen mediante la Teoría de ondas no lineal, cuyos principios y bases se demostraron en el Marco Teórico de este documento.

3. Teoría de ondas no lineal. La teoría de ondas no lineal se analizará mediante la Teoría de Stokes, la cual plantea una serie de ecuaciones para describir la cinemática de una ola irregular o trocoidal, este tipo de olas es caracterizado por tener un periodo (T) corto y amplitud de onda (λ) pequeña en relación a la altura de la ola (H).

a. Desplazamiento vertical de la ola. El desplazamiento vertical de la ola es la altura y a la que se desplazará la ola respecto a x y el tiempo transcurrido. Esta altura se mide ya sea por encima del eje central (donde y es positivo), o por debajo (donde y es negativo); Los valores de y positivos pertenecen a las crestas de la ola y los negativos a los valles, como se puede observar en la Figura 93.



Fuente: Fernández, P., 2010.

Para el cálculo del desplazamiento vertical se utiliza la ecuación (15), la cual expone que:

$$y = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{3}{64} \frac{\lambda^2 H^2}{\pi^2 h^3} \cos\left\{2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)\right\}$$

Al ingresar los valores requeridos por la fórmula tomando como ejemplo que la ola recorre una distancia en x de 50cm en cinco segundos, se obtienen los resultados expuestos en la Tabla 13.

Tabla 13
Desplazamiento en y de las olas del canal del lugar de los ensayos.

x (m)	t (seg)	y (m)
0	0	0.050
0.1	1	-0.025
0.2	2	-0.025
0.3	3	0.050
0.4	4	-0.025
0.5	5	-0.025

De la Tabla 13 se puede comprobar que efectivamente cuando la ola se encuentra en x igual a 30cm (la magnitud de la amplitud de la ola) el desplazamiento vertical será de 5cm, lo cual es la mitad de la altura de la ola total (10cm).

b. Velocidad de traslación de la ola. La velocidad de traslación de la ola o celeridad, se obtiene mediante la ecuación (6), la cual es la misma que se utiliza para el análisis en la Teoría de ondas lineal y se expresa de la siguiente manera:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} Th \frac{2\pi h}{\lambda}$$

Como ya se ha mencionado, esta ecuación varía dependiendo la profundidad de las aguas en donde se encuentran las olas, tal y como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14
Ecuaciones de celeridad según la profundidad de las aguas.

Velocidad de Traslación de la Ola, Celeridad (c)	
En aguas profundas, donde $h > \lambda/2$	$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi}$

En aguas poco profundas, donde $h < \lambda/2$

$$c = \sqrt{g(h + H)}$$

Fuente: Fernández, P., 2010.

Al analizar la relación de la profundidad de las aguas (profundidad del canal de olas de los ensayos) y la amplitud de la ola, se obtiene que:

$$40\text{cm} > 30/2\text{cm}$$

Por lo tanto se determina que las olas se encuentran en aguas profundas y para calcular la velocidad de traslación de la ola se utiliza la primera ecuación de la Tabla 14, el resultado es:

Velocidad de Traslación de la Ola (c)=	1.561	m/seg
--	-------	-------

1. Componentes horizontal y vertical de la velocidad de la partícula. Para calcular las componentes horizontal (**u**) y vertical (**v**) de velocidad de la partícula de agua, Stokes propone las ecuaciones expuestas en la Tabla 10.

Tabla 15
Ecuaciones de las componentes de la velocidad de la partícula de agua según su profundidad.

Velocidad de Traslación de la Ola, Celeridad (c)	Componente Horizontal de la Velocidad de la Partícula de Agua	Componente Vertical de la Velocidad de la Partícula de Agua
En aguas profundas, donde $h > \lambda/2$ $c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi}$	$u = \frac{\pi H}{T} \cdot e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$	$v = \frac{\pi H}{T} \cdot e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$
En aguas poco profundas, donde $h < \lambda/2$ $c = \sqrt{g(h+H)}$	$u = \frac{\lambda H}{2hT} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{3}{64} \frac{\lambda^3 H^2}{\pi^2 h^3 T} \cos\left\{2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)\right\}$	$v = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{y+H}{h} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$

Fuente: Fernández, P., 2010.

Debido a que se cuenta con aguas profundas, las ecuaciones a utilizar serían las de la primera fila de la tabla anterior. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16
Valores de las componentes de la velocidad de la partícula de agua.

x (m)	t (seg)	y (m)	Componente Horizontal (u), m/s	Componente Vertical (v), m/s
0	0	0.050	0.896	0
0.1	1	-0.025	-0.092	0.161
0.2	2	-0.025	-0.092	-0.161
0.3	3	0.050	0.896	-2.634
0.4	4	-0.025	-0.092	0.161
0.5	5	-0.025	-0.092	-0.161

2. Energía de la ola. Para calcular la energía del frente de la ola del canal de olas del lugar de los ensayos, se utiliza la ecuación (18) expuesta en el Marco Teórico de este documento; por lo tanto se obtiene que:

<i>Energía de la Ola (E)</i>	1.104 Joules
------------------------------	---------------------

3. Potencia de la ola. La potencia contenida en el frente de la ola se analiza mediante la ecuación (19), y el resultado es de:

<i>Potencia de la Ola</i> (N)=	7.290 W/m
-----------------------------------	------------------

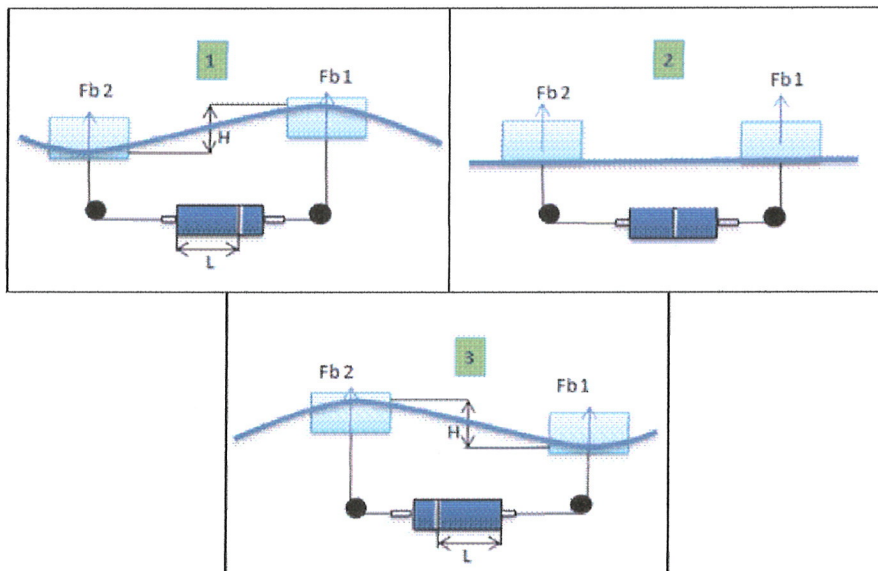
Es muy importante mencionar que la potencia de la ola no es igual a la potencia que generará el sistema; esto es debido a que el cálculo anterior es la potencia por metro de frente de ola, mientras que la potencia generada con el sistema conlleva a un análisis más detallado del mismo tomando en cuenta los componentes del sistema y la turbina a utilizar, lo cual se explicará en las secciones posteriores.

B. Análisis del Prototipo.

Para identificar los principios hidráulicos aplicados al prototipo construido se debe determinar en primera instancia cuál es su funcionamiento tanto teórico como práctico, ya que en el análisis del prototipo se busca describir los mismos mediante variables, constantes, modelos matemáticos y teorías para una mejor comprensión del sistema.

El modelo final del prototipo está compuesto de un pistón, dos poleas, dos boyas, una base de soporte para todo el sistema, mangueras, cables y un sistema de cheques. El pistón es colocado de forma horizontal, las boyas están sujetas a los dos extremos del mismo. Las olas mueven las boyas y estas a su vez le producen movimiento al pistón mediante el sistema de cables y poleas. El funcionamiento del pistón consta de tres etapas de movimiento, las cuales se muestran en la Figura 93.

Figura 92
Esquema de las etapas del funcionamiento del prototipo.



En la primera etapa, la boya 1 se encuentra en la parte alta de la ola (cresta) y la boya 2 permanece en la parte baja (valle), por lo tanto la fuerza boyante de la boya 1 será mayor a la de la boya 2 ($Fb1 > Fb2$) y existirá una altura entre cresta y valle (H).

En la segunda etapa (etapa de transición), el pistón se encuentra en su punto de equilibrio. Las fuerzas boyantes de ambas boyas son las mismas ($Fb1 = Fb2$) y la altura de ola es cero ($H=0$).

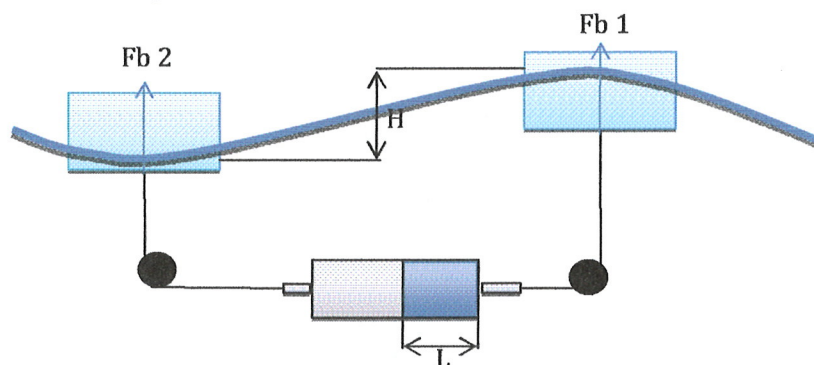
En la tercera etapa la boya 1 se encuentra en el valle de la ola y la boya 2 en la cresta, por lo tanto ocurre lo contrario de la primera etapa: la fuerza boyante de la boya 2 será mayor que la de la boya 1 ($Fb1 < Fb2$) y existirá la misma altura H entre valle y cresta que en la primera etapa.

Para motivos prácticos únicamente se analizará el análisis de la primera etapa del funcionamiento del pistón; para ello se analizará primero el funcionamiento teórico y posteriormente el práctico o el real.

1. Funcionamiento teórico.

Figura 93

Esquema del funcionamiento teórico del prototipo.



Para analizar el funcionamiento teórico se toman las siguientes suposiciones y consideraciones:

- Las dimensiones de las dos boyas son exactamente iguales.
- Las boyas permanecen en la misma posición y no se ven afectadas por el movimiento turbulento de las olas.
- Las fuerzas boyantes de cada boya son ejercidas de forma vertical debido a que permanecen en la misma posición.
- Las fuerzas boyantes son iguales a las tensiones ejercidas por los cables sujetos a las poleas.
- La longitud (L) del volumen de agua desplazado por el pistón será igual a la mitad de la altura de ola (H).
- La fricción dentro del pistón es despreciable.
- El tiempo de duración de un ciclo del pistón (t) será igual al periodo de la ola (T).
- La fricción de las poleas es despreciable.

El funcionamiento teórico o ideal, se toma en cuenta para simplificar los cálculos en el análisis del prototipo.

El objetivo de esta parte de la Teoría Hidráulica Aplicada es calcular el caudal, la velocidad inicial, las fuerzas boyantes, la fuerza y la presión ejercida por el pistón.

a. Cálculo del caudal. Para calcular el caudal del fluido que es enviado desde el pistón a las tuberías se definen los siguientes valores:

- **Diámetro interno del pistón (ϕ)**

Se determina midiendo el diámetro interno del pistón en el proceso de construcción.

Diámetro interno del pistón (ϕ)=	0.07	m
---	-------------	----------

- **Volumen de agua desplazado por el pistón (V_p)**

Se determina multiplicando el área transversal del pistón con la longitud horizontal del agua que está siendo desplazada en el interior del pistón. Primero se calcula el área transversal utilizando el diámetro interno que se determinó con anterioridad.

Área transversal del pistón (A)= $\pi\phi^2/4$ =	0.000962	m²
--	-----------------	----------------------

Para definir la longitud horizontal del agua que está siendo desplazada por el pistón (L) se asume que esta tendrá la misma magnitud que la altura de la ola (H) definida en la primera parte del programa, esto es debido a que teóricamente el agua que succionará el pistón será igual a la columna de agua formada por la diferencia de altura entre cresta y valle (Figura 26). Por lo tanto:

Altura de la Ola (H)= Longitud desplazada (L)	0.1	m
--	------------	----------

Al multiplicar el área transversal del pistón y la longitud de agua desplazada, se obtiene el volumen de agua desplazado por el pistón.

Volumen de agua desplazado por el pistón (Vp)=	9.621E-05 m3
---	---------------------

- **Tiempo de duración de un ciclo de movimiento del pistón (t)**

El tiempo de duración de un ciclo de movimiento del pistón se obtiene mediante una medición práctica realizada en los ensayos de laboratorio; teóricamente debe ser la misma magnitud que el periodo de la ola del lugar.

Tiempo de duración de un ciclo (t)=	1 seg
--	--------------

Finalmente, se obtiene la magnitud del caudal dividiendo el volumen de agua desplazado (Vp) entre el tiempo de duración de un ciclo (t), tal como se muestra en la ecuación (25) de la sección de Caudal del Marco Teórico, obteniendo el siguiente resultado:

Caudal (Q) de la tubería=	9.621E-05 m³/seg
----------------------------------	------------------------------------

b. Cálculo de la velocidad inicial. Para calcular la velocidad inicial con la que saldrá el agua del pistón se utiliza la ecuación (24), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$Q = V * A$$

Donde:

Q: caudal del fluido en la tubería.

V: velocidad del fluido.

A: área de la sección transversal de la tubería.

Tras calcular el caudal del flujo de agua que saldrá del pistón y el área de la sección transversal del mismo, la única incógnita de la ecuación de la continuidad es la velocidad con la que saldrá el fluido del pistón, por lo tanto, la ecuación (24) se transforma en:

Y se obtiene que la velocidad inicial del sistema es la siguiente:

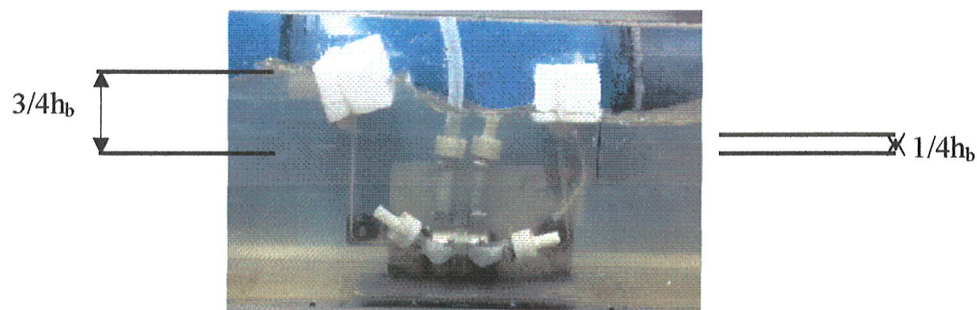
Velocidad Inicial (V_i)=	0.1	m/s
------------------------------	-----	-----

c. Cálculo de la fuerza en el pistón. Para calcular la fuerza que ejerce el pistón provocada por las fuerzas boyantes y su reacción en el sistema de cables y poleas, se definen los siguientes valores:

- **Factor experimental de altura.**

Para determinar el valor de este factor se debe medir de forma experimental la altura de la boya que se sumerge en el agua, en la Figura 27 se demuestra esta altura de forma esquemática en la porción de las boyas que se encuentran debajo de la ola. Para motivos prácticos, las boyas se fabricaron de tal medida que se permita observar a simple vista la fracción de boya que se encuentra sumergida en la ola.

Figura 94
Representación del factor experimental de altura.



Como se puede observar en la Figura 95, cada boya tendrá su factor experimental de altura, esto es debido a que las dos boyas tendrán su posición específica en las partes de la ola; una se coloca en el valle (parte baja) y otra en la cresta (parte alta), lo que implica que una estará más sumergida que la otra.

Tras diversas pruebas se determinó que los factores experimentales de altura mostrados en la Tabla 17 eran los más adecuados para el buen funcionamiento del prototipo.

Tabla 17
Factor experimental de altura de las boyas.

<i>Boya 1</i>	<i>Boya 2</i>
$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$

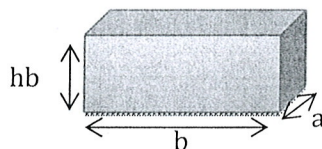
- *Volumen de agua desplazado por las boyas (Vd)*

El volumen desplazado por cada boya se calcula multiplicando el volumen de la boya por su factor experimental de altura obtenido con anterioridad. Para calcular el volumen de la boya, primero se definen sus dimensiones tal y como se expone en la Tabla 18 y la Figura 96.

Tabla 18
Dimensiones de las boyas.

hb=	0.09	m
a=	0.25	m
b=	0.095	m

Figura 95
Esquema de las boyas.



Tras multiplicar las dimensiones de la boya por su debido factor experimental de altura, se obtiene que el volumen desplazado, el cual es mostrado en la Tabla 19.

$$V_d = (hb * a * b) * \text{factor experimental de altura}$$

Tabla 19
Volumen de agua desplazado por las boyas.

	<i>Boya 1</i>	<i>Boya 2</i>
Volumen desplazado (Vd)=	0.00160 m ³	0.000534 m ³

- **Fuerzas boyantes**

Las fuerzas boyantes ejercidas por las boyas se calculan mediante el Principio de Arquímedes que viene dado por la ecuación (26), que se expresa de la siguiente manera:

$$F = mg = \rho g V_d$$

Donde:

F: fuerza de empuje hidrostático.

m: masa del objeto.

g: aceleración por la gravedad (9.810m/s²).

ρ : densidad del fluido (1000 kg/m³ para agua dulce).

V_d: volumen de agua desplazado por el objeto.

Una de las suposiciones a utilizar para lograr el buen funcionamiento del prototipo es que las fuerzas boyantes sean iguales a las tensiones ejercidas por los cables sujetos a las poleas; la tensión en los cables es la que le proporciona la fuerza al pistón y conllevan al movimiento del mismo, por lo tanto, el objetivo principal es lograr que la fuerza boyante tenga la suficiente magnitud para que el pistón tenga más

movimiento. En la ecuación (26) se observa que la fuerza boyante es directamente proporcional al volumen de agua desplazado por el objeto, lo cual indica que mientras mayor sea este volumen, mayor será la fuerza de empuje; esta es la razón principal de la existencia del factor experimental de altura que ya ha sido explicado.

Para aplicar el Principio de Arquímedes al análisis del sistema se debe utilizar el volumen de agua desplazado por cada una de las boyas, el cual ha sido calculado con anterioridad. Los resultados se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20

Fuerzas boyantes calculadas.

Fuerza Boyante 1 (Fb1)=	15.726	N
Fuerza Boyante 2 (Fb2)=	5.242	N

La fuerza ejercida por el pistón será la diferencia de la fuerza boyante ejercida por la boya 1 (Fb1) y la fuerza boyante ejercida por la boya 2 (Fb2).

Fuerza en Pistón=	10.484	N
--------------------------	---------------	----------

a. Cálculo de la presión en el pistón. La presión es una magnitud que se utiliza para determinar la fuerza ejercida en un área en específico. Para calcular la presión existente en el pistón se utiliza la ecuación (27) expuesta en la sección de Presión Hidráulica del Marco Teórico de este documento.

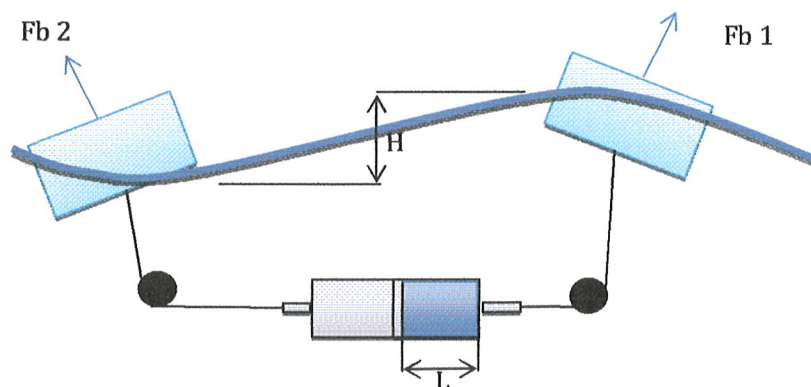
Utilizando la fuerza ejercida en el pistón calculada con anterioridad y el área transversal del pistón (0.000962115 m^2), se obtiene que:

Presión en pistón =	10897.281 N/m²
----------------------------	----------------------------------

Lo cual es equivalente a 1.58 psi expresado en el sistema inglés.

2. Funcionamiento práctico.

Figura 96
Esquema del funcionamiento práctico del prototipo.



La principal diferencia existente entre el funcionamiento teórico y el funcionamiento práctico del prototipo es la posición de las boyas; esto es debido a que, como ya se ha mencionado, en teoría se supone que éstas permanecen en una posición fija por lo que no se ven afectadas por la turbulencia de las olas. En el funcionamiento real o práctico no se cumple dicha suposición, pues el movimiento de las olas le provoca a las boyas una inclinación, la cual hace que la fuerza boyante actúe formando un ángulo con el eje vertical (Figura 97).

Sin embargo, el análisis hidráulico del funcionamiento teórico es aplicable al del funcionamiento práctico debido a que la fuerza boyante es un empuje vertical que actúa de forma perpendicular al objeto que se introduce dentro del agua independientemente de la inclinación de éste; esto significa que la fuerza de empuje será la misma.

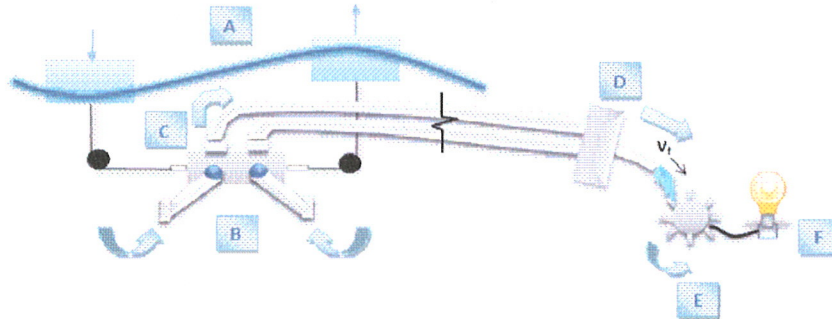
C. Análisis del sistema.

En la tercera parte de la teoría hidráulica aplicada se analiza el sistema como un todo. Un sistema, como ya se ha especificado con anterioridad, comprende lo que es: un pistón, un conjunto de boyas, poleas, cables, tuberías de succión y conducción, sistema de chequeos, una caja unificadora de caudal y la turbina a utilizar. El objetivo de analizar el funcionamiento del sistema general es obtener la velocidad de salida del caudal en la tubería tomando en cuenta las pérdidas debidas a la fricción y a los accesorios (en este caso se cuenta únicamente con una caja unificadora de caudal como accesorio).

1. Funcionamiento del sistema. El pistón es colocado de forma horizontal (Figura 98), las boyas están sujetas a los dos extremos del mismo, una de las cuales se ubica en la parte alta de la ola (cresta) y la otra en la parte baja (valle). Las boyas mueven el pistón por medio de las poleas (A). El pistón cuenta con cuatro chequeos, dos que permiten la entrada del agua (B) y dos la salida (C), por lo que el agua es bombeada mediante el movimiento del mismo y conducida con la ayuda de dos tuberías hacia una caja unificadora de caudal (D), el cual se une a otra manguera con menor diámetro para incrementar la velocidad del fluido y trasladarlo directamente hacia una turbina (E), para así lograr que con el movimiento de ella y ayuda de un generador se emita la generación de energía (F).

Cabe mencionar que la turbina estará ubicada a una altura determinada por la topografía del lugar para su instalación a escala real y por la altura piezométrica (cota de altura en la que se encontrará la turbina) obtenida en el lugar de los ensayos de laboratorio para su instalación a pequeña escala.

Figura 97
Diagrama explicativo del funcionamiento del sistema.



Para analizar el sistema se toman en cuenta las siguientes suposiciones y consideraciones:

- El fluido que recorre las tuberías tiene una densidad constante.
- La caja unificadora de caudal no le provoca una pérdida significativa al sistema.
- Las dos tuberías son exactamente iguales (mismo diámetro, misma longitud), por lo que se puede considerar que cada tubería tendrá la mitad del caudal generado por el pistón.
- La presión en la boquilla del tubo final es igual a cero debido a la presión atmosférica.
- La turbina funcionará completamente expuesta a la presión atmosférica, es decir que el recorrido del agua por el rodete de la misma tendrá presión cero.

2. Cálculo de la velocidad del agua en la salida de la tubería. La razón por la cual se calculará la velocidad del agua en la salida de la tubería es para diseñar el tipo de turbina a utilizar en el sistema, ya que la misma se diseña según la velocidad tangencial del fluido que estará en contacto con ella.

Para calcular la velocidad final del sistema se utilizará la ecuación de Bernoulli, ya que ésta describe el comportamiento de un flujo laminar que se mueve a lo largo de una corriente de agua y expresa que un fluido ideal (sin viscosidad y rozamiento) durante su circulación por un conducto cerrado posee energía constante a lo largo de su recorrido, tal y como se considerará el análisis de las tuberías para este proyecto. Como se mencionó con anterioridad, la expresión viene dada por la ecuación (28) de la sección de Ecuación de Bernoulli del Marco Teórico de este documento.

El punto de inicio del sistema se ubicará en el eje central del pistón y punto final en la boquilla de salida del fluido hacia la turbina. Para realizar un análisis del sistema mediante la ecuación de Bernoulli primero se debe identificar las variables conocidas, las cuales se enumeran a continuación.

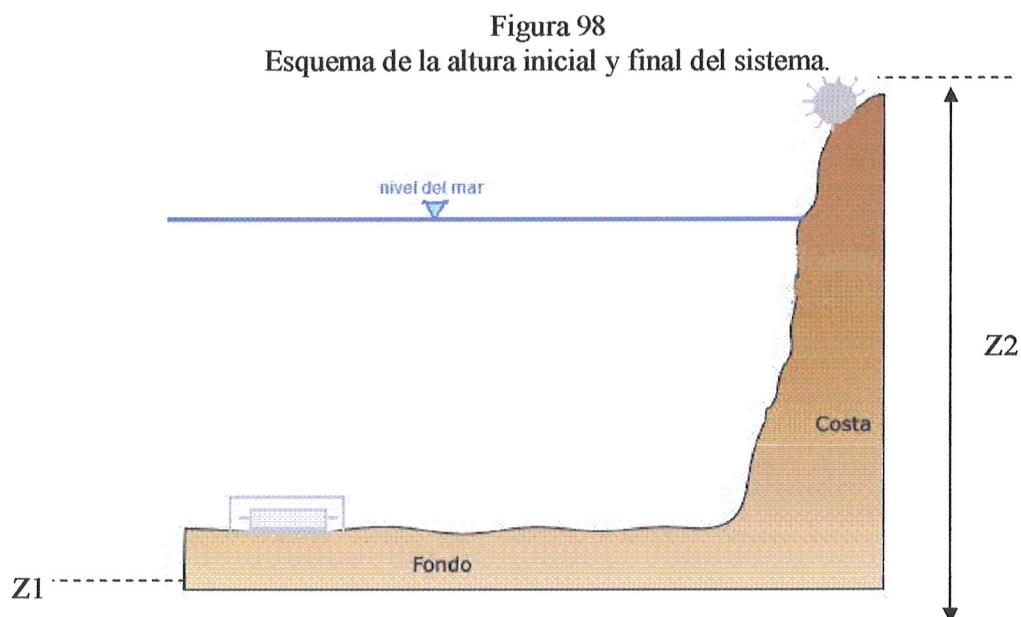
a. Velocidad inicial de la tubería (V1). La magnitud de la velocidad inicial de la tubería es determinada mediante el despeje de la velocidad en la ecuación de continuidad en una tubería, la cual se calculó en la sección de Análisis del Prototipo tomando en cuenta las dimensiones del pistón y el caudal generado por el mismo. Por lo tanto se tiene que la velocidad inicial del sistema es:

$$\text{Velocidad Inicial (V1)} = 0.1 \text{ m/s}$$

b. Presión inicial del sistema (P1). Se considera como presión inicial del sistema a la presión ejercida por el pistón, la cual se obtuvo con anterioridad al utilizar la ecuación (27), por lo tanto, se obtuvo que la presión generada por el pistón sería de:

$$\text{Presión en Pistón (P1)} = 10897.281 \text{ N/m}^2$$

c. Altura inicial del sistema (z_1). Como se especificó con anterioridad, el punto inicial del sistema se tomará a partir del eje central del pistón, siendo la superficie en donde se coloca el pistón el eje cero del sistema. Por lo tanto z_1 será la distancia entre el eje cero y el eje central del pistón. Para el prototipo a escala se obtiene que la altura inicial del sistema es de 13cm.



d. Altura de carga de una bomba (h_B). En el sistema no se incluye ninguna bomba hidráulica, por lo tanto se identifica que no habrá una carga en el sistema por parte de esta variable.

e. Presión final del sistema (P_2). La presión final del sistema es la presión que se tendrá en la boquilla de salida de la última tubería, quedando ésta expuesta a la presión atmosférica, se considera que la presión final del sistema es igual a cero.

f. Altura final del sistema (z_2). Como se puede observar en la Figura 99, se considera como altura final del sistema a la altura piezométrica que existe entre el eje cero y la boquilla de salida de la tubería, la cual estará al mismo nivel que el eje central de la turbina. Para el prototipo a escala se obtiene que la altura final del sistema es 90cm. Esta altura se determinó experimentalmente.

Como variables desconocidas se tienen: la velocidad final del sistema, las pérdidas por fricción en la tubería y las pérdidas localizadas; las cuales se calcularán en los siguientes puntos.

g. Pérdidas por fricción en la tubería. Para calcular las pérdidas por fricción en las tuberías primero se debe determinar el tipo de flujo que correrá en ellas, esta determinación se realizará mediante el cálculo del número de Reynolds, ecuación (29), utilizando como diámetro de la tubería de $\frac{3}{4}$ ", equivalente a 0.0191 m.

La viscosidad cinemática depende la temperatura a la que se verá expuesto el fluido, para determinar este valor se implementa la Tabla 8.

Para el funcionamiento del prototipo a escala se determina que la tubería estará expuesta a temperatura ambiente (20°), por lo que la viscosidad cinemática es de $1.003E-6 \text{ m}^2/\text{s}$.

Mediante dicha ecuación se obtuvo que el número de Reynolds tiene un valor de:

$$N.R. = 1,899.79$$

Por lo tanto, se considera que el flujo existente en la tubería es laminar debido a que $1,899.79 < 2,000$. Tras definir el tipo de flujo de la tubería se procede a calcular las pérdidas por fricción mediante la ecuación (30)

El coeficiente de fricción, para flujo laminar se calcula por medio de la ecuación (31), la cual expresa que:

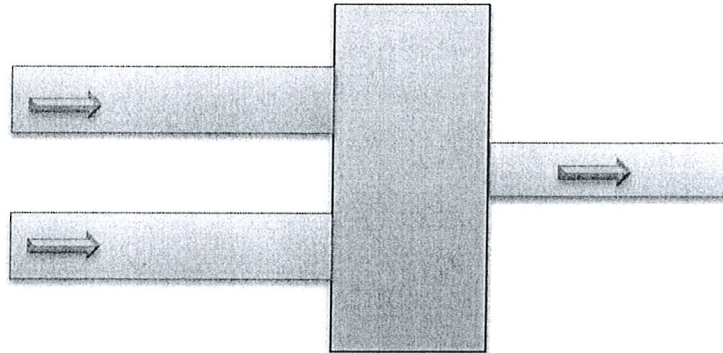
$$f = \frac{64}{N.R.}$$

Por lo tanto se obtiene que las pérdidas por fricción en la tubería serán de:

$h_f =$	0.002	m
---------	--------------	----------

h. Pérdidas localizadas en la tubería. Como la única pérdida localizada en la tubería se toma en cuenta la caja unificadora de caudal; la cual, por practicidad, se considera de la siguiente manera:

Figura 99
Diagrama del funcionamiento de la caja unificadora de caudal.



La caja unificadora de caudal se utiliza con el fin de unir dos o más caudales para luego crear un caudal constante y distribuirlo en una sola tubería. Como se mencionó anteriormente, tras asumir que la caja unificadora de caudal no provoca pérdidas significantes en la tubería, ésta se analiza de una manera más práctica y sencilla; tomando en cuenta que las dos tuberías formarán la magnitud del caudal total (calculado en la sección de Análisis del Prototipo), se puede considerar un sistema simplificado, como el que se muestra en la Figura 101, analizando únicamente una pérdida localizada por contracción súbita.

Figura 100
Diagrama simplificado de la caja unificadora de caudal.



Para realizar este cálculo, se toma en cuenta la fórmula para calcular el coeficiente k de las pérdidas localizadas por contracción súbita:

$$k = 0.42 \left[1 - \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right]^2 \right]^2$$

Al ser φ_1 el diámetro de la sección mayor y φ_2 el diámetro de la sección reducida. Para luego ingresar este valor en la fórmula para el cálculo de las pérdidas localizadas con la ecuación (33).

$$h_L = \frac{kV^2}{2g}$$

Se obtuvo como resultado que la pérdida localizada provocada por la caja unificadora de caudal efectivamente es despreciable en relación al diámetro de la tubería.

$$h_L = 0.000066 \text{ m}$$

i. Velocidad final del sistema (V2). Tras haber calculado las pérdidas por fricción y por accesorios de las tuberías, se procede al cálculo de la velocidad final del sistema, la cual se obtiene mediante el despeje de la ecuación (28) de Bernoulli.

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 + \frac{2gP_1}{\gamma} + 2g(z_1 - z_2) - 2gh_f - 2gh_L}$$

Por lo tanto, la velocidad de salida del agua de la tubería hacia la turbina será de:

$$V_2 = 2.581 \text{ m/s}$$

D. Potencia generada por el sistema.

El objetivo del proyecto es construir un prototipo a escala que transforme la energía cinética (mecánica) contenida en las olas en energía eléctrica. Para calcular la energía cinética que contienen las olas se debe realizar el estudio expuesto en la

sección de Análisis de las Olas de este documento, en el cual se define qué teoría de ondas es la que se adecúa al tipo de olas con las que se trabajará en el proyecto, esto se realiza debido a que las ecuaciones de la energía y la potencia de las olas dependen de la teoría de ondas aplicada.

La energía contenida en las olas no puede transformarse al 100% en energía eléctrica, esto es debido a que el agua que ha pasado por la turbina debe alejarse de esta y, por lo tanto, debe tener aún cierta cantidad de energía cinética, pues es imposible lograr que se quede estática después de dicha interacción.

1. Potencia teórica. Para calcular la potencia teórica generada por el sistema a escala, se utiliza la ecuación (35) expuesta en la sección de Potencia en el Marco Teórico.

En las secciones anteriores se han obtenido los valores requeridos para el cálculo de la potencia del sistema, a continuación se muestra el resultado de la potencia generada por un prototipo:

$$P = 2.643 \text{ W}$$

Sin embargo, el sistema que se utilizó para la demostración de los principios hidráulicos está compuesto por dos prototipos que se asume que funcionan de la misma manera; por lo que a partir de esta suposición, se puede definir que el valor teórico de la potencia generada por el sistema se obtiene al multiplicar el resultado obtenido anteriormente por el factor de dos, lo cual genera una nueva potencia de:

$$P = 5.285 \text{ W}$$

2. Potencia real. Para calcular la potencia real del sistema, se toma en cuenta la eficiencia de la turbina utilizada para la generación de energía eléctrica. En este proyecto se utilizó una microturbina de hélice, con la cual se considera una eficiencia de 40%; esto es debido a que la turbina utilizada fue diseñada únicamente para la conveniencia del proyecto, sin tomar consideraciones normativas de diseño.

La ecuación utilizada para el cálculo de la misma es la ecuación (36):

$$P_R = P_T \eta$$

Donde:

PT: Potencia teórica.

η : Eficiencia de la turbina utilizada

Por lo tanto se obtiene que la potencia real del sistema utilizando un prototipo es:

$$P = 1.057 \text{ W}$$

Y multiplicándola por el factor de dos:

$$P = 2.114 \text{ W}$$

Como método explicativo se realiza la comparación entre la potencia consumida por un foco LED¹ promedio de 40 mW (mili Watts, 1 W = 1000 mW) y la potencia generada por el sistema a escala (2,114.19 mW), por lo tanto se obtiene que el sistema prendería aproximadamente 53 focos LED.

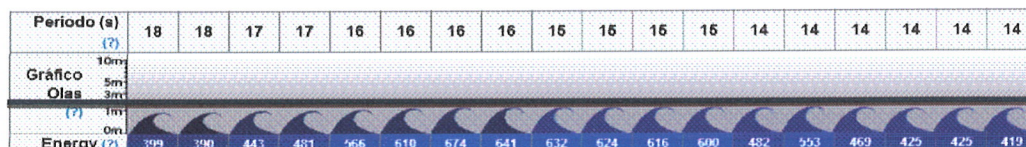
E. Potencia generada por el sistema en el lugar de instalación.

Para determinar la potencia generada por el prototipo en el lugar de instalación, se proponen los métodos siguientes:

1. Determinación de factor de conversión. El factor de conversión se define como la relación entre la potencia generada con el prototipo a escala y la altura de las olas. Para calcular la potencia generada en el lugar de instalación se determinó un factor de conversión en base a la relación que existe entre la potencia calculada con el funcionamiento del sistema a escala y la altura de las olas en el lugar. Sin embargo cabe mencionar que este es un factor teórico, debido a que se está asumiendo que el prototipo a escala es el que se instalará en otras condiciones, lo cual no es real; esto es debido a que las dimensiones del prototipo se deben adaptar a las condiciones externas a las que este se verá expuesto.

En este método se determina un factor de conversión para descubrir de forma rápida y práctica la potencia que generará el prototipo a escala instalado en el litoral del pacífico de Guatemala, en el cual se determinó que la altura de olas promedio es de 1.5m y el periodo promedio es de 15s (Figura 102 y 103).

Figura 101
Oleaje del Puerto de San José, Escuintla, Guatemala.



Fuente: Surf-forecast, 2012.

Figura 102
Oleaje de las costas del Pacífico.



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).
Boletín informativo del oleaje No. 34.

Como se mencionó con anterioridad, este factor implica determinar la relación entre la altura de las olas del canal de olas en donde se llevaron a cabo los ensayos de laboratorio del prototipo a escala, la potencia generada por este y la altura de las olas en el lugar en donde se quiere instalar dicho prototipo, por lo tanto se obtiene que la potencia viene dada por la ecuación:

$$P_i = \frac{P_e}{H_e} H_i$$

Donde:

P_i : potencia generada en el lugar de instalación.

P_e : potencia generada en los ensayos.

H_i : altura de la ola en el lugar de instalación.

H_e : altura de la ola en el lugar de los ensayos.

El factor P_e / H_e es el que se determina mediante los ensayos de laboratorio del prototipo a escala, el cual se multiplica por la altura de las olas en el lugar en el que se requiera la instalación. En la Tabla 20 se muestran los resultados tomando en cuenta la altura de ola promedio en el Litoral del Pacífico de Guatemala.

Tabla 21
Potencia generada por el prototipo a escala en el lugar de instalación.

Potencia generada por un sistema de dos prototipos:		
$P_e =$	2.114	W
Altura de ola de ensayos del prototipo a escala (H):		
$H_e =$	0.1	m
Altura de ola del lugar de instalación del prototipo a escala (H):		
$H_i =$	1.5	m
factor de altura de la ola:	21.1419	
P =	31.713	W

Como se puede observar en la Tabla 20, la potencia generada por el sistema a escala expuesto en condiciones del oleaje de las costas del Pacífico guatemaltecas es 15 veces mayor que la potencia generada en los ensayos de los laboratorios.

Cabe mencionar que un sistema a escala incluye los dos prototipos, tuberías, caja unificadora de caudal y la turbina construida para la demostración del proyecto.

Para fines explicativos se realiza el cálculo de la cantidad de sistemas a escala funcionando de forma simultánea en el Litoral del Pacífico de Guatemala que se necesitarían para generar la potencia requerida por los dos tipos de focos más utilizados en un hogar: de 25 Watts (lo equivalente a un foco ahorrador) y de 100 Watts (foco regular); dicho cálculo se realiza dividiendo la cantidad de potencia que se requiere para prender el foco, entre la potencia generada por el prototipo a escala en el lugar de instalación. En la Tabla 21 se encuentran los resultados obtenidos.

Tabla 22
Cantidad de sistemas a escala requeridos para generar la potencia necesaria requerida por dos tipos de focos.

Tipo de foco	Cantidad de sistemas a escala necesarios
25 W	1
100W	3

Al analizar los resultados se puede concluir que se necesitaría un sistema a escala (2 prototipos funcionando simultáneamente) para generar la potencia requerida por un foco de 25 W y tres sistemas (6 prototipos) para un foco de 100W.

2. Redimensionamiento del prototipo. Este método resulta ser el más exacto y apropiado debido a que el prototipo se redimensiona de acuerdo a las condiciones del lugar de instalación, tomando en cuenta factores obtenidos mediante la construcción del prototipo a escala utilizado en los ensayos de laboratorio.

El primer paso de este método es determinar los valores obtenidos en los ensayos del prototipo a escala que se necesitarán para identificar las nuevas dimensiones del prototipo, los valores se muestran en la Tabla 22.

Tabla 23
Valores tomados del prototipo a escala necesarios para redimensionarlo.

Altura de ola en los ensayos de laboratorio (H_e)=	0.1	m
Longitud del pistón a escala (L_e)=	0.12	m
Diámetro interno del pistón a escala (ϕ_e)=	0.035	m

Las condiciones del lugar de instalación de las que depende el diseño del nuevo prototipo son las siguientes:

- Altura de ola
- Periodo de la ola
- Cota de altura aproximada del lugar de instalación

Al recapitular los valores de la altura y el periodo de la ola en las costas del Pacífico de Guatemala se obtienen los valores mostrados en la Tabla 23:

Tabla 24
Datos básicos del oleaje en las costas del Pacífico de Guatemala.

Altura de ola en el lugar de instalación (H_i)=	1.5	m
Periodo de la ola en el lugar de instalación (T)=	15	Seg.

Para la determinación de la cota de altura que tendrá el nuevo sistema se realiza una aproximación de la profundidad del lugar en donde se instalará el mismo. Para efectos ideales se asumió que la cota de altura del sistema sería la siguiente:

Cota de altura neta supuesta para el sistema (H)=	100	m
---	-----	---

a. Cálculo de las dimensiones del nuevo pistón. Al efectuar el cálculo, una relación entre la altura de la ola en el lugar del ensayo del prototipo a escala, la longitud del pistón a escala y la altura de ola en el lugar de instalación se obtuvieron la siguiente ecuación:

$$L_i = \frac{L_e}{H_e} H_i$$

Donde:

L_i : longitud del pistón en el lugar de instalación.

L_e : longitud del pistón a escala.

H_i : altura de ola en el lugar de instalación.

H_e : altura de ola en los ensayos de laboratorio.

De la ecuación (38) se deduce que la longitud del pistón será igual a la multiplicación del factor (L_e/H_e) por la altura de ola en el lugar de instalación, por lo tanto mediante el cálculo de dicha ecuación, se determina que la nueva longitud del pistón será:

Longitud del nuevo pistón (L_i)=	1.8	m
--	-----	---

Para calcular el diámetro interno del pistón a utilizar en el lugar de instalación se relaciona el diámetro interno y la longitud del pistón construido a escala con la longitud del nuevo pistón calculado con anterioridad.

$$\varphi_i = \frac{\varphi_e}{L_e} L_i$$

Donde:

φ_i : diámetro del pistón en el lugar de instalación

φ_e : diámetro del pistón a escala

L_e : longitud del pistón a escala

L_i : longitud del pistón en el lugar de instalación

Por lo tanto el diámetro interno del pistón que se instalará en las costas del Pacífico guatemaltecas tendrá la siguiente magnitud.

Diámetro interno del nuevo pistón (ϕ)=	0.53	m
---	-------------	----------

b. Cálculo del nuevo caudal. Después de determinar las dimensiones del nuevo pistón se procede a calcular el caudal de la misma manera en la que se calculó en la sección de Análisis del Prototipo, utilizando la ecuación (25):

$$Q = \frac{V_p}{t}$$

Donde:

V_p : volumen de agua desplazado por el pistón.

t : tiempo de duración de un ciclo del pistón.

Como se demostró en la sección de Análisis del Prototipo, la longitud del pistón equivalente al agua desplazada por el pistón es igual a la altura de la ola, por lo tanto para obtener el volumen de agua desplazado por el pistón se debe multiplicar el área transversal del nuevo pistón por la altura de la ola en el lugar de instalación. Otra de las suposiciones expuestas en la misma sección indica que el tiempo de duración de un ciclo del pistón es igual al periodo de la ola en el lugar de instalación ($t=T$), por lo tanto se aplican las siguientes ecuaciones:

$$V_p = A H_i = \left(\frac{\pi}{4} \phi_i \right) H_i$$

$$Q = \frac{\left(\frac{\pi}{4} \phi_i \right) H_i}{T}$$

Al utilizar la ecuación (40), se determina que el caudal generado por el nuevo pistón es el que se expone a continuación:

Caudal generado por el pistón (Q)=	0.02165	m³/s
---	----------------	------------------------

c. Cálculo de la nueva potencia real generada. Tras haber obtenido el nuevo caudal se puede utilizar la ecuación (36) para calcular la potencia real generada por el nuevo caudal. Para ella también se necesitará el salto de agua del lugar de instalación (altura piezométrica) asumido al inicio de esta sección y la eficiencia de la turbina a utilizar, para ello antes se debe identificar el tipo de turbina a utilizar.

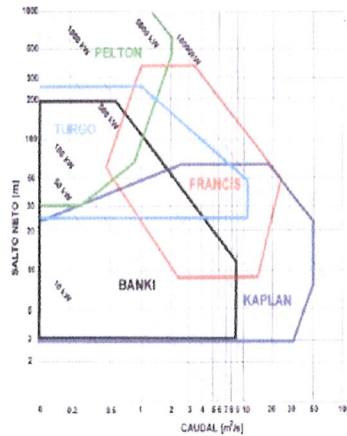
d. Determinación de turbina a utilizar. Para determinar el tipo de turbina a utilizar es necesario conocer las características de las turbinas hidráulicas más comerciales para la generación de energía mediante sistemas hidráulicos.

Con la clasificación de turbinas realizada en el Marco Teórico de este documento, se puede identificar fácilmente que la turbina que se utilizará como parte de este sistema será una turbina de acción, debido a que el agua que pasará por el rodete está expuesta a presión atmosférica y no se encuentra sumergida debajo del agua. Para identificar el tipo de turbina a utilizar se aplicará el gráfico mostrado en la Figura 104, tomando en cuenta los valores del salto de agua (altura piezométrica del lugar de instalación) y el caudal obtenido por el nuevo sistema.

Tabla 25
Valores del caudal y la altura piezométrica del nuevo sistema.

Caudal generado por el pistón (Q)=	0.021647537	m³/s
Cota de altura neta supuesta para el sistema (H)=	100	m

Figura 103
Caudal (m³/s) vs. salto de agua (m).



Fuente: Maldonado, 2005.

Como se pudo observar, en la Figura 104 se ubicaron los valores obtenidos por el nuevo sistema y se pudo comprobar que debido al caudal producido y al salto asumido en el lugar de instalación se debe utilizar una turbina de acción (PELTON, BANKI o TURGO). Para determinar cuál de estos tres tipos de turbina se debe utilizar se debe realizar un análisis de factibilidad en el cual se compare su función, eficiencia y costo; para fines prácticos, en la Tabla 25 se realiza una comparación a grandes rasgos de los tres tipos de turbinas aplicables al proyecto.

Tabla 26
Comparación entre turbinas de acción.

	PELTON	BANKI	TURGO
Función	Salto grande (30-1800m) y caudal reducido (0.02-2m ³ /s)	Salto bajo (3-200m) y caudal grande (0.02-9m ³ /s)	Salto medio (25-250m) y caudal reducido (0.02-10m ³ /s)
Eficiencia	90-97%	80-87%	87-90%
Costo*	\$300,000	\$150,000	\$300,000

*Los costos de las turbinas varían según las especificaciones de las mismas y el tipo de distribuidor.

Fuente: Adaptado de Ingeniería, Estudios y Proyectos, 1995,23.

Como se pudo observar en la Tabla 25, los tres tipos de turbinas trabajan con un caudal muy reducido, lo que varía principalmente es el salto de agua. Tomando en cuenta que el salto de agua asumido es de 100m y el caudal es de 0.022 m³/s y

analizando la eficiencia de las mismas se puede determinar que el tipo de turbina más adecuada al sistema es la turbina tipo PELTON, debido a que trabaja con un caudal reducido, salto grande y le proporciona al sistema más eficiencia, lo cual, a largo plazo es lo que definirá la productividad que tendrá el mismo. La turbina tipo PELTON tiene un rango de eficiencia de 90-97%, para efectos de análisis, en este proyecto se utilizará la eficiencia de 90% y así, de esta manera, calcular la potencia con la eficiencia más crítica.

Cabe mencionar que la elección del tipo de turbina a utilizar depende de factores más específicos sobre la magnitud del proyecto, la infraestructura, las horas de trabajo y la productividad que tendrá el sistema en general.

2. *Potencia real.* La potencia real del sistema tomando en cuenta la eficiencia de la turbina seleccionada se calcula mediante la ecuación (36) obteniendo un resultado de:

$$P = 19,494.86 \text{ W}$$

Lo cual es equivalente a 19.495 kW.

3. *Productividad mensual del sistema.* Este valor viene dado por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Productividad mensual del sistema} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \right) \\ = P * \text{Cantidad de horas que trabajará la turbina al mes} \end{aligned}$$

Donde: P: potencia real generada por el sistema.

Para calcular la cantidad de horas que trabajará la turbina al mes se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Cant. de horas de trabajo de la turbina} = (24\text{hrs} * 30\text{días al mes})$$

Como se puede observar en la ecuación anterior, se asume que la turbina trabajará 24 horas del día los siete días de la semana (720 horas). Por lo tanto la productividad mensual del sistema es de:

P=	14,036.30	kWh/mes
----	-----------	---------

- *Viviendas beneficiadas al mes con la instalación de un prototipo.*

Para calcular la cantidad de viviendas que se verán beneficiadas al mes con la instalación de un prototipo en el Litoral del Pacífico, es necesario calcular cuanta energía al mes consume una vivienda unifamiliar promedio, para ello se realizó la Tabla 26.

Tabla 27
Energía consumida mensualmente por una vivienda unifamiliar promedio.

Artefacto eléctrico	Potencia		Cantidad de artefactos	Horas de consumo diario	Días al mes	Consumo mensual de energía (kWh)
	W	kW				
Foco incandescente de 100W*	100	0.1	5	4	30	60
Foco ahorrador de 20W**	20	0.02	2	2	30	2.4
Refrigeradora***	350	0.35	1	8	30	84
Horno microondas	1200	1.2	1	0.083	30	3
Licuada	300	0.3	1	0.083	15	0.375
Plancha eléctrica	1000	1	1	0.5	4	2
Secadora de cabello	1200	1.2	1	0.083	30	3
Televisor (21")	200	0.2	2	2	20	16
Computadora	200	0.2	1	2	20	8
Equipo de sonido	120	0.12	1	0.5	15	0.9
Ventilador de techo	500	0.5	2	8	30	240
TOTAL DE CONSUMO MENSUAL DE ENERGÍA						420

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Gobierno de Perú. 2009.

*Se asume un foco por ambiente de la vivienda (sala, comedor, cocina y dos habitaciones)

**Se considera un foco por baño

***El tiempo neto de consumo de una refrigeradora en condiciones normales es de 6 a 8 horas diarias, ya que a pesar de estar enchufada las 24 horas del día, dependiendo del uso que se le dé, solo consumen energía por momentos.

Al dividir la productividad mensual del sistema instalado entre el total de consumo mensual de energía en una vivienda unifamiliar promedio se obtiene la cantidad de casas que se verán beneficiadas con la instalación de un prototipo a escala real. Por lo tanto, se obtiene que el prototipo satisface los requerimientos energéticos de 33 viviendas unifamiliares promedio.

4. Productividad mensual del sistema instalando 15 prototipos. En los análisis anteriores únicamente se han mostrado los resultados de lo que sería la instalación de un prototipo a escala real en el Litoral del Pacífico de Guatemala; sin embargo, para que el proyecto sea rentable se deben estudiar alternativas para incrementar la producción de energía del sistema. Para ello se propone aumentar la cantidad de pistones instalados sin aumentar la cantidad de turbinas o cajas unificadoras de caudal; esto quiere decir que todos los pistones irán conectados a la caja unificadora de caudal mediante sus respectivas tuberías, asimismo, de la caja unificadora de caudal saldrá otra tubería que se dirigirá hacia la turbina. Al aumentar el número de pistones se aumentará el caudal que llegará a la turbina, lo cual le permitirá a esta trabajar de una forma más eficiente y generar más potencia.

Para llevar a cabo este nuevo análisis se toman en cuenta las siguientes suposiciones:

- Todos los pistones son exactamente iguales en cuanto a dimensiones y funcionamiento.
- Las tuberías conectadas a cada pistón son del mismo material, tienen el mismo diámetro y la misma longitud.
- Los pistones son colocados de forma paralela y no en serie.
- Se utiliza la misma turbina (tipo PELTON, eficiencia crítica: 90%).

En el nuevo análisis se propone la instalación de 15 prototipos, aplicando las suposiciones expuestas con anterioridad se puede asumir que el caudal total que llegará a la turbina debido al conjunto de prototipos será igual a la suma del caudal de cada uno de ellos, por lo tanto se calcula el nuevo caudal al sumar 15 veces el caudal

calculado para un prototipo a escala real (Tabla 20), por lo que se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{15}$$

Donde Q_n es igual al caudal del pistón n.

El caudal total suministrado por los 15 prototipos es:

Q total=	0.325	m³/s
-----------------	--------------	------------------------

Tras calcular el caudal se procede a determinar la nueva potencia generada por el sistema, para ello se utiliza la misma cota de altura que se aplicó en los cálculos de la sección anterior (Tabla 20), utilizando la ecuación (36) se obtiene que la nueva potencia es de:

P=	292,422.938	W
P=	0.292	MW

Se proporciona la potencia en MW (mega watts) debido a que la potencia producida mediante un recurso renovable y no renovable se mide en dichas dimensionales, tanto en el mercado de energía eléctrica de Guatemala como en el resto del mundo.

Para obtener la nueva productividad mensual del sistema se utiliza la ecuación (37), asumiendo que la cantidad de horas trabajadas de la turbina es de 720 horas, por lo tanto se obtiene que:

P=	210,544.52	kWh/mes
-----------	-------------------	----------------

A manera de conclusión se estima que el nuevo sistema compuesto por 15 prototipos satisface los requerimientos energéticos de 501 viviendas unifamiliares promedio (Tabla 22).

IX. DEMOSTRACIÓN

DEL PRINCIPIO HIDRÁULICO.

Para determinar todas las teorías y principios hidráulicos del estudio de las olas, el análisis del funcionamiento del prototipo y del sistema, fue indispensable realizar los ensayos prácticos, los cuales proporcionaban datos de importancia durante la formulación de los cálculos realizados con anterioridad. Dichos ensayos se llevaron a cabo en el canal hidráulico del Laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala. Entre una de las múltiples funciones de dicho canal se encuentra la generación de olas a partir de una placa con ángulo de inclinación variante, la cual a partir de su movimiento desarrolla una propagación de ondas en el agua del estanque provocando las olas. En esta sección se encontrarán los datos más relevantes obtenidos en los ensayos prácticos que se utilizaron para llevar a cabo los cálculos realizados.

- **Ensayos de laboratorio.**

Como se mostró en la sección de Teoría Hidráulica Aplicada, el punto de inicio del análisis del sistema es el estudio del comportamiento de las olas del lugar en donde se instalará el prototipo, esto es debido a que el diseño del mismo depende de las características de las olas a las que se verá expuesto. Para ello se realizó un primer ensayo de laboratorio en el canal de olas mencionado anteriormente; el objetivo del primer ensayo fue tomar las mediciones correspondientes a las olas para las cuales se iba a diseñar el prototipo.

Las características más importantes de las olas a considerar para el análisis del prototipo son las siguientes:

- Altura de la ola (H) – Medida desde el punto más bajo (valle), hasta el punto más alto de la ola (cresta).

- Periodo de la ola (T) – Tiempo de un ciclo de ola (tiempo que se tarda una onda en llegar al mismo lugar).
- Profundidad (h) – Profundidad del canal de olas.
- Longitud del frente de la ola (b) – Ancho del canal de olas del laboratorio.

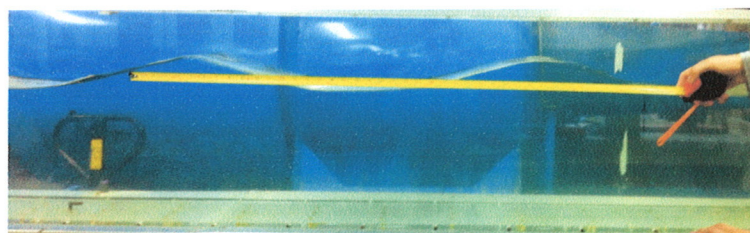
Los datos que se obtuvieron fueron los siguientes:

Tabla 28
Mediciones de las olas y el canal de olas.

<i>Altura de la ola (H)</i>	0.1	m
<i>Amplitud de la ola (λ)</i>	0.3	m
<i>Periodo de la ola (T)</i>	1	seg
<i>Profundidad (h)</i>	0.4	m
<i>Longitud de frente de la ola (b)</i>	0.3	m

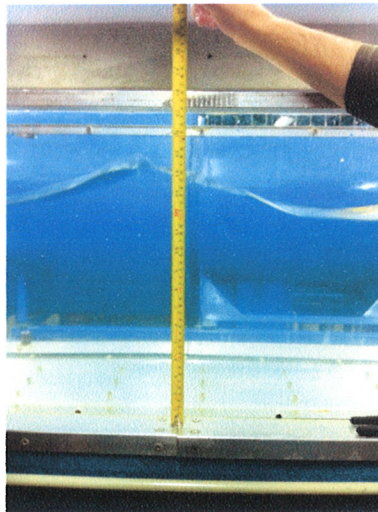
Debido a que las olas no se encuentran estáticas en ningún momento y no se puede tomar una medición exacta para la altura de ola y la amplitud (Figura 105), se realizaron cinco pruebas y al final se promediaron para obtener los valores a utilizar. Para medir el periodo de la ola se colocó una marca de referencia y requirió el uso de un cronómetro para calcular el tiempo que se tardaba una ola en regresar a la misma posición.

Figura 104
Determinación de la amplitud de las olas experimentalmente.



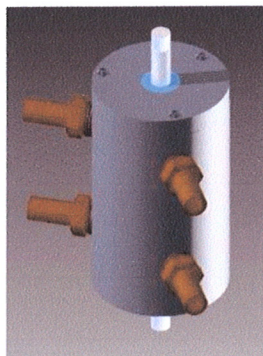
Al observar el comportamiento del oleaje del canal, se determinó que efectivamente el mismo no contaba con un movimiento perfectamente lineal, ya que la frecuencia de las ondas era irregular.

Figura 105
Determinación de la altura de las olas experimentalmente.



Tras tomar las mediciones de las olas y el canal de olas en donde se instalaría el prototipo a escala, se procedió al diseño del mismo (Figura 107) y a su construcción.

Figura 106
Diseño del prototipo



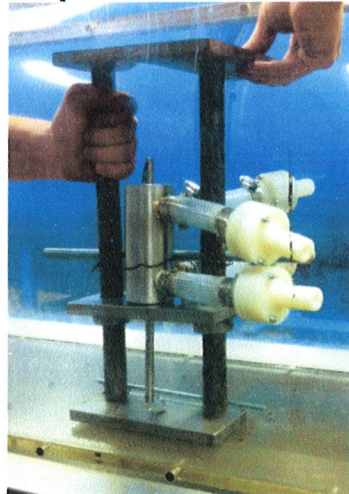
Al tener el prototipo construido, se ensayó el mismo en un estanque para comprobar su buen funcionamiento (Figura 108). Luego se determinó que el prototipo se instalaría de forma vertical, por lo que se construyó una base para que lo sostuviera en dicha forma; sin embargo, al instalarlo dentro del canal se encontraron dos inconvenientes:

- El prototipo era muy largo y la profundidad del canal no le era suficiente para realizar los movimientos para los que fue diseñado de forma eficiente.
- La base no se construyó apropiadamente debido a que no se logró un equilibrio en el centro de masa de la misma, por lo que el prototipo no se mantuvo en una forma fija cuando se le ejerció la fuerza provocada por el movimiento de las olas.

Figura 107
Comprobación del funcionamiento del prototipo.

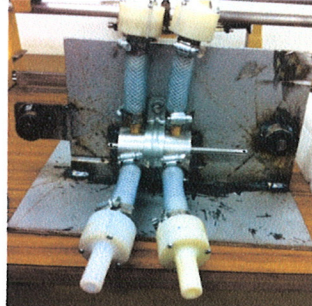


Figura 108
Prototipo instalado verticalmente.



Al analizar los inconvenientes mencionados con anterioridad, se prosiguió a la instalación de una nueva base para instalar el prototipo de forma horizontal y así, de esta manera, lograr que el pistón se pudiera mover libremente a lo largo del canal.

Figura 109
Prototipo adecuado a la base horizontal.



Al tener el prototipo instalado en el canal con su base horizontal se prosiguió a la selección de las boyas a utilizar en el sistema. Se ensayó el sistema con dos tipos de boyas, las primeras con un área grande (Figura 111) y otras con un área más reducida (Figura 112).

Figura 110
Ensayo con boyas pequeñas.

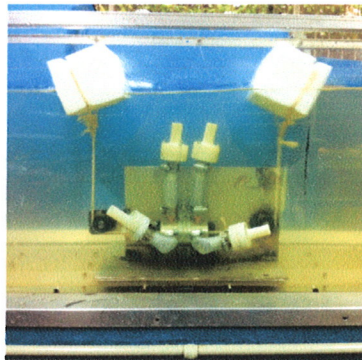
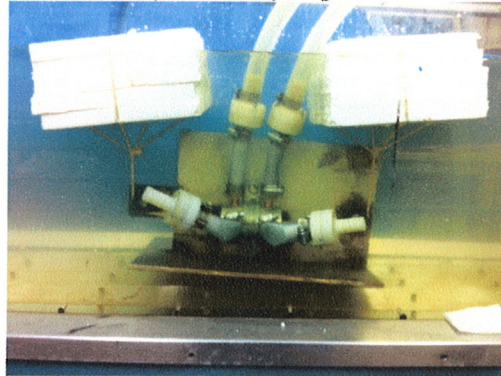


Figura 111
Ensayo con boyas grandes.

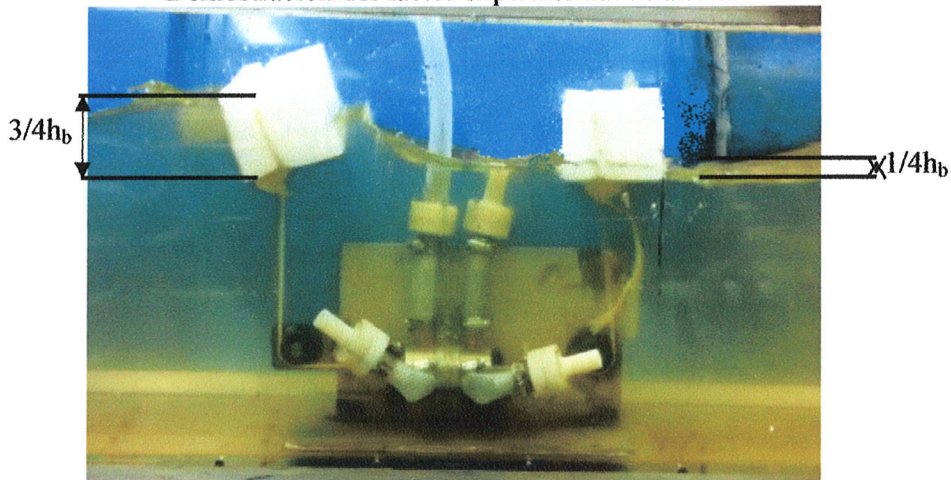


En las Figuras 111 y 112 se puede comprobar el comportamiento real de las boyas descrito en el inciso de *Funcionamiento Práctico* de la sección de Análisis del Prototipo, así como también se comprobó que a mayor área de las boyas mayores serán las fuerzas boyantes que ejercerán estas sobre el sistema.

Tras ensayar el sistema con los dos tipos de boyas se determinó que funcionaba mejor con las boyas con menores dimensiones, ya que el pistón se movía de forma más rápida y eficiente; a diferencia de las boyas grandes, con las cuales el pistón ejercía más fuerza sobre el fluido pero presentaba un movimiento más lento y un bombeo pausado e incluso, las fuerzas boyantes eran tan grandes que levantaban la base del prototipo (Figura 112). Por lo tanto, se optaron las boyas pequeñas.

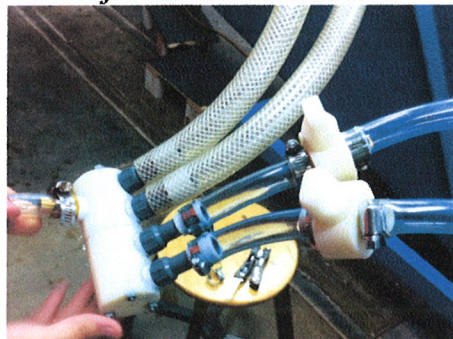
Tras determinar las dimensiones de las boyas se identificaron los factores experimentales de altura descritos en el inciso de *Funcionamiento Teórico* de la sección de Análisis del Prototipo, los cuales se muestran gráficamente en la Figura 113.

Figura 112
Demostración del factor experimental de altura.



Tras definir las boya a utilizar en el sistema, se instalan las tuberías a utilizar para conducir el agua bombeada por el pistón. Estas tuberías poseen un coeficiente de fricción despreciable, tal y como se observó en la sección de Análisis del Sistema. Las pérdidas localizadas en el sistema se denotan a partir de la caja unificadora de caudal, cuyos cálculos y función se determinaron igualmente en la sección de Análisis del Sistema.

Figura 113
Caja unificadora de caudal.



Tras realizar el último ensayo se determinó el caudal de salida de forma experimental mediante la utilización de un beaker de 500mL (0.0005m^3) y un cronómetro. Como se observó en el Marco Teórico de este documento, con la ecuación (25) se puede determinar el caudal dividiendo el volumen de agua en un

recipiente, entre el tiempo en el cual se llenó dicho recipiente; para calcular el caudal experimental se realizaron 5 mediciones, las cuales se muestran en la Tabla 28.

Tabla 2
Cálculo del caudal práctico.

Ensayo	Volumen conocido (m ³)	Tiempo (seg)	Caudal (m ³ /seg)
1	0.0005	3.8	0.000131579
2	0.0005	2.7	0.000185185
3	0.0005	3.2	0.00015625
4	0.0005	3.2	0.00015625
5	0.0005	3.2	0.00015625

Caudal Práctico Promedio: 0.000157103
--

Ya que el caudal teórico equivale a un prototipo en funcionamiento, se multiplica por un factor de dos para obtener el caudal formado por los dos prototipos que fueron ensayados de forma simultánea en las pruebas de laboratorio, por lo tanto, se obtiene que el nuevo caudal teórico será de 0.0001924 m³/seg. Tomando en cuenta el caudal teórico y el práctico se determinó que existe un porcentaje de error de 18.35%

X. RECURSOS MARINOS Y COSTEROS EN EL PACÍFICO DE GUATEMALA.

Para implementar un prototipo por medio de energía undimotriz se analizó una ubicación ideal donde se evaluó aspectos generales que existen en la costa del Pacífico guatemalteco, como lo son: la delimitación, tipos de pesca, contaminación, manglares, anidación de tortugas y principales áreas protegidas.

A. Delimitación y zonificación de la zona costera.

En la región del Pacífico la línea costera de Guatemala comprende alrededor de 255km y esta se extiende en la zona económica exclusiva hasta unas 200 millas náuticas, abarcando alrededor de unos 83,000km². El litoral Pacífico de Guatemala está conformado por barras arenosas las cuales se ubican paralelas a la costa, atrás de estos se han desarrollado canales y estuarios parcialmente permanentes. (Arrivillaga, 2003) Con esto se evaluó que Guatemala presenta una amplia costa en el Pacífico para la implementación del prototipo.

Guatemala está conformada por una plataforma continental, la cual consta desde la línea costera hasta 200m de profundidad. Esta plataforma continental está compuesta en su mayoría por arcillas, limos y arenas, tiene un ancho promedio de 60km y su profundidad está compuesta por zonas muy poco accidentadas. El fondo está comúnmente compuesto por barros cerca de las áreas a México y El Salvador, la geografía accidentada se presenta de un 10 a 15% con fondos rocosos. En las costas de Champerico y de Río Paz se presentan parches con fondos duros. (Arrivillaga, 2003) Con fondos marinos en su mayoría bastante planos nos beneficia en el proceso de instalación, ya que facilita este proceso, al no tener irregularidades en el suelo marino.

Dos corrientes influyen en las costas del pacífico de Guatemala, la de California con orientación sur y la Ecuatorial con orientación norte. La concentración de estos

bosques de manglares se encuentran principalmente en Champerico, Ocós y las Lisas. Los poblados que tienen mucha influencia en la zona costera mencionados de oeste a este son, Ocós, Champerico, Tilapa, Sipacate, Puerto San José, Iztapa, Monterrico y las Lisas. (Arrivillaga, 2003)

B. Estado de los ecosistemas de la zona costera de Guatemala.

Según (Arrivillaga, 2003), «La zona costera de Guatemala alberga gran variedad de ecosistemas marinos: arrecifes de coral, pastos marinos, humedales y manglares, estuarios, marismas, bosques aluviales o pantanos, lagos y lagunas costeras, desembocaduras de ríos, dunas y playas, salinas arrecifes y el litoral marino rocoso.» Los ecosistemas presentes en Guatemala ayudan a que se desarrollen actividades económicas como los son la pesca, servicio portuario y la acuicultura, sociales con el turismo y ecológicas con la protección de la línea costera y estabilización de sedimentos.

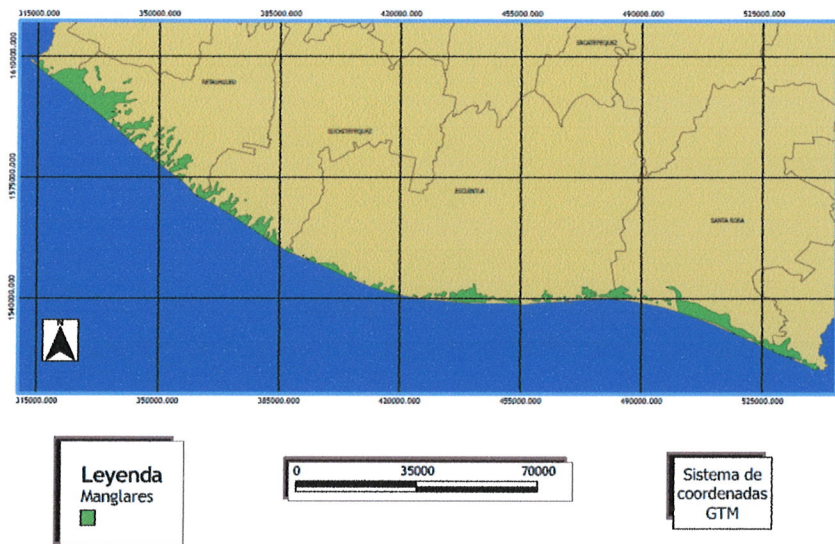
1. Manglares. Son un conjunto de especies de árboles muy tolerantes a la sal crecen en la zona intermareal en latitudes tropicales de la tierra, con capacidad de refugio a especies terrestres y acuáticas. Según Arrivillaga «para el 2003 el bosque manglar ocupaba alrededor de 20,615 ha, localizándose de manera fragmentada en los departamentos de Retalhuleu, Escuintla, Santa Rosa y Jutiapa principalmente.»

En Guatemala las especies de manglares existentes son los manglares negro, rojo, blanco y el botoncillo, creciendo en regiones de suelos blandos ya sea arenas, arcillas o limos. La distribución de los manglares en la zona costera es así: para el rojo en áreas de influencia de mareas, presentando salinidad similar a la del mar. El blanco en áreas menos compactadas con influencia de agua dulce, cerca de las orillas de estuarios, canales y en los bosques internos de los manglares. El negro presenta una alta tolerancia a la salinidad, también se ubica a orillas de los estuarios y en los bosques internos de los manglares. Por últimos el botoncillo se ubica en la zona de transición manglar a bosque seco. (Arrivillaga, 2003)

A continuación se muestra el mapa de la distribución de los manglares en los años 2006-2007 en el Pacífico de Guatemala.

Figura 114

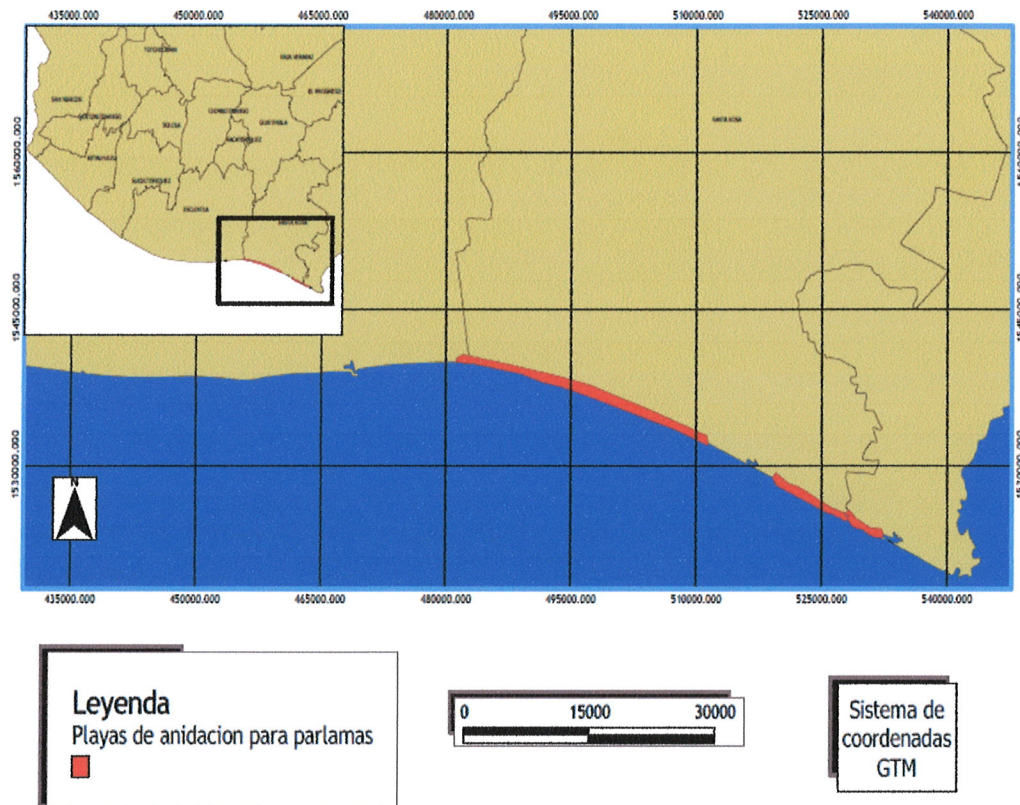
Manglares.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

2. Importancia ecológica y ambiental del ecosistema de las tortugas marinas. Frecuentemente en el Pacífico desovan tortugas marinas entre las especies están la parlama, tortuga carey y la baula. De junio a noviembre la parlama anida, a lo largo del litoral pacífico la tortuga carey anida de junio a octubre y la baula de enero a marzo. La tortuga verde o negra del pacífico se introduce en el estero de Poza Laguna del Nance en el parque nacional Sipacate-Naranjo, aunque sin desovar. (Arrivillaga, 2003). En la figura de playas de anidación parlamas se puede observar que la región sureste del país en los departamentos de Santa Rosa, Escuintla y Jutiapa se encuentran áreas de anidación de las parlamas.

Figura 115
Playas de anidación parlamas.



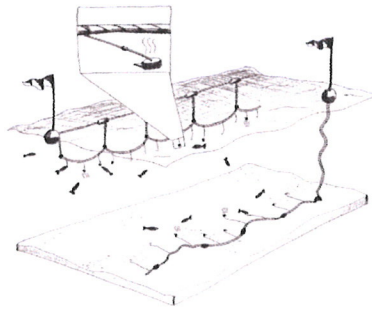
Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

3. Los recursos pesqueros.

a. Pesca con palangre.

Consta de una cuerda principal larga con anzuelos sujetos a ciertas distancias utilizando carnadas en los anzuelos para la captura de peces. Existen varios tipos de diseños dependiendo la necesidad, al igual que de tamaño, grosor, material, carnada y anzuelos. (FAO, 2013)

Figura 116
Detalle pesca con palangre



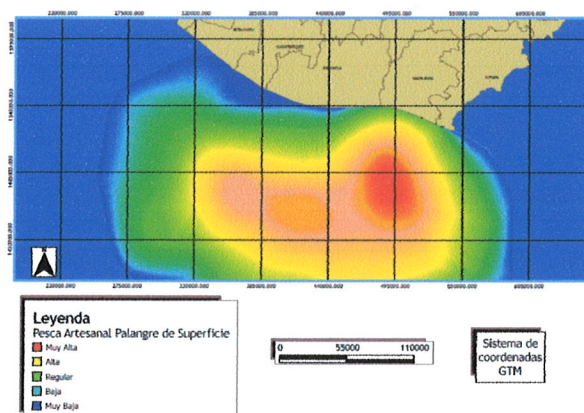
Fuente: (FAO, 2013)

En la figura pesca con palangre se muestra como se ubican los palangres, en la posición de arriba llamado calado pelágico y el de abajo calado de fondo.

Según (FAO, 2013) «*Los palangres pelágicos (de deriva) usualmente se usan para capturar especies como atún, pez espada y salmón, mientras que los palangres anclados al fondo se usan para especies demersales como pargos, bacalaos, eglefinos, hipoglosos, marucas, brosmios, merluzas y austromerluzas*».

A continuación se puede observar cómo es la densidad de pesca en la zona del Pacífico de Guatemala, en donde podemos determinar que en la región frente a Santa Rosa se da la mayor cantidad de pesca de palangre de superficie.

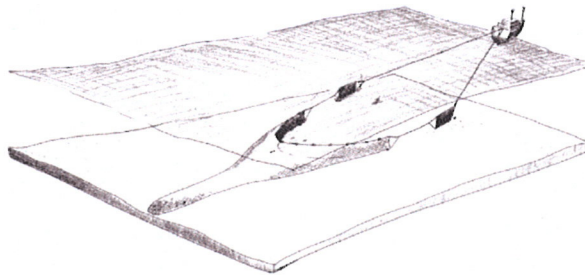
Figura 116
Pesca artesanal palangre de superficie.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

b. Pesca de arrastre industrial. Este tipo de pesca consiste en arrastrar redes de malla para capturar cualquier tipo de especie que esté al alcance. Existen el arrastre con puertas, arrastre de viga y el arrastre en pares y la mayoría de veces se operan en el fondo para capturar especies variadas. También se desarrolla el arrastre en zonas pelágicas o de agua a media altura entre la superficie y el lecho marino. Según (FAO, 2013) «Los arrastres pelágicos se usan en las pesquerías para diversas especies pelágicas objeto de la pesca, como arenque, caballa, jurel, bacaladilla y colín».

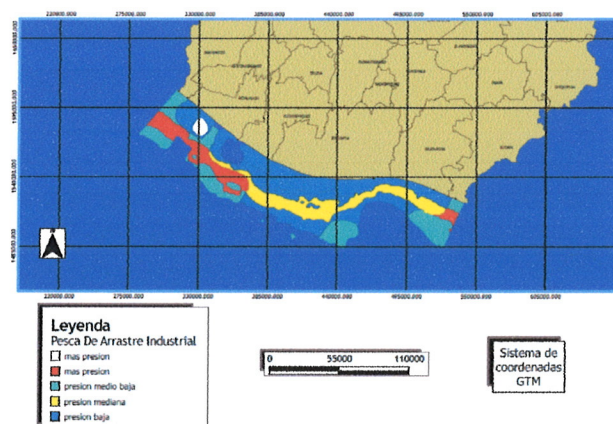
Figura 117
Detalle pesca arrastre industrial.



Fuente: (FAO, 2013)

En Guatemala el desarrollo de este tipo de pesca es más frecuente frente a las costas de Retalhuleu y Suchitepéquez donde podemos notar su alto nivel de pesca en esa región.

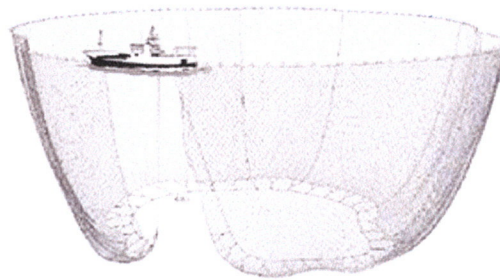
Figura 118
Pesca de arrastre industrial.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

Pesca red de cerco. Este estilo de pesca se utiliza para la captura de cardúmenes de peces en aguas cercanas a la superficie, es una red de malla pequeña sellada en el inferior para evitar que se escapen los peces. Esta red es operada por un buque que puede variar su tamaño según las características de la pesca. (FAO, 2013) Entre los tipos de especies que se pescan son el atún, sardina, achoveta entre otros.

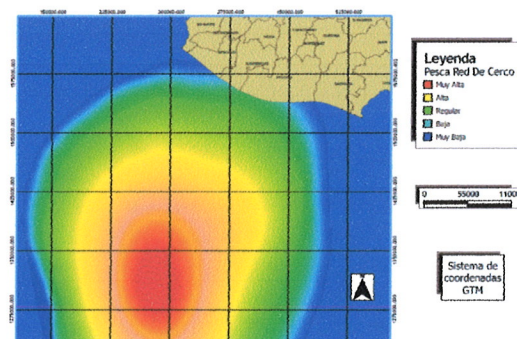
Figura 119
Detalle pesca red cerco.



Fuente: (FAO, 2013)

Se puede notar que cercano a las costas de Guatemala la pesca de cerco no es muy frecuente siendo relativamente baja, como lo muestra en la figura de la pesca red de cerco.

Figura 120
Pesca red de cerco



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

Tabla 3
Especies comerciales pacífico.

Peces		
Albacora	Cherna	Pargo
Aleta	Corvina	PezEspada
Atún	Dorado	PezSapo
Anguila	Guavina	Quinoga
AtúnPatudo u Ojudo	Jurel	Róbalo
AtúnAletaAmarilla	Lenguado	Ronco
AtúnListado	Lisa	Sardina
Bagre	Manta Raya	Sierra
Bonito	Marlin	Tacazonte
Barbudo	Mero	Tiburón
Barracuda	Mojara	Salmonete
Berrugata	Palometa	

Crustáceos		
Camarón blanco	Camarón chupaflor	Cucaracha marina
Camarón camelloón	Camarón rojo	Jaiba
Camarón Café	Camarón tigre	Langosta
Camarón siete barbas	Cangrejo	Langostino chileno

Moluscos	
Caracol	CalamarGigante
CalamarDardo	Ostra

Fuente: (Arrivillaga, 2003)

Tabla 4
Resumen flotas litoral Pacífico.

Recurso/Flota	Número de embarcaciones	
	Gran escala	Mediana escala
Camarón	48	18
Peces	19	25
Túnicos	4	-
Langostinos	-	2
Total	71	45

Fuente: (Arrivillaga, 2003)

d. Camarones. El camarón es uno de los recursos más aprovechados en la industria pesquera iniciando la explotación de este producto a partir de 1957. En la costa del Pacífico se encuentran cinco especies con interés comercial que son: el camarón azul, camarón blanco, camarón café, chacalín y camarón rojo. Estas especies se encuentran ubicadas en las isobatas de 0m-70m de profundidad, mayormente distribuidas hasta los 50m de profundidad. En la frontera de México se localizan la mayor abundancia de estas especies, partiendo del puerto de Champerico. Durante los meses de septiembre a febrero se han registrado las mayores abundancias debido a las capturas anuales de este recurso. (Arrivillaga, 2003)

Las comunidades de Buena Vista, Champerico, El Chapetón, El Ahumado, El Paredón, Puerto San José, El Pumpo, Sipacate, Tilapa, El Garitón, El Hawaii, Las Lisas y Monterrico son las principales en la costa del Pacífico que se dedican a la pesca artesanal de camarón. En el canal de Chiquimulilla se utilizan embarcaciones de madera de alrededor de unos 15 ft de eslora con una propulsión manual mediante un remo, en algunos casos se utiliza un motor de unos 20 HP. En aguas marítimas las embarcaciones utilizadas son de madera y fibra de vidrio de hasta 25ft de eslora, estas utilizan un motor de unos 75HP. El producto recolectado no tiene ningún tipo de tratamiento de preservación. (Arrivillaga, 2003)

e. Tiburones. Se desarrolla en su mayoría una pesca tipo artesanal con embarcaciones tipo panga con motores ubicados fuera de borda. La especie más abundante que sostiene la pesquería es el tiburón gris, con los índices mayores durante los meses de febrero y agosto, aunque son frecuentes las capturas durante todo el año. Usualmente los rangos de tamaño explotados son de alrededor de unos 45 – 235 cm de longitud, incluyendo especies juveniles siendo capturados en las costas de Puerto San José y Buena Vista y de recién nacidos en el Puerto de Champerico. (Arrivillaga, 2003)

e. Sardina. Las embarcaciones para la pesca de la sardina son de tipo bolichera o red de cerco. Cerca del Puerto San José y Champerico se encuentran las principales áreas de concentración de la sardina, la profundidad en la que se encuentran oscila entre los 20 – 30 m de profundidad a una distancia de la costa de 2 – 10 millas náuticas. (Arrivillaga, 2003)

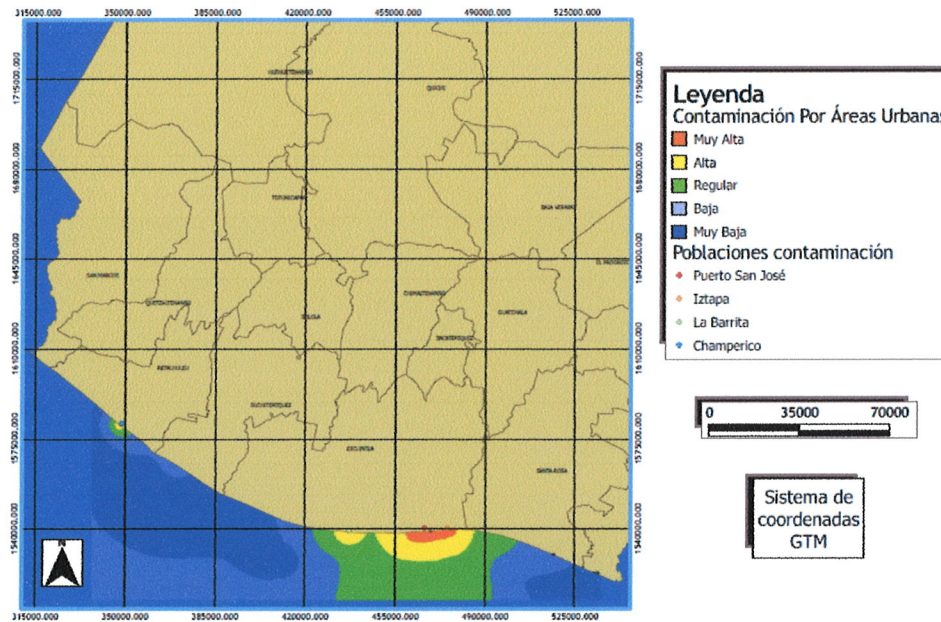
C. Presiones sobre los ecosistemas marinos y costeros.

1. Contaminación ambiental. Según el ministerio de agricultura ganadería y alimentación (MAGA) y la oficina de recursos hídricos, la mayoría de los ríos en la vertiente del Pacífico se encuentran altamente contaminados debido a desechos por la agricultura, actividad agroindustrial y desechos urbanos. Estos ríos alimentan zonas estuarinas que a su vez ubican bosques de manglar. Los desechos y otras sustancias en el agua, ayudan al crecimiento de las plantas causando cambios en la composición y aumento de especies marinas en los estuarios. (Arrivillaga, 2003)

En tierras altas la actividad agrícola y la deforestación afectan características de los sedimentos y escorrentía en la zona, lo cual provoca un aumento en sedimentos en los estuarios. Un ejemplo es el canal de Chiquimulilla el cual fue creado a partir de la unión de varios esteros y lagunas costeras, este presenta azolvamiento en varios puntos a lo largo de su curso debido al acumulamiento de material sedimentario proveniente de zonas de tierras altas. (Arrivillaga, 2003)

Según la figura de contaminación por áreas urbanas del Análisis de vacíos y omisiones para el pacífico de Guatemala, se puede notar que se manifiesta una alta contaminación debido a las áreas urbanas como el puerto San José en el departamento de Escuintla, dicha cercanía puede provocar daños al prototipo al alterar su funcionamiento y a la vez aumentar el mantenimiento mientras que en regiones como Suchitepéquez se observa una baja contaminación urbana.

Figura 121
Contaminación por áreas urbanas.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

2. Seguridad portuaria. Guatemala tiene actualmente cinco puertos marítimos: Santo Tomás de Castilla, Puerto Quetzal y el nuevo puerto de Champerico que son los más modernos y Puerto Barrios y San José que son los más antiguos. Los puertos ubicados en la zona del Pacífico son Puerto Quetzal, San José y Champerico. Muelles tipo espigón se caracterizan en los puertos antiguos y en los modernos son de tipo marginal. Puerto Quetzal está conformado por una dársena artificial la cual está protegida por rompeolas, el acceso es mediante un canal de 210m de ancho entre las rompeolas y de 340m a la entrada de la dársena. Los puertos de San José y Champerico se caracterizan por una rada abierta con fondeaderos lejos de los muelles. La profundidad del canal de acceso a Puerto Quetzal es de 12m, en la dársena el área de maniobras tiene una profundidad de 12m y el muelle cuenta con 11m de profundidad. (Arrivillaga, 2003)

Figura 122
Principales puertos.



Fuente: (Discovery, 2013)

D. Principales respuestas para la gestión de los ecosistemas marinos y costeros.

Actualmente existen seis áreas protegidas en la zona del Pacífico de Guatemala que pretende promover la protección de los ecosistemas marinos y costeros en el país. La costa consta de distintos ecosistemas importantes como los humedales de Manchón Guamuchal y Monterrico, las lagunas costeras de Sipacate-Naranjo y Hawai y el Canal de Chiquimulilla. Los manglares de mayor extensión con mayor desarrollo en la costa del Pacífico son los que se encuentran en los humedales de Manchón Guamuchal y Monterrico. Las lagunas de Sipacate y Naranjo están en contacto mediante canales hacia aguas estuarinas, teniendo un gran impacto como reservas pesqueras en donde se alimentan y reproducen especies en peligro de extinción. Muchas de estas áreas no se encuentran en las óptimas condiciones, aunque el deterioro y falta de cuidado es más acelerada en la región del Pacífico que en la del Atlántico, esto ha sido influido debido a una mayor densidad poblacional y un desinterés en crear políticas para el cuidado de estos hábitats. (Arrivillaga, 2003)

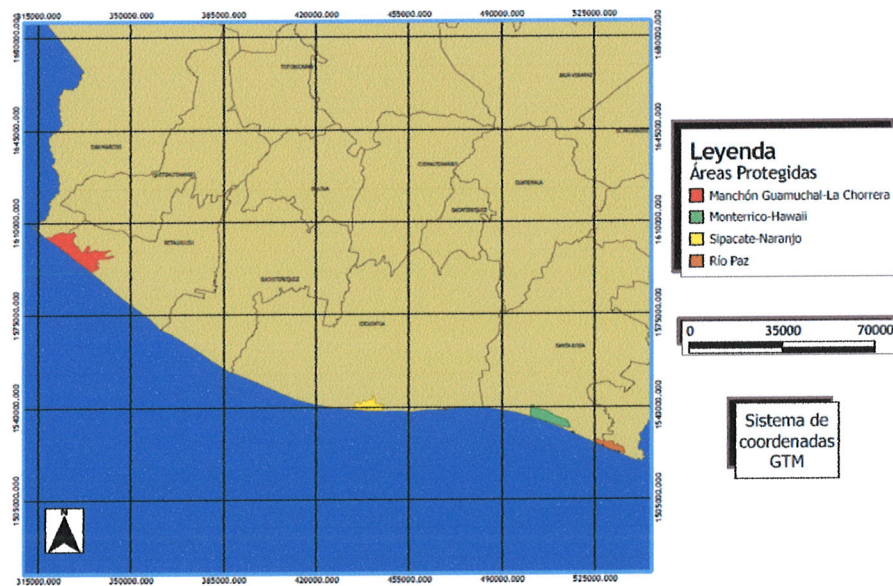
Tabla 31
Áreas Protegidas en la zona
Pacífico marino costera de Guatemala.

Nombre	Categoría	Área(ha)
Monterrico	Reserva de usos múltiples	2800
Hawai	Parquenacional	31
Sipacate-Naranja	Parquenacional	2000
ManchónGuamuchal	Reservaprivada	13500
Río Paz	No definida	2100
La Chorrera	Reserva natural privada	1243

Fuente: CONAP, 2003

Fuente: (Arrivillaga, 2003)

Figura 123
Áreas protegidas.

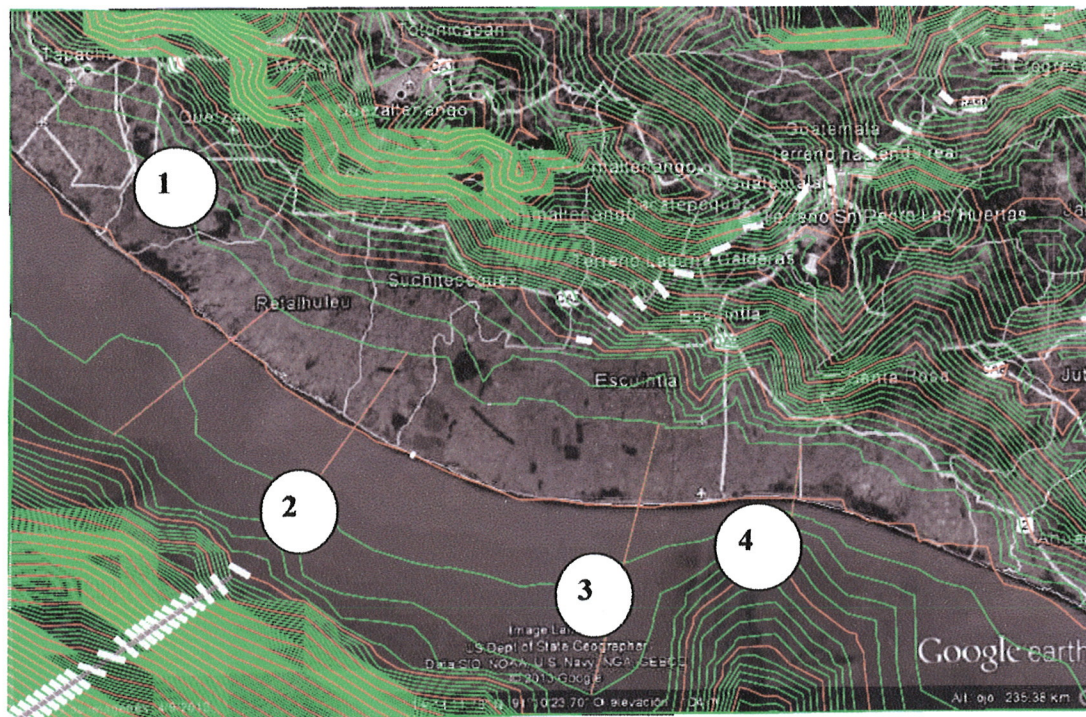


Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

E. Batimetría en la Costa del Pacífico guatemalteco.

La costa del Pacífico guatemalteco tiene una superficie irregular. Con pendientes elevadas frente a las costas de Escuintla y Santa Rosa, actualmente Puerto Quetzal, principal puerto en el Pacífico. En la figura Batimetría costa del pacífico las curvas verdes están a cada 50m de altura y las curvas rosadas están a cada 250m. Se trazaron 4 rutas para observar las elevaciones en esos tramos.

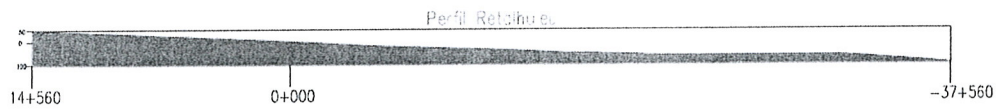
Figura 124
Batimetría costa del Pacífico.



Fuente: (Google Earth, 2013)

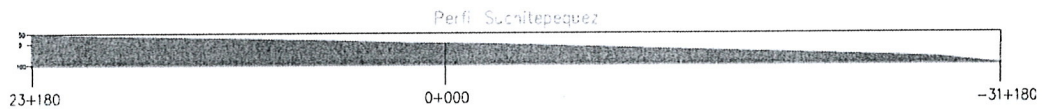
Se considera para cada ruta, la cota inicial de 50m sobre el nivel del mar hasta una cota final de 100m debajo del nivel de mar, en total son 150m de altura. En cada ruta evaluada las distancias lineales son muy grandes en donde se obtiene la mayor distancia es en la ruta 3 de 70.022km y la menor en la ruta 4 con 21.22km.

Figura 22
Ruta 1 Retalhuleu



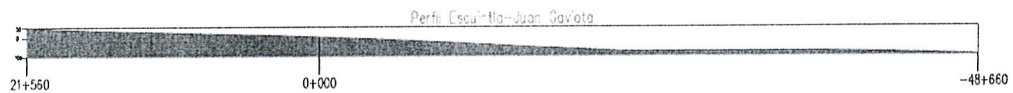
Fuente Batimetría: (Google Earth, 2013), Fuente Elevación: Elaboración propia

Figura 23
Ruta 2 Suchitepéquez.



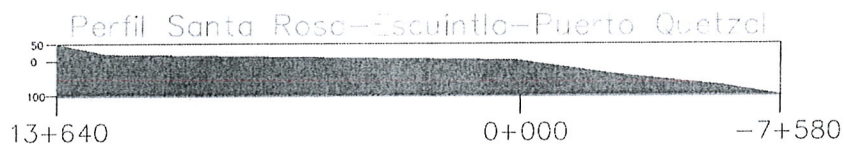
Fuente Batimetría: (Google Earth, 2013), Fuente Elevación: Elaboración propia

Figura 24
Ruta 3 Escuintla-Juan Gaviota.



Fuente Batimetría: (Google Earth, 2013), Fuente Elevación: Elaboración propia

Figura 25
Ruta 4 Santa Rosa-Escuintla-Puerto Quetzal.



Fuente Batimetría: (Google Earth, 2013), Fuente Elevación: Elaboración propia

XI. DETERMINACIÓN UBICACIÓN IDEAL PARA LA INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO.

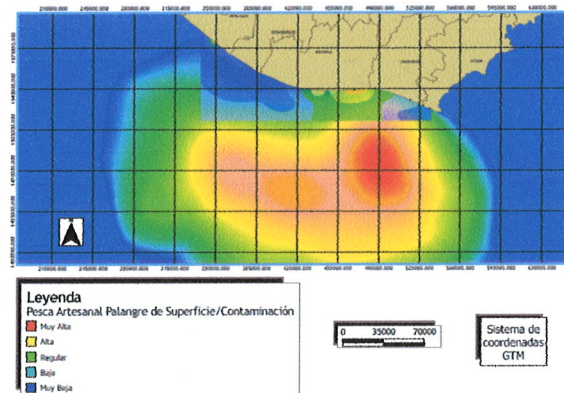
Se analizó superponiendo las distintas características que se presentan en Guatemala con el fin de determinar las regiones de instalación apropiadas.

A. Pesca y contaminación.

Una actividad económica en la costa del Pacífico es la pesca. Por lo que se evaluó la pesca artesanal palangre de superficie, la pesca de arrastre industrial y la pesca con red cerco. En mapas se comparó la contaminación causada por las poblaciones cercanas a la costa y las concentraciones de las densidades de los diferentes tipos de pesca. Las poblaciones que tienen un alto índice de contaminación son: Champerico, Puerto San José, La Barrita e Iztapa.

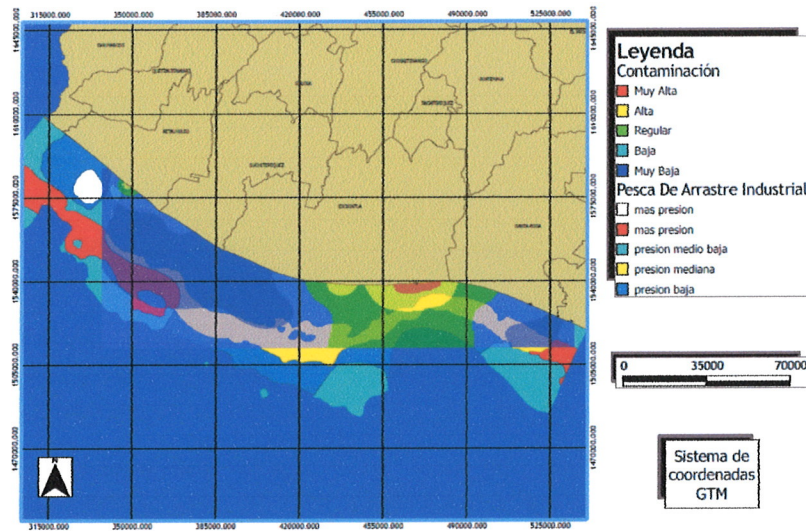
Como se observa en la figura de pesca artesanal palangre de superficie/contaminación en regiones de la costa de Retalhuleu y Suchitepéquez, la densidad de pesca es mucho menor y con menores índices de contaminación. En las costas de Escuintla y Santa Rosa se puede observar que la contaminación es más alta y a la vez la densidad de pesca en esa región es mayor.

Figura 129
Pesca artesanal palangre de superficie/contaminación.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

Figura 130
Pesca de arrastre industrial/contaminación.



Fuente:
(CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

En la figura de pesca de arrastre industrial/contaminación se determinó que cercana a las costas de Retalhuleu, Suchitepéquez, el oeste de Escuintla, Jutiapa y el este de Santa Rosa hay bajos índices de la pesca de arrastre industrial. Se consideró siempre que la contaminación se da mayormente cerca entre las costas de Escuintla y Santa Rosa.

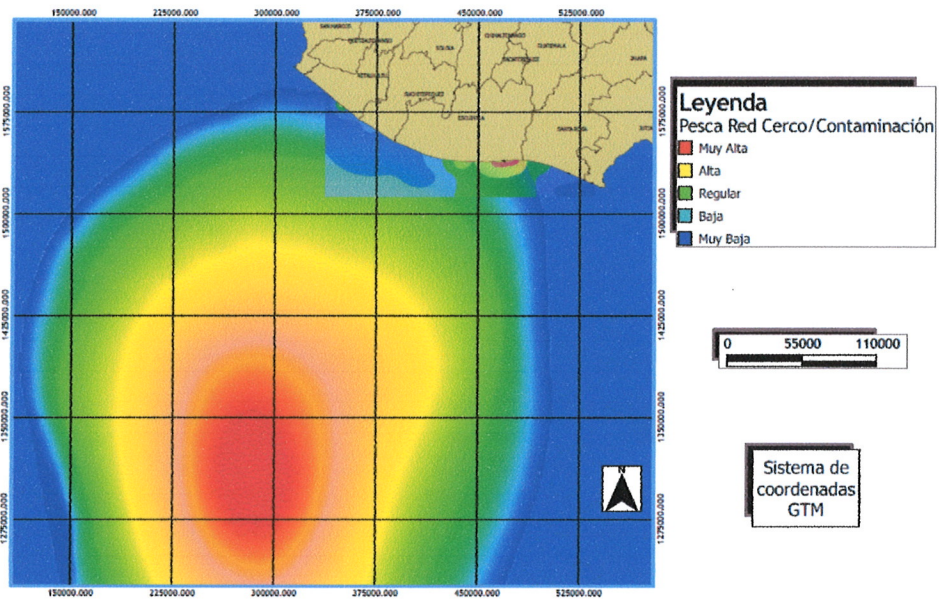
La densidad de pesca alta y muy alta se encuentra alejada de la costa por lo que este tipo de pesca no afecta a las regiones de instalación del prototipo ya que se ubicará cercana a la costa para reducir costos.

La pesca red de cerco se realiza muy lejana a las costas de Guatemala, se observa que hay mayor presencia de esto por Escuintla y Suchitepéquez aunque con índices bajos.

Se evalúan los tipos de pesca ya que implementar una granja de dispositivos flotantes en el océano tiene un impacto en la zona afectada, se reduce la pesca en esa región y a la vez fomenta un ambiente marino hacia la flora y fauna local. Al analizar estos mapas podemos notar que muy pegado a la costa entre Suchitepéquez, Escuintla

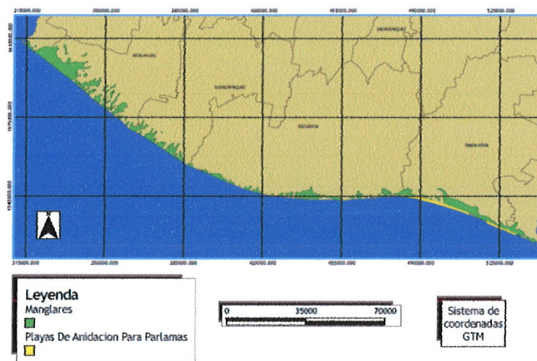
y Retalhuleu se encuentran bastante viables para su instalación al igual que en el extremo entre Jutiapa y Santa Rosa.

Figura 131
Pesca red cerco/contaminación



B. Parlomas y Manglares.

Figura 132
Playas anidación parlamas/manglares.



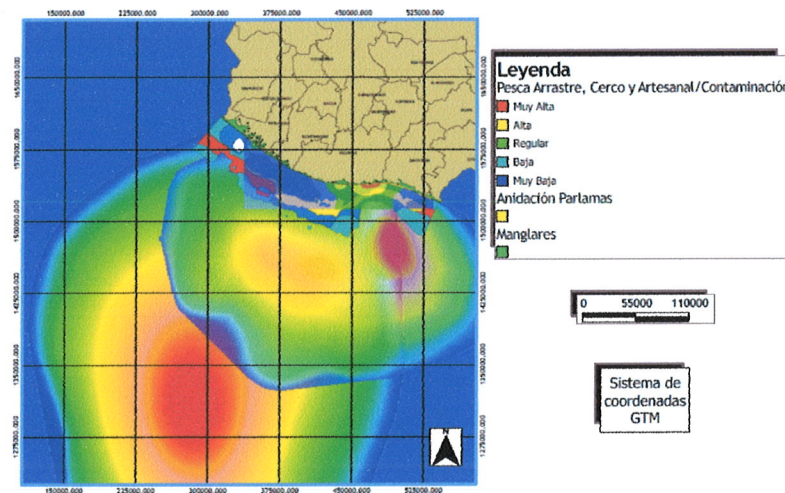
Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

A partir de la figura playas anidación/manglares se puede notar que las costas de Guatemala presentan una alta existencia de manglares en la costa, en donde algunas de estas regiones son áreas protegidas. Las playas en donde anidan las parlamas ubicándose principalmente al este de la costa en el departamento de Santa Rosa son regiones que se deben de considerar ya que una granja instalada por esa región puede afectar la vida marina en esa área.

En esta figura se quiere contrastar la vida marina y costera en la zona del Pacífico de Guatemala. Es importante considerar que la vida marina también tiene un efecto sobre dispositivos instalados en el mar, ya que estos sirven para mayor crecimiento de colonias de seres vivos. A la vez influyen en el rendimiento del dispositivo ya que pueden acelerar el mantenimiento de estos o simplemente afectar su desempeño.

C. Análisis región ideal.

Figura 133
Conjunto de mapas.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

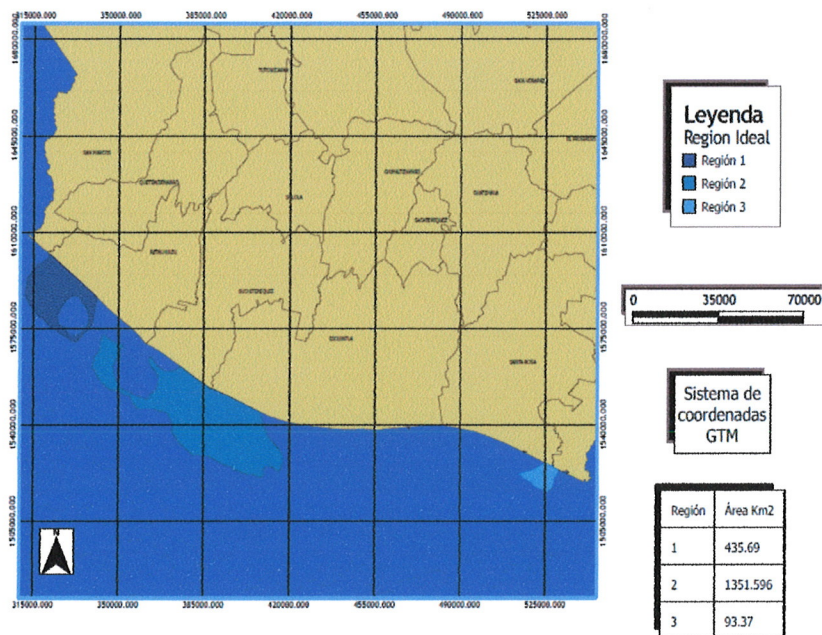
En la figura conjunto de mapas se muestran a los factores superpuestos como lo son: tipos de pesca, contaminación, anidación de parlamas y manglares. Con el fin

de determinar las regiones ideales, realizado mediante la superposición de mapas y dibujando en regiones con menos impacto.

Se observa el resumen del análisis de los mapas anteriores en la figura regiones ideales para instalación, ubicando tres regiones principales en Retalhuleu de aproximadamente unos 435.69 km², entre Suchitepéquez y Escuintla alrededor unos 1351.59 km² y entre Jutiapa y Santa Rosa de unos 93.37 km².

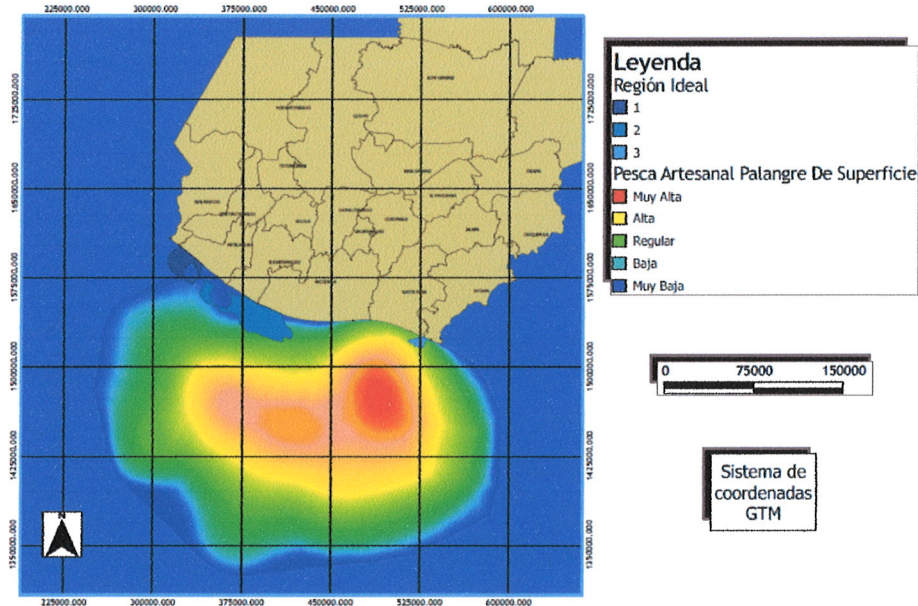
Estos números nos indican que en Guatemala existe suficiente espacio en el océano para la instalación de un prototipo que funcione con el movimiento de las olas.

Figura 134
Región ideal.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

Figura 135
Región ideal/pesca artesanal palangre de superficie.

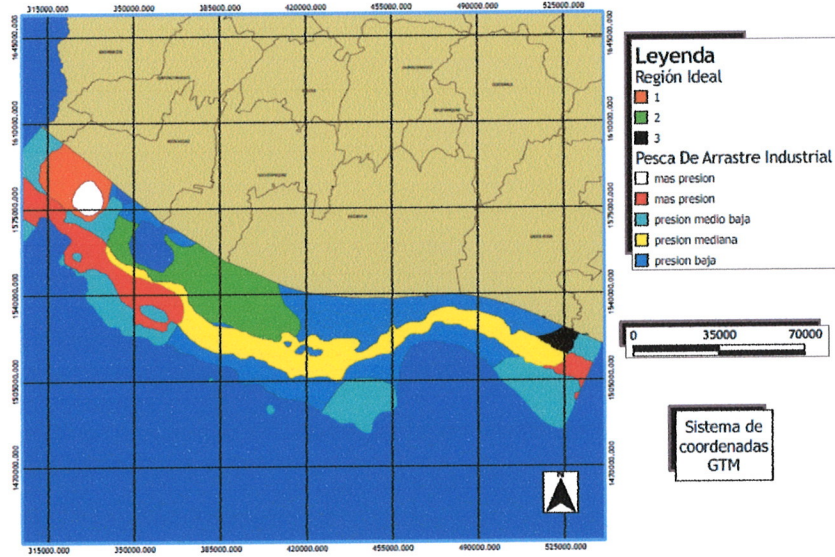


Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

En la figura regiones ideales/pesca artesanal palangre de superficie se aprecia que las áreas consideradas como viables para la instalación del prototipo no tienen un gran efecto en la pesca artesanal de palangre de superficie. Esta pesca se desarrolla principalmente en aguas adentro en el océano Pacífico enfrente de las costas de Santa Rosa. En la región entre Jutiapa y Santa Rosa la pesca de palangre de superficie es de término regular a pesar de esto se considera un área admisible de instalación debido a que muy cercana a la costa esta condición disminuye a baja.

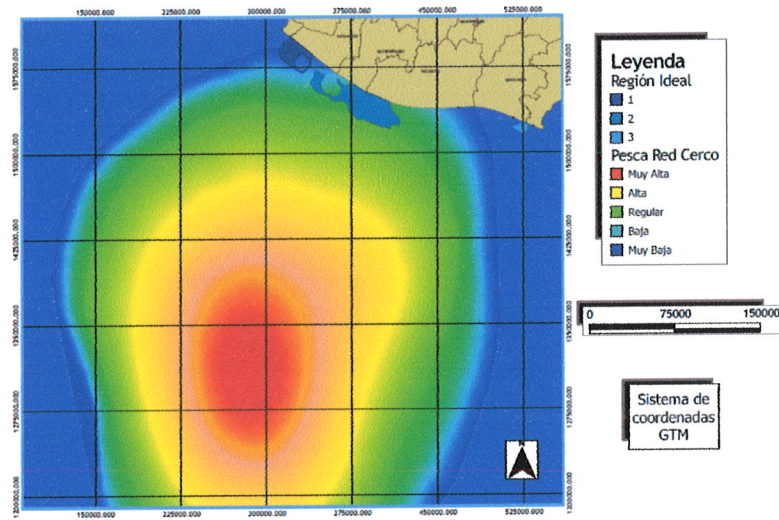
La pesca de arrastre industrial tuvo mucha influencia en determinar las regiones ideales debido a que se desarrolla distante a la costa, lo cual significa que su impacto es bajo, ya que un aspecto importante de ubicar dispositivos undimotrices es que se encuentren cercanos a las costas del país.

Figura 136
Región ideal/pesca de arrastre industrial.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

Figura 137
Región ideal/pesca red cerco.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

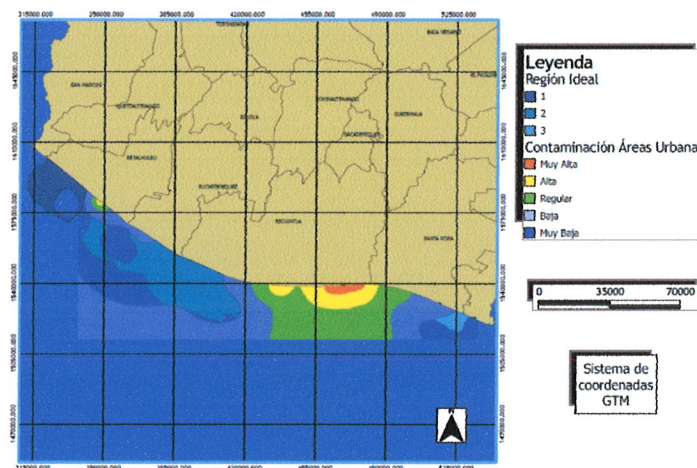
Las regiones afectadas por la pesca de red cerco son en Escuintla y Suchitepéquez en un término bajo, ya que esta pesca se desarrolla a una distancia muy grande de la costa por lo que su impacto en instalar una serie de dispositivos no es elevado.

Se toma en cuenta que al de evaluar un área ideal de instalación lo que se pretende es minimizar los impactos ocurridos en esa zona. Las áreas fueron escogidas ya que presentan los menores índices en movimiento pesquero en las costas de Guatemala, eso no significa que no existan lanchas que se muevan en estas regiones.

Se considera de suma importancia la contaminación que es causada por las principales poblaciones de la costa del Pacífico. Las regiones ideales propuestas se encuentran alejadas para que el dispositivo no sea estropeado ya sea por contaminación o por gente curiosa que puede alterar la maquinaria instalada.

Es de considerar también que la energía que se obtendrá de estos prototipos es para emplearla en poblaciones que se encuentren cerca del lugar de instalación para evitar que suban los costos de transporte energético.

Figura 138
Región ideal/contaminación.

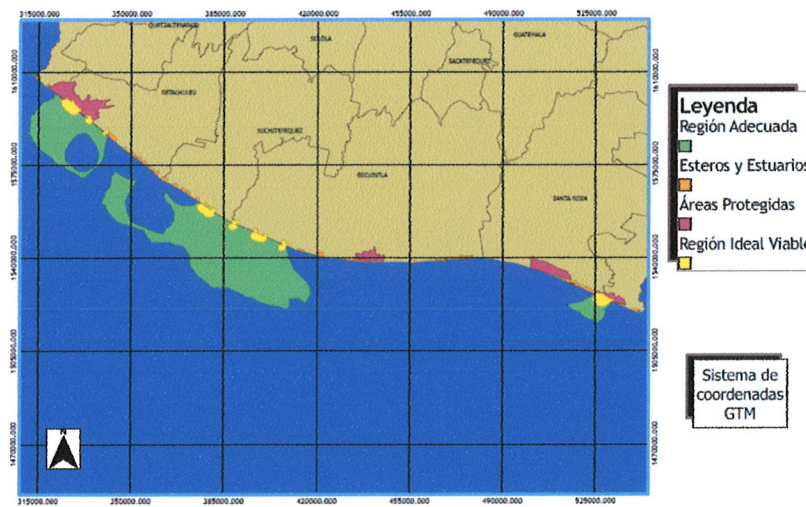


Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

Los esteros y estuarios tienen una alta vida marina, su importancia es alta ya que se encuentran en áreas cercanas a la costa. Ubicar una serie de prototipos cercanos a un estuario ayuda a que el prototipo sea un dispositivo que beneficie al ambiente marino. Las áreas protegidas en el Pacífico están relacionadas con la flora y fauna local, estas a su vez contienen algunos estuarios por lo que la vida marina en esas regiones es alta. La sobrepesca en las reservas naturales es baja por lo que la implementación del prototipo en esas zonas es de gran valor.

En total la región tiene unos 127.3 km² que es suficiente para instalar estos dispositivos, se disminuyó el tamaño debido a que no tiene sentido hacer la instalación muy alejada de la costa porque el costo de un proyecto se eleva a mayor distancia. Se busca crear un beneficio a poblados con carencia a un servicio eléctrico o a entidades privadas que deseen un servicio eléctrico renovable y amigable al ambiente.

Figura 139
Región ideal viable.



Fuente: (CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental, 2009)

XI. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE Y FACTORES QUE AFECTAN SU FUNCIONAMIENTO.

Todos los sistemas de producción de energía tienen un efecto sobre el medio ambiente, pero es generalmente percibido que la energía mediante el oleaje tiene menos impacto ambiental que otras formas de generación de energía. Incluso la generación de energía a partir de fuentes renovables. Dispositivos de energía del oleaje no generan emisiones de gases, líquidos o sólidos por lo que esta energía es no contaminante. Sin embargo este tipo de energía puede causar un impacto ambiental local el que se ve afectado. El prototipo, por una parte tiene un efecto sobre los animales y la naturaleza en mayor o menor medida. Por otro lado, el prototipo está afectado por el ambiente y debe ser adaptado a las condiciones locales. (Thorpe, 1999)

Energía a partir de las olas es un sistema poco probado como una fuente de producción de energía. Por tanto, es importante aprender en una etapa temprana de los posibles efectos negativos de las plantas de energía de olas en los organismos marinos y hacer los ajustes necesarios. (Thorpe, 1999)

A. Impacto ambiental de la hidrodinámica.

Los prototipos pueden tener una variedad de efectos sobre las olas, como lo son los patrones de mezcla vertical del oleaje y la propagación de las mareas. El efecto más destacable es el régimen de onda. Una disminución de la energía de la onda puede influenciar en la naturaleza de la costa, la zona submareal poco profunda y las comunidades de plantas y animales que viven ahí. (Thorpe, 1999)

Los cambios en el régimen de oleaje a lo largo de la costa pueden cambiar la composición de la línea de costera y las posibles comunidades submareales cerca de la costa. Cualquier esquema a gran escala requeriría un estudio de factibilidad para

determinar los efectos sobre los procesos sedimentarios de la región y de la flora y fauna típica de la región. (Thorpe, 1999)

B. Dispositivos como hábitats artificiales.

Las interacciones entre los dispositivos y el medio marino se hacen más complejas por el hecho de que los dispositivos representarían nuevos hábitats. Instalaciones de gas y petróleo en la costa proporcionan superficies para encrustamiento de una variedad de algas e invertebrados, por lo que los prototipos pueden ser colonizados por organismos incrustantes. Las especies que se adhieren a estos sitios dependen de las comunidades de especies dentro de la proximidad del dispositivo, la distancia de la costa, la profundidad del agua, la claridad, las condiciones meteorológicas y la posición relativa de las corrientes costeras y la velocidad de las corrientes. (Thorpe, 1999)

Son necesarias medidas que eviten el encrustamiento de organismos, por ejemplo, organismos adjuntos causan cambios en la corrosión y la fatiga, esto dificulta la inspección y el mantenimiento. Medidas de prevención contra el ensuciamiento en prototipos aún no se han desarrollado, pero podría incluir el uso de pinturas anti incrustantes y materiales anticorrosivos que resistan la salinidad del agua. El ensuciamiento de los conductos de agua de mar en las centrales eléctricas costeras han sido controlados por inyección o generación electrolítica de cloro. Debido a los efectos de dilución no está claro si el uso de esta medida en una ubicación de mar más abierto podría ser dañino para el ambiente. Ciertamente, los efectos crónicos pueden resultar si el cloro se deja reaccionar para formar compuestos orgánicos clorados que tienden a bioacumularse y persistir en el medio ambiente, aunque esto parece ser poco probable en aguas abiertas. Hay numerosas opciones para la eliminación de incrustaciones marinas, cada una de las cuales tiene sus ventajas relativas. Ninguno de ellos representa ningún problema ambiental significativo, aunque algunos (por ejemplo, chorros de alta presión) podría ser peligroso para el usuario. (Thorpe, 1999)

Estructuras artificiales pueden ser muy eficaces en la concentración de peces pelágicos dependiendo de factores tales como la claridad del agua (es decir, rango visible de la estructura), distancia de la costa y la profundidad, que influyen en las especies que puedan estar disponibles. Sin embargo, es probable que si los peces usan este tipo de estructuras para vivienda, aves que comen peces y mamíferos marinos se sentirían atraídos por el conjunto de dispositivos. Estos dos aspectos pueden mejorar las oportunidades de empleo a nivel local por el aumento de la pesca y el turismo. (Thorpe, 1999)

Es necesario tener en cuenta lo que le pasaría a un conjunto de prototipos al final de su vida útil. Dejando los dispositivos a la erosión natural o reducirlos a escombros en el fondo del mar podría causar una alteración permanente en el medio ambiente costero, convirtiéndose estos en arrecifes. La construcción de arrecifes artificiales aumenta la diversidad de hábitats en el lecho marino y atraen a los peces. Sin embargo, la diversidad no es siempre un atributo al evaluar para la conservación de un medio marino y la influencia de los arrecifes artificiales en la población de criaturas marinas puede ser impredecible y varía de especie a especie. La creación de los arrecifes también puede afectar la capacidad de pescar un área con redes de arrastre, debido a los enganches de las redes. Sin embargo, la influencia del medio ambiente global de dichos arrecifes es más probable que sea positiva, siempre que no se encuentre en zonas ambientalmente sensibles o importantes. (Thorpe, 1999)

C. Ruido.

Algunos prototipos son probablemente ruidosos, especialmente en condiciones ásperas o de mala lubricación. El ruido viaja largas distancias bajo el agua y esto puede tener implicaciones para la navegación y el sistema de comunicación de ciertos animales principalmente focas y los cetáceos. Es poco probable que los cetáceos se vean afectados con gran parte del ruido que se genere ya que está por debajo del nivel del umbral de audición (frecuencia) para los delfines. Las ballenas utilizan un número de longitudes de onda para la comunicación y el sonar. Una metodología para evaluar

el ruido sería por medio de hidrófonos para medir el espectro de sonido tanto de las ballenas como del dispositivo con el fin de determinar si hay algún área de superposición que pueda causar interferencia con las ballenas. Las ballenas y los delfines logran sobrepasar la mayoría de las barreras colocadas en el agua, con la posible excepción de finas redes de monofilamento, las cuales evidentemente, no se van a utilizar en los prototipos. Sin embargo debe haber cuidado en que los dispositivos no causen interrupciones en las rutas migratorias o lugares de cría. (Thorpe, 1999)

D. Riesgos de navegación.

Los prototipos pueden ser potenciales peligros para la navegación debido a que son difíciles de detectar visualmente o por radar. Un esquema detallado de las posiciones de los dispositivos junto con el correcto marcado de los dispositivos que utilicen algún tipo de iluminación deberá minimizar este riesgo. En grandes conjuntos de prototipos canales de navegación deberán de ser detallados. Varias de las áreas propuestas para los dispositivos en las costas europeas se encuentran en los principales canales de navegación y por lo tanto siempre hay un elemento de riesgo de que se produzca una colisión. El resultado, por ejemplo, de un barco petrolero chocando con un conjunto de dispositivos puede tener consecuencias para las colonias de aves marinas de la localidad. (Thorpe, 1999)

E. Efectos visuales.

En algunas zonas, la profundidad del agua requerida por los dispositivos pueden ser algunos de cientos de metros de la costa. Estos prototipos pueden tener un impacto visual. Estos prototipos pueden ser particularmente atractivos en lugares con fines recreativos, turísticos y de vivienda. Se deberían realizar trabajos con el departamento de Medio Ambiente, las autoridades locales y las organizaciones de voluntarios, para examinar el tema de la gestión de las zonas costeras y como se puede planificar planes de desarrollo para la energía por medio de las olas. (Thorpe, 1999)

F. Construcción del dispositivo.

Otros impactos ambientales por medio de los prototipos resultarían de la construcción y el mantenimiento de los dispositivos y cualquier desarrollo general asociado. Muchas de estas consecuencias son poco probables, pero es esencial que se tengan en cuenta en el proceso de evaluación ambiental. (Thorpe, 1999)

G. Conversión y transmisión de energía.

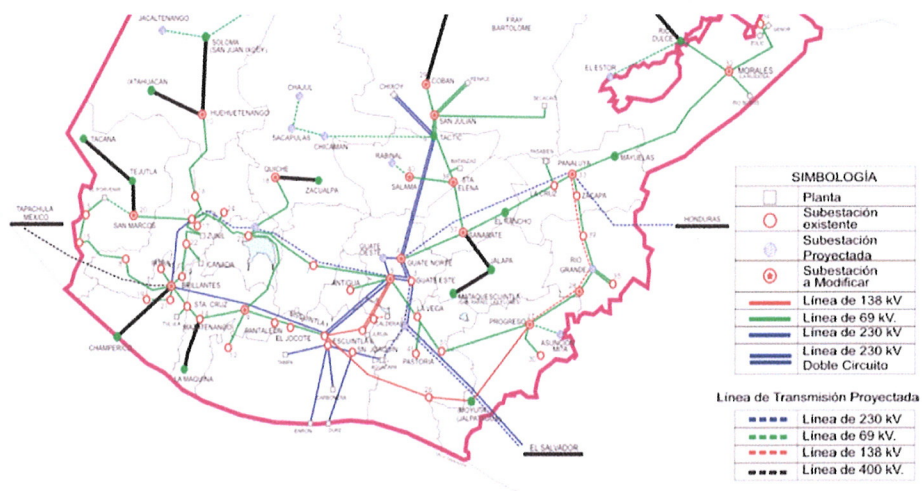
Las líneas de transmisión son necesarias para transferir la electricidad generada a los lugares que se requieren. Inicialmente los cables se ubican en el fondo del mar y, aunque se encuentren enterradas en algunas costas, las líneas aéreas son necesarias en algunas partes causando problemas de intrusión visual en áreas de alto valor paisajístico. (Thorpe, 1999)

En algunas líneas costeras que contengan importantes poblaciones de aves acuáticas, las líneas aéreas de transmisión pueden tener un efecto sobre la mortalidad de algunas especies, como especies migratorias, especialmente las grandes, que tienen poca maniobrabilidad. La mayoría de las colisiones ocurren en donde las líneas se cruzan con las rutas migratorias. (Thorpe, 1999)

El mapa a continuación indica cómo se encuentran distribuidas las líneas de transmisión y sub estaciones para una proyección que se realizó durante los años 2001-2006. Para determinar la accesibilidad de conectar el sistema de generación eléctrica a partir de energía unidmotriz a la red nacional.

Figura 140

Sub estaciones y líneas de transporte.



Fuente: (Ministerio de Energía y Minas, 2001-2006)

XII. GENERACION POR MEDIO DE WAVE POWER PROJECT-LYSEKIL.

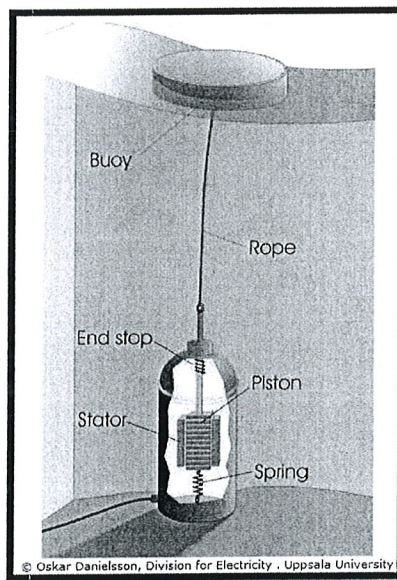
Es un proyecto realizado en la costa oeste de Suecia, alrededor de una milla náutica al oeste de la península de Islandsberg. Este proyecto consiste en un sistema de pistón que acciona un generador el cual se ubica en el lecho marino y que es accionado a través de una cuerda por medio de una boya. (Uppsala Universitet, 2013)

Este proyecto trabaja bajo los mismos principios que los de este trabajo de investigación.

Se espera que esta tecnología presente un efecto limitado en el medio ambiente. La energía por medio de olas no produce emisiones, además no será visible desde la tierra y puede ayudar a proteger el medio ambiente marino. (Uppsala Universitet, 2013)

Figura 38

Modelo Wave Power Project-Lysekil.



Fuente: (Uppsala Universitet, 2013)

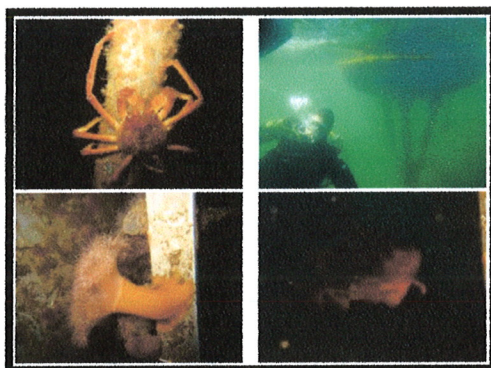
El proyecto de Lysekil cumple con minimizar los impactos ambientales, no afecta el aire fresco, no afecta la capa de ozono, presenta un ambiente seguro a la radiación.

Un aspecto muy importante que también influye es en la mejora del medio ambiente marino reduciendo la sobrepesca, ayudando al balance oceánico. (Uppsala Universitet, 2013)

Un problema biológico y técnico que ocurre, es el ensuciamiento. Los objetos sólidos situados en el mar se ensucian rápidamente por algas, mejillones y percebes. Por lo tanto, es razonable suponer que las boyas y la parte superior de la cuerda de la boya de conexión con el generador se ensucien. (Uppsala Universitet, 2013)

El aspecto técnico es calcular y entender cómo el sistema se verá afectado por la masa extra debido a la contaminación biológica de boyas. Habrá probablemente también algún efecto sobre la movilidad de la boya en el agua. La eliminación regular de algas, mejillones, etc, significa mayores costes de mantenimiento y por lo tanto dará lugar a un precio de energía más alta. (Uppsala Universitet, 2013)

Figura 142
Encrustamiento.

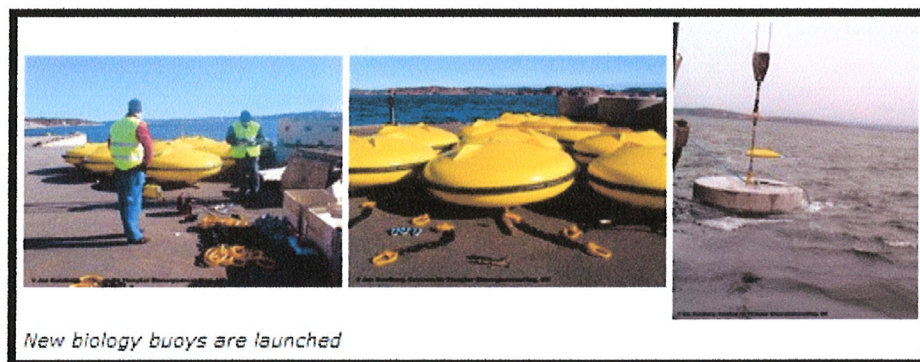


Fuente: (Uppsala Universitet, 2013)

Desde un punto de vista biológico, el ensuciamiento sólo puede ser una buena cosa. Esto conduce a un aumento de la biodiversidad local, que en etapas posteriores podría dar lugar a una afluencia de animales pequeños, por ejemplo, cangrejo más pequeño, que a su vez podría atraer a los depredadores y al final resultaría en más peces en la zona. (Uppsala Universitet, 2013)

Por último, la universidad de Uppsala examinó la generación de sonido y los cambios en los movimientos de sedimentación y los movimientos del agua, ya que estos factores pueden tener un efecto indirecto sobre la situación del medio ambiente local.

Figura 143
Inspecciones realizadas durante julio y agosto de 2007.



Fuente: (Uppsala Universitet, 2013)

XIII. ASPECTOS LEGALES.

Para la instalación y venta de energía se necesitan cumplir ciertos requisitos y trámites legales. Estos involucran a varias entidades del gobierno las cuales son las encargadas de supervisar, regular y administrar el mercado eléctrico del país.

Un proyecto de generación eléctrica debe iniciar con la realización de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) el cual debe de ser presentado al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para que la Dirección General de Gestión Ambiental lo analice y de una resolución la cual autoriza la utilización de los bienes de dominio público para la instalación del proyecto.

Después de la aprobación del MARN, es necesario determinar si el proyecto será para el consumo privado de energía, o será para generación y venta de energía. De ser consumo privado (como en el caso de fincas, predios o casas que generan su propia energía) no es necesario realizar ningún otro trámite legal. Si el proyecto es para la generación y venta de energía es necesario realizar varios trámites legales adicionales con diferentes entidades las cuales son regidas por la Ley General de Electricidad.

El ministerio de Energía y Minas (MEM) es el encargado de supervisar y regular el subsector eléctrico el cual está formado por la Comisión de Energía Eléctrica (CNEE) y el Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Para esto el MEM crea la Dirección General de Energía.

La CNEE y la AMM son los entes encargados de supervisar y regular a los generadores (en este caso nosotros), transportistas, comercializadores, distribuidores y grandes usuarios. Los generadores tienen la opción de vender su energía a los comercializadores, los cuales buscan garantizar un bloque de energía constante. O puede vender la energía directamente contactándose al Sistema Nacional Interconectado SNI. Los distribuidores de energía son los que le venden a los pequeños usuarios o es vendida directamente a los grandes usuarios.

La generación de energía eléctrica es ejecutada por los generadores pero es administrada por la AMM ya que se necesita más energía en horas pico de consumo eléctrico del país.

Para la generación y venta de energía se cuenta con tres leyes principales, la Ley General de electricidad, la Ley del GDR (Generado Distribuido Renovable) y la Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable.

1. La ley de General de electricidad determina las entidades responsables de regular, administrar y garantizar la energía eléctrica en el país.
2. La Ley del GDR aplica a los generadores menores a 5 MW, esta protege a los pequeños generadores, para que puedan ingresar al libre mercado y poder ofertar en la demanda y en las licitaciones.
3. La Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable incentiva a los inversionistas al desarrollo de proyectos de energía limpia permitiéndoles la extensión de impuestos como el pago de arancel en la importación de los equipos, exención del IVA y del ISR por 10 años.

La instalación y generación de energía utilizando el sistema propuesto en este trabajo puede ser utilizado e instalarlo en predios a la orilla de las costas para la generación de consumo propio permitiéndoles reducir la cantidad de trámites legales a realizar, además de esto también puede ser instalado de igual forma cualquier cuerpo de agua que cuente con olas como los lagos, lagunas, etc.

Después del análisis de los aspectos legales lo más aconsejable es construir sistemas que generen menos de 5 MW ya que esto facilita los trámites legales necesarios. Además si se desea instalar sistemas que generen más energía; es posible pero es más económicamente factible instalarlo como varios sistemas independientes aunque sean instalados en la misma ubicación.

A. Ministerio de Energía y Minas (MEM).

El Ministerio de Energía y Minas proporciona y ejecuta las acciones que permiten la inversión destinada al aprovechamiento integral de los recursos naturales, que proveen bienes y servicios energéticos y mineros velando por los derechos de sus usuarios y de la sociedad en general.

El MEM está subdividido en varios viceministerios, el encargado de la energía renovable es el Viceministerio del Área Energética. Este viceministerio es el encargado de la Dirección General de Energía y en el caso de este proyecto aplican las normas que este le asigna a la energía hidráulica.

1. Funciones del MEM:

- Estudiar y fomentar el uso de fuentes nuevas y renovables de energía; promover su aprovechamiento racional y estimular el desarrollo y aprovechamiento racional de energía en sus diferentes formas y tipos, procurando una política nacional que tienda a lograr la autosuficiencia energética del país.
- Coordinar las acciones necesarias para mantener un adecuado y eficiente suministro de petróleo, productos petroleros y gas natural de acuerdo a la demanda del país, y conforme a la ley de la materia.
- Cumplir y hacer cumplir la legislación relacionada con el reconocimiento superficial, exploración, explotación, transporte y transformación de hidrocarburos, la compraventa o cualquier tipo de comercialización de petróleo crudo o reconstituido, gas natural y otros derivados, así como los derivados de los mismos.
- Formular la política, proponer la regulación respectiva y supervisar el sistema de exploración, explotación y comercialización de hidrocarburos y minerales.

- Proponer y cumplir las normas ambientales en materia energética.
- Emitir opinión en el ámbito de su competencia sobre políticas o proyectos de otras instituciones públicas que incidan en el desarrollo energético del país.

a. Dirección General de Energía. La Dirección General de Energía es la dependencia del MEM que tiene bajo su responsabilidad el estudio, fomento, control, supervisión, vigilancia técnica y fiscalización del uso técnico de la energía de conformidad con el Decreto número 57-78 del Congreso de la República de Guatemala (Ley de Creación del Ministerio de Energía y Minas) y sus reformas, y la Ley General de Electricidad contenida en el Decreto 93-96 del Congreso de la República de Guatemala y la Ley para el Control, uso y aplicación de radioisótopos y radiaciones ionizantes decreto ley número 11-86.

b. Subsector eléctrico en Guatemala. El subsector eléctrico es el encargado del suministro de energía eléctrica en condiciones óptimas de seguridad, calidad y precio. El subsector eléctrico está constituido por las entidades consignadas en la Ley General de Electricidad, es decir: el Ministerio de Energía y Minas (MEM) ente rector, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) ente regulador y el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) ente operador del sistema eléctrico y mercado eléctrico; encargado de coordinar las transacciones entre los agentes y participantes del Mercado Mayorista de Electricidad.

Figura 144
Subsector eléctrico.



Fuente: Ministerio de energía y minas.

- **Ministerio de Energía y Minas (MEM)**

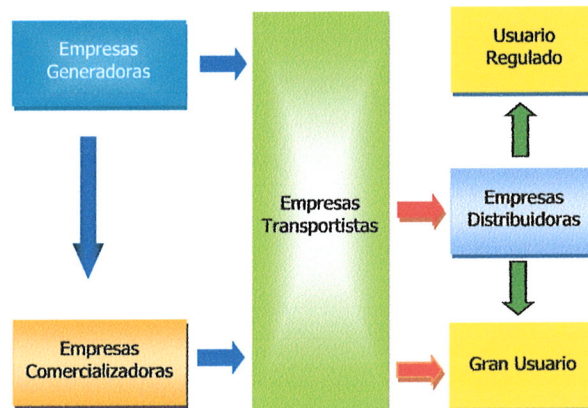
En el subsector eléctrico el MEM es el órgano del Estado responsable de:

- Aplicar la Ley General de Electricidad y su Reglamento para dar cumplimiento a sus obligaciones.
- Formular y coordinar las políticas, Planes de Estado y Programas Indicativos relativos al subsector eléctrico.

- Otorgar autorizaciones para la instalación de centrales generadoras y para prestar los servicios de transporte y de distribución final de electricidad.
 - Elaborar informes de evaluación socioeconómica para costear total o parcialmente proyectos de electrificación rural.
 - Inscripción y actualización de Grandes Usuarios y Agentes del Mercado Mayorista.
 - Promover el desarrollo de proyectos de energía renovable.
 - Calificar proyectos de fuentes renovables de energía, al amparo de la Ley de Incentivos.
- Mercado eléctrico:

Es el instrumento en el cual se realizan las transacciones comerciales (compra y venta de potencia y energía eléctrica) del subsector eléctrico.

Figura 145
Mercado eléctrico.



Fuente: Ministerio de energía y minas.

2. Política Energética de Guatemala. La Política Energética implementada por el Ministerio de Energía y Minas, tiene un alto componente de desarrollo humano, social y económico; además de convertir al país en productor y exportador de energía para los países vecinos, atracción de inversión, generación de empleo y cambiar la matriz de generación eléctrica en el país, para reducir en el mediano y largo plazo el impacto de la variación de los precios del crudo en el mercado internacional, el cual repercute en los costos de la generación de electricidad.

La política Energética de Guatemala tiene como objetivos:

- Asegurar que nuestra población tenga acceso a suministros de energía suficientes, costeables y confiables en términos y condiciones que respalden el crecimiento económico y la prosperidad de todos los guatemaltecos y guatemaltecas.
- Evitar la crisis mejorando las condiciones del futuro eléctrico del país, respetando las políticas ambientales, sociales, económicas y de transparencia, generadas por el Gobierno.
- Cubrir el crecimiento de la demanda de energía actual y futura, de manera que el sector eléctrico sea confiable y cuente con las reservas técnicas que debe tener, evitando posibles futuros racionamientos de energía eléctrica.
- Fortalecer el sistema de transmisión de energía eléctrica, de manera que sea más confiable, y tenga la capacidad para transmitir la nueva generación de energía que se requiere para cubrir la demanda creciente del país.
- Modificar la matriz energética del país, a fin de hacerla más eficiente, al reducir su dependencia del petróleo e impulsar las fuentes renovables de energía.

La política Energética implementada por el Ministerio de Energía y Minas, por medio de la matriz energética, promueve la conversión del parque generador actual

basado en un alto porcentaje en derivados del petróleo, por el desarrollo sostenible y sustentable a partir de recursos energéticos renovables con que dispone el país.

3. Sistema eléctrico. El sistema eléctrico es el conjunto de instalaciones, centrales generadoras, líneas de transmisión, subestaciones eléctricas, redes de distribución, equipo eléctrico, centros de carga y en general toda infraestructura destinada a la prestación del servicio, interconectados o no, dentro del cual se efectúan las diferentes transferencias de energía eléctrica entre diversas regiones del país.

En su representación más simplificada, el sistema eléctrico se divide en sistema de generación (representa a la oferta de energía eléctrica), sistema de transporte (representa el medio de transferencia de la energía eléctrica de los sitios de producción a los de consumo) y el sistema de distribución (representa la demanda o consumo de energía eléctrica).

En Guatemala, el sistema eléctrico está conformado por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), el cual está integrado por el Sistema Nacional Interconectado (SNI) y algunos sistemas aislados.

La operación del SNI y todos sus elementos eléctricos es una de las responsabilidades del Administrador del Mercado Mayorista (AMM) estando regido por las Normas de Coordinación Operativa. Estas normas son un conjunto de disposiciones y procedimientos que tienen por objeto garantizar la coordinación de la operación del Sistema Nacional Interconectado, para abastecer la demanda a mínimo costo, manteniendo la continuidad y la calidad del servicio. Estas normas son aprobadas por la CNEE.

4. Autorizaciones para la instalación de centrales generadoras.

- **Autorizaciones temporales.** Se otorga la autorización temporal, para la realización de obras de generación que prevean la utilización de recursos hídricos o geotérmicos, cuando la potencia de la central exceda los 5 Megavatios (MW). La autorización temporal permite efectuar estudios, mediciones y sondeos de las obras en bienes de dominio público y en terrenos particulares, indemnizando a los propietarios de todo daño y perjuicio causado.

Las solicitudes para la obtención de la autorización temporal se presentan al Ministerio, en original y copia, formulario del Ministerio y mapa de localización la solicitud.

Las autorizaciones temporales son otorgadas por el Ministerio en un plazo máximo de 60 días de presentada la solicitud. Las autorizaciones temporales son otorgadas por resolución del Ministerio y las mismas no son limitativas para que otro interesado solicite una autorización temporal para la misma área. El plazo máximo de la autorización temporal será de un año.

- **Autorizaciones definitivas.** Para obtener la autorización definitiva, para instalación de centrales hidroeléctricas o geotérmicas mayores de 5 MW, se debe presentar la solicitud ante el Ministerio, con toda la información que se especifique en el Título II “Autorizaciones” Artículo 4 del Reglamento de la Ley General de Electricidad (que se encuentra al final de esta sección), incluida la relativa a las servidumbres que se deban imponer en predios de propiedad pública y privada. También se debe adjuntará el documento que contiene las generalidades de la solicitud en original y copia, utilizando el formulario de solicitud preparado por el Ministerio y el mapa de localización objeto de la solicitud.

El Ministerio deberá resolver sobre las solicitudes de autorización en un plazo de noventa (90) días contados a partir de la fecha en que se presenten las mismas, previo a que el solicitante haya cumplido con lo estipulado por El Reglamento de la Ley General de Electricidad.

La autorización será otorgada por el Ministerio, mediante Acuerdo, no pudiendo exceder del plazo de cincuenta (50) años, ni tener carácter de exclusividad de tal manera que terceros pueden competir con el adjudicatario en el mismo servicio.

La Autorización quedará firme a través de la suscripción de un Contrato de Autorización. En el mismo quedarán establecidas las obligaciones que asume el autorizado, las garantías, los procedimientos para rescindir, ampliar o extender la autorización, la duración de la autorización y todo otro aspecto que el Ministerio considere necesario.

Cuando un recurso hidráulico se utilice en forma compartida para generar electricidad y para otros usos, o bien cuando se trate de dos o más aprovechamientos hidráulicos de energía eléctrica en el mismo cauce, el titular de la autorización para el aprovechamiento del recurso deberá prever que no se afecte el ejercicio permanente de otros derechos.

○ REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE ELECTRICIDAD

TITULO II

AUTORIZACIONES

○ CAPITULO I, AUTORIZACIONES

- Artículo 4. Solicitud de Autorizaciones. (Reformado por el artículo 2, Acuerdo Gubernativo No. 68-2007).

La solicitud para la obtención de las autorizaciones definitivas para planas de generación hidroeléctrica y geotérmica, transporte y distribución, será presentada por el interesado al Ministerio, en original y copia, utilizando formularios que para el efecto preparará el Ministerio, conteniendo por lo menos la siguiente información: a) *Identificación del peticionario*. Para las personas naturales: consignar datos personales del solicitante; Para las personas jurídicas: consignar los datos de identificación del representante legal, nombre, razón social o denominación de la entidad solicitante, domicilio y fotocopia legalizada de la escritura de la constitución social y sus modificaciones, si la hubiera. En caso de uniones transitorias, estos datos se deberán presentar para todos los integrantes. b) *Domicilio y lugar para recibir notificaciones*. Los requisitos deben ser cumplidos tanto por personas naturales como jurídicas. c) *Descripción y planos generales del proyecto*, cuando correspondiera a autorizaciones para la realización de nuevas obras. Los planos se deberán realizar en la escala y el nivel de detalle que determine el Ministerio. d) *Calendario de ejecución de las obras*, cuando correspondiere. e) *Presupuesto del proyecto*, cuando correspondiere. f) *Ubicación de un mapa en escala que determine Ministerio del área afectada por las obras*. g) *Especificación de los bienes de dominio público y particulares que se utilizarán*, con la individualización de aquellos con cuyos propietarios el interesado no ha llegado a un acuerdo directo de compra o de servidumbre para su utilización, para cuyo efecto el interesado deberá indicar la dirección o el lugar donde en donde puedan notificar o citar en

forma personal a tales propietarios o a sus representantes legales. h) *En el caso de autorizaciones de servicio de distribución final*, delimitación de la zona en la que se solicita autorización y definición del área obligatoria de servicio en correspondencia con las instalaciones existentes y/o nuevas, identificadas en la solicitud. i) *Estudio de evaluación del impacto ambiental*, aprobado por la entidad ambiental correspondiente. j) *Para el caso de nuevas instalaciones de transmisión o generación con capacidad mayor a cinco (5) megavatios*, estudios eléctricos que muestren el impacto sobre el sistema de transmisión de la obra propuesta, de conformidad con lo establecido en las normas de estudios de acceso de sistemas de transporte (NEAST), elaboradas por la Comisión. Para aquellas con capacidad menor o igual a cinco (5) megavatios, únicamente los estudios eléctricos de flujo de carga. k) *Planes de seguridad para las instalaciones de acuerdo a las normas sobre cada tema específico*, que emita la Comisión. l) *Para centrales hidroeléctricas o geotérmicas, planes de exploración, desarrollo y explotación del recurso*. El ministerio podrá requerir información adicional o requerir ampliaciones sobre los puntos indicados en las literales anteriores. Este periodo de información no podrá extender los pasos previstos en la ley y este Reglamento por más tiempo que el que tome el solicitante para presentar la información requerida.

5. Registro para centrales generadoras menores a 5 MW. Para el registro de la instalación de centrales hidroeléctricas o geotérmicas, que cuentan con una capacidad menor a los 5 MW. Deberán prestar el formulario correspondiente de su proyecto a la Dirección General de Energía.

Los proyectos para la instalación de centrales de generación de energía eléctrica, deberán adjuntar el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental y la resolución de aprobación emitida por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

B. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE).

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica vela por el cumplimiento de la Ley General de Electricidad y su Reglamento, regulando a favor de la eficiencia, estabilidad y sostenibilidad del subsector eléctrico en Guatemala.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica fue creada por la Ley General de Electricidad, contenida en el Decreto No. 93-96 del Congreso de la República de Guatemala, como órgano técnico del Ministerio de Energía y Minas, con independencia funcional para el ejercicio de sus atribuciones y de las siguientes funciones:

- Cumplir y hacer cumplir la Ley y sus reglamentos, en materia de su competencia e imponer las sanciones a los infractores.
- Velar por el cumplimiento de las obligaciones de los adjudicatarios y concesionarios, proteger los derechos de los usuarios y prevenir conductas atentatorias contra la libre empresa, así como prácticas abusivas o discriminatorias.
- Definir las tarifas de transmisión y distribución, de acuerdo a la Ley General de Electricidad, así como la metodología para el cálculo de las mismas.
- Dirimir las controversias que surjan entre los agentes del subsector eléctrico actuando como árbitro entre las partes cuando éstas no hayan llegado a un acuerdo.

- Emitir las normas técnicas relativas al subsector eléctrico y fiscalizar su cumplimiento en congruencia con prácticas internacionales aceptadas.
- Emitir las disposiciones y normativas para garantizar el libre acceso y uso de las líneas de transmisión y redes de distribución.

1. Sistemas bajo la regulación de la CNEE.

- Sistema de generación:

El sistema de generación está conformado por centrales: hidroeléctricas, turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna y centrales geotérmicas.

La actividad de la generación no está sujeta a la autorización del Ministerio Energía y Minas, salvo aquellas que hacen uso de bienes de dominio público, tales como las hidroeléctricas y las geotérmicas.

La operación de las centrales generadoras es coordinada por el AMM y ejecutada por los generadores.

- Pasos a seguir para las gestiones en la CNEE:
 - 1.1. Descargar de la página de la comisión la lista de entidades Precalificadas para realizar estudios eléctricos:
<http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/>
 - 1.2. Una vez seleccionada una entidad de la lista anterior ésta deberá solicitar las premisas para el estudio eléctrico del proyecto en cuestión:
<http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/premisas/index.php>
 - 1.3. La entidad precalificada (indicada en 1.1) descarga, bajo su responsabilidad, la base de datos del Sistema Nacional Interconectado y la lista de Proyectos futuros de generación y transporte de la página de la CNEE:
<http://www.cnee.gob.gt/phpscript/FormularioDatabase.php>

- 1.4. Se tiene un plazo máximo de 6 meses a partir de la firma del documento de las premisas para entregar a la Comisión los estudios eléctricos completos.
- 1.5. Para Solicitar la Aprobación de los Estudios Eléctricos véase Guía NEAST:
<http://www.cnee.gob.gt/pdf/normas/docs/Guia%20NEAST%202009%2008%2015.pdf>
- 1.6. La Comisión en un plazo no mayor de 60 días hábiles (aproximadamente 3 meses) evalúa los estudios resuelve dudas y emite la resolución respectiva.
- 1.7. Se notifica la Resolución sobre lo solicitado en 1.7 a la Entidad Interesada, al Administrador del Mercado Mayorista, a la Dirección General de Energía del MEM y al Transportista Involucrado.
- 1.8. Se publica en la página de la CNEE copia de la Resolución emitida.
- 1.9. Se Agrega el proyecto, si fuera el caso, la lista de proyectos futuros.

2. Sistema de transporte. El sistema de transporte está conformado por el sistema principal y el sistema secundario. El sistema principal es compartido por los generadores e incluye las interconexiones. El sistema secundario está conformado por la infraestructura eléctrica utilizada por los generadores para el suministro de energía al sistema principal; el sistema secundario es el medio de interconexión de un generador a la red de transmisión.

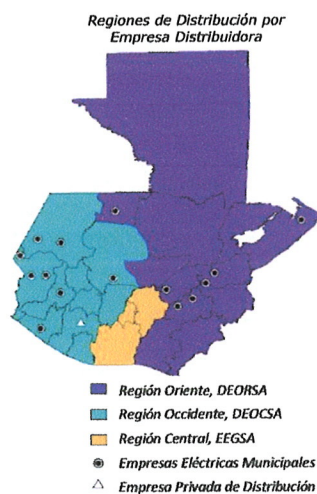
La operación de sistema de transporte es coordinada por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) y ejecutada por los transportistas. La actividad del transporte está sujeta a la autorización del Ministerio de Energía y Minas, si utiliza bienes de dominio público.

2. Sistema de distribución. El sistema de distribución está integrado por la infraestructura de distribución (líneas, subestaciones y redes de distribución) que opera en tensiones menores a 34.5 KV. La operación de los principales componentes del sistema de distribución es coordinada por el AMM y ejecutada por los distribuidores. La actividad del servicio de distribución final está sujeta a autorización del Ministerio de Energía y Minas, si utiliza bienes de dominio público.

Las principales empresas distribuidoras son:

- 1.10. Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A., EEGSA, quien presta el servicio eléctrico en el área central del país.
- 1.11. Distribuidora de Electricidad de Occidente, S. A., DEOCSA, quien presta el servicio eléctrico en los departamentos del occidente del país.
- 1.12. Distribuidora de Electricidad de Oriente, S. A., DEORSA, quien presta el servicio eléctrico en los departamentos del oriente.
- 1.13. Las Empresas Eléctricas Municipales, EMM (Empresas Públicas)
- 1.14. Empresas de Distribución Privada.

Figura 146
Empresas distribuidoras.



Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

C. Leyes y reglamentos para la generación e interconexión a la red SIN (Sistema Nacional Interconectado).

Para el emplazamiento del proyecto y el propósito de su generación se necesita cumplir con las leyes y reglamentos aplicables en el sitio de instalación. Estas son en general:

1. Ley general de electricidad y su reglamento. La ley general de electricidad se sustenta a través de los siguientes principios generales:

- Es libre la generación de electricidad y no se requiere para ello autorización o condición previa por parte del Estado, más que las reconocidas por la Constitución Política de la República de Guatemala y las leyes del país.
- Es libre el transporte de electricidad, también es libre el servicio de distribución privada de electricidad.
- El transporte de electricidad que implique la utilización de bienes de dominio público y el servicio de distribución final de electricidad, estarán sujetos a autorización.
- Son libres los precios por la prestación del servicio de electricidad, con la excepción de los servicios de transporte y distribución, sujetos a autorización. Las transferencias de energía entre generadores, comercializadores, importadores y exportadores que resulten de la operación del mercado mayorista, estarán sujetas a regulación en los términos de la Ley.

2. Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable.

La Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, contenida en el Decreto No 52-2003, tiene por objeto promover el desarrollo de proyectos de energía renovable y establecer los incentivos fiscales, económicos y administrativos para el efecto. Estos incentivos se refieren a:

- Exención de derechos arancelarios para las importaciones, incluyendo el Impuesto al Valor Agregado (IVA), cargas y derechos consulares sobre la importación de maquinaria y equipo, utilizados exclusivamente para la generación de energía en el área donde se ubiquen los proyectos de energía renovable, para los periodos de pre inversión y de construcción, el cual no excederá de diez años.
- Exención del Impuesto sobre la Renta (ISR), por 10 años. Este incentivo tendrá vigencia exclusiva a partir de la fecha en que el proyecto inicia la operación comercial.

Para aprovechar los incentivos anteriores, el interesado deberá dirigir su solicitud al Ministerio de Energía y Minas y presentarla en la Dirección General de Energía.

3. Ley de GDR (Generación Distribuida Renovable). La Generación Distribuida Renovable, es la modalidad de generación eléctrica producida por unidades de tecnología de generación con recursos renovables que se conectan a instalaciones de distribución cuyo aporte de potencia neto es inferior al que establece el Reglamento de la Ley General de Electricidad (5 MW).

Un Generador Distribuido Renovable (GDR), es la persona individual o jurídica, titular o poseedora de una central de generación eléctrica que utiliza recursos energéticos renovables y participa en la actividad de Generación Distribuida Renovable. Estos serán considerados como Participantes del Mercado Mayorista.

La norma técnica para la Generación Distribuida Renovable (NTGDR) y usuarios auto productores con excedentes de energía, establece las disposiciones generales que deben de cumplir los Generadores Distribuidos Renovables y los Distribuidores para la conexión, operación, control y comercialización de la energía eléctrica producida con fuentes renovables.

Dentro de las opciones de comercialización, el GDR podrá vender su energía que genera a los distribuidores de conformidad con lo que establece la Ley General de Electricidad y sus Reglamentos; en el Mercado Mayorista, en calidad de Participante Productor, cumpliendo con el marco legal vigente y lo que establecen las Normas de Coordinación Comercial y Operativa que correspondan.

De conformidad con el artículo 70 de la Ley General de Electricidad, los GDR no pagarán Peaje en Función de Transportista al Distribuidor ni peaje por el uso del Sistema Secundario al que se encuentran conectados, debido a que deberá considerarse el uso de las instalaciones como realizadas en sentido contrario al Flujo Preponderante de la energía del Sistema de Distribución respectivo. El GDR pagará el peaje correspondiente al sistema Principal de Transporte, únicamente para los casos en los que haya comprometido su producción bajo contrato y cuente con Potencia Firme.

La Norma de Generación Distribuida promueve y facilita la instalación de nuevas micros y pequeñas centrales generadoras, así como, de aquellas que existen los cuales son utilizados para autoconsumo; las centrales existentes podrán conectarse a la red eléctrica nacional, y con ello, tienen la oportunidad de comercializar sus excedentes de energía.

Esta norma regula la forma en que el pequeño y micro generador comercializará su energía, la cual se realiza bajo el esquema de libre mercado, quienes podrán participar en las licitaciones que efectúen las distribuidoras o poner a disposición su energía en el mercado de oportunidad.

Las viviendas que cuentan con sistemas fotovoltaicos u otra instalación de generación eléctrica, también podrán comercializar sus excedentes de energía. En las viviendas en donde se localicen instalaciones de generación eléctrica, se colocará un contador de doble dirección, este contador medirá cuánta energía inyectó a la red y cuánta consumió de ella, y al final del mes pagará la diferencia si utiliza más de la que aporta.

D. Administrador del mercado mayorista (AMM).

El Administrador del Mercado Mayorista es una entidad privada sin fines de lucro, que coordina las transacciones entre los participantes del Mercado Mayorista, cuyas funciones principales son:

- Coordinación de la operación de centrales generadoras, interconexiones internacionales y líneas de transporte, al mínimo costo para el conjunto de operaciones del mercado mayorista, en un marco de libre contratación entre generadores, comercializadores, incluidos importadores y exportadores, grandes usuarios y distribuidores.
- Establecer precios de mercado de corto plazo para las transferencias de potencia y energía entre sus agentes, cuando estas no corresponden a contratos de largo plazo libremente pactados.
- Garantizar la seguridad y el abastecimiento de energía eléctrica en el país.
- Los agentes del mercado mayorista, operarán sus instalaciones de acuerdo a las disposiciones que emita el Administrador del Mercado Mayorista.

Las principales características del Mercado Mayorista, son las siguientes:

- Los generadores que tengan una potencia mayor de 5 MW.
- Los distribuidores que tengan un mínimo de 15,000 usuarios.

- Los transportistas que tengan una capacidad de transporte mínima de 10 MW.
- Los comercializadores, incluyendo importadores y exportadores, que compren o vendan bloques de energía asociados a una oferta firme eficiente o demanda firme de por lo menos 2 MW.
- Los Grandes Usuarios que tengan una demanda máxima de potencia que exceda 100 de kW podrán realizar transacciones en el Mercado Mayorista.

Los distribuidores, comercializadores y grandes usuarios deberán contar con contrato de potencia, que les permita cubrir sus requerimientos de demanda firme. Los agentes gozan de los derechos y obligaciones establecidas en el reglamento del Administrador del Mercado Mayorista y sus reformas.

E. Ministerio de ambiente y recursos naturales (MARN).

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales es la entidad del sector público especializada en materia ambiental y de bienes y servicios naturales del Sector Público, al cual le corresponde proteger los sistemas naturales que desarrollen y dan sustento a la vida en todas sus manifestaciones y expresiones, fomentando una cultura de respeto y armonía con la naturaleza y protegiendo, preservando y utilizando racionalmente los recursos naturales, con el fin de lograr un desarrollo transgeneracional, articulando el quehacer institucional, económico, social y ambiental, con el propósito de forjar una Guatemala competitiva, solidaria, equitativa, inclusiva y participativa.

El MARN está subdividido en varias Direcciones y Unidades, en las cuales están repartidas todas las responsabilidades que la leyes le otorgan al MARN. La Dirección General del Cumplimiento legal es la encargada analizar y supervisar todos los trámites legales que se deben realizar par un proyecto. La Dirección General de

Gestión Ambiental es la encargada de cuidar y supervisar los recursos naturales del país y es la analiza los estudios de impacto ambiental para determinar cuánto afectan los proyectos a las regiones donde se están implementando y por lo tanto es la encargada de emitir el dictamen para la aprobación de los proyectos de generación eléctrica.

1. Dirección General del Cumplimiento legal. Es la unidad encargada de velar por el cumplimiento de las leyes ambientales cuando éstas le asignen esta atribución al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. También se encarga de aplicar de conformidad con la ley, el procedimiento de verificación de infracciones y su aplicación cuando procediere; asimismo, coordinar y brindar la colaboración necesaria a las instituciones del Estado, sus entidades descentralizadas y autónomas, unidades ejecutoras, las municipalidades y demás empresas públicas estatales, en cuanto a las investigaciones que sobre la materia de ambiente y depredación de recursos naturales se le requiera.

2. Dirección General de Gestión Ambiental. La Dirección tiene como principales atribuciones: (I) definir las acciones preventivas para conservar la calidad del ambiente y de los recursos naturales, (II) definir un sistema de evaluación de impacto ambiental, (III) supervisar la correcta aplicación de las normas ambientales, (IV) elaborar proyectos de reglamentos y emisión de licencias ambientales. Es uno de los entes encargados de la recepción de los expedientes, su categorización y distribución para su análisis, inspección y dictamen.

3. Estudio de impacto ambiental (EIA). El Estudio de Impacto Ambiental es un Instrumento técnico-legal de Carácter Predictivo que sirve para Identificar, Comprender, Conocer y Gestionar los Impactos Ambientales del Proyecto a Realizar.

La normativa legal ambiental en Guatemala establece que para cada proyecto que se desee implementar se debe elaborar un estudio de impacto ambiental, según lo indica la ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente.

Para la elaboración y entrega de un EIA se necesitan cumplir los siguientes requisitos:

- Carta de presentación de estudio, por parte del propietario o representante legal hacia el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
- Acta de Declaración Jurada, de presentación del estudio al MARN, Firmada por el representante legal.
- Fotocopia de la constancia del Número de Identificación Tributaria (NIT) de la Empresa Promotora (autenticada).
- Fotocopia autenticada del nombramiento del Representante Legal, si el proponente es persona jurídica.
- Fotocopia autenticada de la Cédula de Vecindad del Representante Legal o propietario del proyecto.
- Fotocopia de Patente de Comercio de la entidad (autenticada).
- Certificación del Registro de la Propiedad del predio en donde se va a desarrollar el proyecto.
- Si la empresa o el interesado no es propietario del terreno donde se desarrollará el proyecto, debe incluirse autenticado Contrato de arrendamiento, inscrito en el registro de la propiedad e inmueble, compra venta ó Acta donde son socios una de las partes que pone esa tierra como patrimonio.

Para la presentación del Estudio Ambiental ante el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales es necesario que los planos sean impresos en formato doble carta y que sean firmados, timbrados y sellados por los colegiados expertos en las distintas ramas que requiera el proyecto. Adicionalmente se requiere que los planos sean entregados en digital ya sea formato JPG, o guardados como AutoCAD 2000.

Planos:

1. Plano de ubicación

2. Plano de localización.
3. Plano de planta de arquitectura.
4. Plano de secciones
5. Plano de red de drenaje sanitario más detalles.
6. Plano de red de drenaje pluvial más detalles.
7. Plano de acometida y distribución eléctrica.
9. Planos topográficos.

Los Estudios de Impacto Ambiental deben llevar una publicación para su vista al público durante 20 días hábiles después de aprobado el EIA, si en algún momento el proyecto se desarrolla en el interior del país podría en algún momento publicarse en idiomas mayas de la región.

XIV. ANÁLISIS ECONÓMICO

Este análisis económico se realiza con el objetivo de identificar la rentabilidad de la instalación del proyecto en el Litoral del Pacífico de Guatemala. Para ello se presenta el desglose de los costos tanto de inversión como de mantenimiento, asimismo se incluye un análisis de retorno calculando el tiempo estimado en el que se recuperará la inversión inicial.

Tabla 6
Costos iniciales.

Descripción	Precio USD	Cantidad	Total
Prototipo	\$15,000.00	15	\$225,000.00
Turbina Pelton de 1400KW	\$300,000.00	1	\$300,000.00
Generador STAMFORD UC RANGE	\$20,000.00	1	\$20,000.00
Tubería Lámina A50 50,000 psi	\$5.00	2000	\$10,000.00
Boya	\$200.00	30	\$6,000.00
Cable galvanizado	\$3.00	750	\$2,250.00
Instrumentación	\$150,000.00	1	\$150,000.00
Instalación	\$50,000.00	1	\$50,000.00

\$763,250.00

Tabla 7
Costos Mantenimiento.

Cotos Mantenimiento	Precio USD	Cantidad	TOTAL
Ingeniero de planta	\$18,000.00	1	\$18,000.00
Técnicos de servicio	\$6,000.00	3	\$18,000.00
Accesorios de limpieza	\$1,000.00	5	\$5,000.00

\$41,000.00

Tabla 8
Generación.

Generación	Valor	Dimensional
Cantidad de generación por pistón	19,112.61	kW
Eficiencia de la turbina	90	%
Cantidad real de generación por pistón	17,201.35	kW
Cantidad de energía generada por 15 pistones	258020.235	kW
Cantidad de kWh en un mes generado por 15 pistones	185,774.57	KW
Precio por kWh pagado	0.8	Q
Total mensual en quetzales	148,619.66	Q
Total mensual en dólares	18,577.46	\$

Tabla 36
Balance neto del proyecto

No. Años	Costos iniciales	Costos mantenimiento	Gastos	Generación	Ingresos y egresos netos	Balance neto
0	\$(763,250.00)	\$-			\$(763,250.00)	\$(763,250.00)
1	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$(591,320.52)
2	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$(419,391.03)
3	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$(247,461.55)
4	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$(75,532.07)
5	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$96,397.42
6	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$268,326.90
7	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$440,256.38
8	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$612,185.86
9	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$784,115.35
10	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$956,044.83
11	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$1,127,974.31
12	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$1,299,903.80
13	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$1,471,833.28
14	\$-	\$(41,000.00)	\$(10,000.00)	\$222,929.48	\$171,929.48	\$1,643,762.76

* Los costos fueron establecidos mediante una aproximación de precios de una empresa privada dedicada a distintos proyectos hidroeléctricos.

El análisis económico descrito anteriormente está basado en la generación de energía constante durante 24 horas al día y 30 días al mes.

XV. DISCUSIÓN.

A. Antecedentes.

1. **Energía de las corrientes marinas.** Al analizar las características de las corrientes marinas en las costas de Guatemala, se obtiene que el país sí cuenta con la velocidad de corrientes necesaria para la generación de este tipo de energía; a esta conclusión se llegó mediante la comparación realizada en la Tabla 2. Sin embargo, este método no sería factible para el país; debido a los altos costos de construcción, instalación y mantenimiento que este tipo de maquinaria exige, y el país no cuenta con los recursos necesarios para ello. Mientras que otros países como el Reino Unido (pionero en este tipo de energía), sí cuenta con fondos gubernamentales destinados a la investigación y aplicación de nuevas tecnologías, por lo tanto este país sí puede costear este tipo de proyectos.

2. **Energía mareomotriz.** La energía mareomotriz es una energía que se puede instalar en Guatemala a pequeña escala, debido a que las condiciones de las mareas en el país no son las ideales para desarrollar un proyecto de este tipo a gran magnitud. El nivel de altura en las costas del pacífico del país son de 1.5 metros de altura y los diferenciales de altura en otros países son entre 5 y 7 metros.

El índice que más afecta el desarrollo de un proyecto a gran escala es la inversión en equipo e infraestructura para realizarlo, la planta la Rance en Francia tiene un costo por MW instalado de 400,000 euros para 1967, debido que al tener un bajo diferencial de altura se deberá realizar una mayor infraestructura ya sea un embalse o trabajar con un conjunto de estuarios para capturar más agua y así generar mayor potencia, provocando un retorno de inversión a un mayor plazo.

3. Energía undimotriz. Gracias a la investigación bibliográfica que se realizó sobre la energía undimotriz y las distintas variantes de sistemas para su instalación, se pudieron obtener datos relevantes como: capacidad de generación, costo aproximado de instalación, requisitos para su funcionamiento y mantenimiento y materiales de construcción para cada método. Dentro de esta investigación se incluyen también las características de oleaje de la costa del Pacífico nacional, el cual se consideró el más adecuado para este tipo de instalación, entre las que resaltan la altura y período de las olas dentro de cierto rango de tiempo de acuerdo datos publicados por el INSIVUMEH. Luego de realizada esta investigación es válido decir que Guatemala tiene el potencial para albergar una instalación de generación de energía undimotriz con una baja capacidad generadora, con lo que se podrá aprovechar al máximo el oleaje nacional sin necesidad de una gran inversión inicial.

B. Diseño y construcción del prototipo a escala.

La fase de construcción de un prototipo a escala que convierta el movimiento de las olas en energía eléctrica comenzó con la planeación del diseño del mismo. Luego de un primer diseño poco eficiente, se logró la creación del diseño de un prototipo final el cual sería utilizado para su experimentación en un canal de olas. Terminada la fase de experimentación, se pudo observar que el prototipo construido funciona de manera correcta ya que ofrece el bombeo de agua a presión para ser utilizado en un proceso continuo de generación de electricidad, por lo que se considera un éxito a pequeña escala de los principios de la energía undimotriz.

C. Mejoramiento del modelo.

Luego de la fase de construcción y durante el período de experimentación del prototipo creado se procede a analizar las posibles mejoras que pueden realizarse al sistema creado y, en un futuro, a un prototipo a escala real instalado en aguas nacionales. Dentro de estas mejoras se incluye la recomendación de materiales ideales para la construcción de cada parte del sistema así como los tratamientos

anticorrosivos recomendados para evitar el daño en las piezas y su constante mantenimiento. Asimismo, se incluyen mejoras tanto a la eficiencia como a la flexibilidad del sistema en cuanto a los cambios en el oleaje que se presenten. Finalmente, se consideran métodos para su instalación donde se incluye la combinación de un sistema de tubería a presión y un embalse para suministrar el fluido constante a las turbinas generadoras. Gracias a estas mejoras analizadas, y algunas implementadas al prototipo a escala, se pudo lograr el incremento en la eficiencia del sistema y dejar una base sólida para su futura instalación en una nueva fase del proyecto.

D. Teoría hidráulica aplicada, cálculos y resultados.

- Para realizar un análisis completo del sistema propuesto, se dividieron los cálculos en tres secciones: análisis de las olas en el lugar de instalación, análisis del prototipo y análisis del sistema en general. Al analizar las características de las olas del lugar de instalación del prototipo a escala, se obtuvo que estas olas se describen mediante la teoría de ondas no lineal, ya que tienen un periodo (T) corto y amplitud de onda (λ) pequeña en relación a la altura de la ola (H); por lo tanto, se aplicó la Teoría de Stokes para analizar sus propiedades. Tras realizar los cálculos se obtuvo que las olas cuentan con una potencia de 7.29 W por metro de frente de ola, lo cual es una potencia aceptable de acuerdo a las dimensiones de las mismas.
- Se consideró una eficiencia de la turbina como el 40% debido a que esta no fue construida tomando en cuenta normativas de diseño ya establecidas.

E. Potencia generada por el sistema en el lugar de instalación.

- El prototipo a escala instalado en las condiciones del oleaje del Litoral del Pacífico generaría una potencia de 31.713 W, lo cual es 15 veces mayor a la potencia generada en el canal de olas del laboratorio en donde se ensayó; sin embargo no es un cálculo confiable debido a que el prototipo a escala no

soporta las condiciones a las que se vería expuesto, por lo tanto existe un margen de error abismal en el análisis de este método.

- El prototipo a escala redimensionado es un método aproximado más a la realidad, debido a que se diseña un nuevo pistón tomando como referencia un factor de escala del prototipo que ya ha sido construido y ensayado.
- La productividad del sistema a escala redimensionado es de 14,036.30 kWh/mes, lo cual llegaría a satisfacer la demanda energética de 33 viviendas unifamiliares promedio que consumen aproximadamente 420 kWh/mes; sin embargo, para que este sistema sea más rentable se propone la instalación de 15 prototipos a escala real en el Litoral del Pacífico de Guatemala, para así producir 0.292 MW y brindarle energía eléctrica a 510 hogares. Por lo tanto, se concluye que la implementación del sistema en el Litoral del Pacífico de Guatemala contribuiría de gran manera a cubrir la demanda energética del país, causando un impacto positivo al desarrollo social y económico.

F. Demostración del principio hidráulico.

- El porcentaje de error obtenido en la comparación del caudal teórico y el práctico fue de 18.35%, lo cual es un resultado justificable debido a que el caudal teórico se midió respecto a una sola etapa del funcionamiento de los dos prototipos funcionando de forma simultánea y en realidad el caudal que llegaba al final de la tubería era la suma de las dos etapas de los dos prototipos en funcionamiento, no sólo una de ellas.
- Mediante los ensayos prácticos se pudo comprobar que mientras más grande sea el área de las boyas a utilizar en el sistema, más fuerza ejercerá el pistón sobre el volumen de agua que desplazará y se obtendrá una presión mayor; la cual afecta de forma directa a la velocidad de salida del caudal hacia la turbina y lograría una mejor eficiencia. En los ensayos del laboratorio, el tamaño del canal limitó el área de las boyas a utilizar, por lo tanto no se pudo lograr el funcionamiento adecuado.

G. Determinación ubicación ideal para la instalación del prototipo.

Para la instalación del prototipo por medio de energía undimotriz, debido a las comparaciones entre las figuras se determinó que la ubicación ideal y viable es de aproximadamente 127.3 km², ubicándose en las costas de Retalhuleu, entre Escuintla y Suchitepéquez y entre Santa Rosa y Jutiapa. Para esto se tomó en cuenta factores como la contaminación, batimetría, pesca, áreas protegidas, flora, fauna y estuarios en la costa del pacífico de Guatemala.

H. Factores que afectan su funcionamiento.

Los factores externos que afectan el desempeño del prototipo está el ensuciamiento que este puede tener debido a contaminación local y a vida marina que se aloje cerca o en el prototipo. Esto provocará un mantenimiento constante con la eliminación de entes que se alojen directamente en él causando un aumento en los costos de producción de la energía eléctrica. Un riesgo alto que puede tener una instalación de prototipos es en la navegación marina, debido a que son difíciles de detectar pudiendo provocar colisiones.

I. Efectos en el medio ambiente.

Desde el punto de vista biológico una granja de prototipos instalados en el océano fomenta el crecimiento en la biodiversidad local, ya que reduce la sobrepesca en la zona. El impacto ambiental que el prototipo provoca sobre las costas del Pacífico de Guatemala es bajo comparado con algún tipo de energía no renovable. Prototipos instalados en la costa pueden afectar el oleaje y esto a la vez la línea costera, el ruido que estos emanan es muy bajo debido a que el pistón se encuentra sumergido. Los efectos visuales son bajos ya que casi todo el equipo se encuentra sumergido y se ubica distante de la costa.

Entre las ventajas de la instalación de este prototipo es que no utiliza hidrocarburos para su funcionamiento, no emite gases CO₂, no utiliza lubricantes o aceites para su funcionamiento y no necesita de electricidad para operar el pistón eliminando los

riesgos de electrocución a la vida local marina. Luego de la vida útil de los prototipos estos equipos se pueden utilizar como arrecifes artificiales.

XVI. CONCLUSIONES.

- Sí es posible generar energía eléctrica, limpia y económicamente factible; utilizando los principios de la generación Undimotriz, aprovechando la diferencia de alturas entre el valle y la cresta de las olas para generar un caudal.
- No es posible generar energía eléctrica en Guatemala utilizando la generación maremotérmica. A pesar de que la región se encuentra en una área favorable para las temperaturas de agua en la superficie, no cuenta con aguas altamente profundas cercanas a las costas. Ya que no se cuentan con aguas altamente profundas la generación maremotérmica no es posible, y de encontrar pequeñas áreas con las profundidades necesarias, estas se encuentran lejos de las costas encareciendo altamente el proyecto por la larga distancia para la conexión o en el peor de los casos que la conexión no sea posible.
- Se concluye que las corrientes marinas en las costas de Guatemala cuentan con la velocidad necesaria para instalar un prototipo que genere energía eléctrica a partir de ellas, sin embargo la maquinaria requerida para este método es muy compleja y costosa, y el país no cuenta con los suficientes recursos para su instalación.
- La rentabilidad de la energía mareomotriz en Guatemala no es la adecuada, debido a los altos costos de inversión y el bajo diferencial de alturas en las mareas que es de 1.5m.
- Estudiando los principios de la generación undimotriz, se logró diseñar un prototipo que permite la generación de energía eléctrica de una manera constante, limpia y menor costo en comparación a las demás opciones que encontramos de energía renovable.

- Se construyó un prototipo utilizando pistones los cuales permiten aprovechar la diferencia de alturas de las olas, los cuales generan un caudal que permite mover una turbina.
- El proceso de construcción tuvo varias etapas, en la primera etapa se descartó el primer prototipo. Después se construyó el segundo prototipo y se realizaron varias pruebas y ensayos en el laboratorio. Lo que permitió llegar al proceso de mejoras, para lograr maximizar el aprovechamiento de la diferencia de alturas de las olas. Esto permitió llegar a la última etapa donde el prototipo funciona como lo esperado.
- Se realizaron varios ensayos que permitieron verificar y mejorar el funcionamiento, ya que se encontraron pequeños detalles que modificándolos permitían ayudar al mejor funcionamiento, como lo fue el cambio de dirección del eje del pistón. Permitiendo que el prototipo funcionara de una manera más eficiente.
- En la teoría hidráulica, para analizar las características cinemáticas de las olas con las que se trabajó en los ensayos de laboratorio, se utilizó la Teoría de Stokes.
- Para analizar el funcionamiento del prototipo se utilizaron las ecuaciones para calcular el caudal en una tubería y se concluyó que el caudal generado por el pistón y que atravesaría las tuberías sería de $0.00009621 \text{ m}^3/\text{seg.}$, el cual a su vez le proporcionaba una velocidad inicial al sistema de 0.1 m/s .
- Las fuerzas boyantes de ambas boyas se calcularon utilizando el Principio de Arquímedes.
- La fuerza boyante del pistón es la diferencia de las dos fuerzas boyantes que actúan sobre él debido a que estas actúan al mismo tiempo y se contrarrestan entre sí.

- La caja unificadora de caudal o Manifold no le causa pérdidas significativas al sistema construido a escala, por lo tanto estas se pueden despreciar.
- Para el cálculo de la velocidad de salida del sistema se aplicó la ecuación de Bernoulli, dando un resultado de 2.581 m/s. Dicho resultado fue indispensable para el proceso del diseño de la turbina que se utilizó para el prototipo a escala.
- La potencia teórica del prototipo a escala es de 2.643 W, por lo tanto la potencia teórica generada por los dos prototipos a escala es de 5.285 W. Mientras que la potencia real generada por los dos prototipos a escala es de 2.114 W, con lo cual se encienden aproximadamente 53 focos LED de 40mW.
- La potencia que generaría el prototipo a escala real instalado en el Litoral del Pacífico es 19.495 kW.
- Para comprobar la teoría hidráulica aplicada al sistema fue necesario realizar distintos ensayos de laboratorio que proporcionen los datos requeridos por las ecuaciones a utilizar, así como también para verificar las diferencias entre el funcionamiento teórico y práctico tanto del prototipo como del sistema en general.
- En la costa del pacifico de Guatemala el área viable de instalación es de 127.3 km². Ubicados en a lo largo de los departamentos de Retalhuleu, Suchitepéquez, Escuintla, Santa Rosa y Jutiapa.
- El prototipo es afectado por el encrustamiento de organismos marinos y la contaminación local.
- El prototipo afecta al medio ambiente ayudando a la vida marina ya que reduce la sobrepesca en la zona de instalación. Es un medio que no emite contaminación de sólidos, tiene un bajo impacto visual y de ruido.

- Con el análisis de las leyes del país que involucran la generación de energía renovable se logró determinar todos los requisitos que se deben cumplir para poder instalar y vender la energía generada por el sistema diseñado. Determinando que si es posible la instalación y venta de energía utilizando el sistema, utilizando las leyes y reglamentos que aplican a las hidroeléctricas.
- Para poder instalar y vender la energía generada por el sistema diseñado, básicamente se necesita realizar los todos los procesos legales siguiente orden: (I) EIA, (II) requisitos MEM, (III) requisitos CNEE, (IV) resoluciones del MARN, MEM y CNEE; y (V) AMM .
- Ingresando a las páginas del MEM, AMM, MARN, CNEE se logró identificar los procesos y regulaciones que se deben cumplir para la instalación, generación y venta utilizando el sistema diseñado.
- Se logró observar que las leyes en general y el MEM no cuentan con información, ni reglamentos en específico para la instalación del equipos de generación en las costas del país, por lo que se deben de seguir los lineamientos que se usan para una hidroeléctrica.
- El MARN no cuenta con la información necesaria para la entrega de sus requisitos por lo que es necesario contratar a un consultor ambiental para poder realizar todos los trámites necesarios.
- El proyecto tiene un costo inicial de \$5763,250; sin embargo, el tiempo de retorno de inversión se puede estimar entre 4 y 5 años, lo cual indica que sí es rentable tomando como parámetro de comparación proyectos de energía hidroeléctrica en el país.

XVII. RECOMENDACIONES.

- Existen distintas recomendaciones útiles a implementar en caso que se quiera seguir con el proyecto, utilizándolo como un punto de partida, o utilizándolo como referencia para un nuevo proyecto. La más importante, es calcular y administrar de manera eficiente el tiempo disponible. El tiempo es uno de los factores más importantes a considerar dentro de un proyecto, especialmente en uno como este tipo donde se debe partir de la nada para la creación de un producto final. El tiempo en este proyecto fue dividido en tres partes: investigación, fabricación y experimentación. Sin embargo, es importante señalar que el proyecto hubiera funcionado de una mejor manera si se hubiera llevado un estricto control sobre las actividades del cronograma y su realización de manera puntual.
- Es importante señalar que durante la etapa de experimentación de los prototipos creados la falta de un canal apropiado para su realización fue un problema inicial. Cuando se construyó el prototipo a escala, se tuvo que moldear a las propiedades y dimensiones del canal hidráulico proporcionado, algo que no asemeja a una instalación en campo. Por eso mismo, es importante considerar que para la realización de las pruebas de laboratorio no se contó con el equipo ideal, ya que una piscina de olas o un ámbito parecido hubiera mostrado resultados más reales
- Desde un inicio, las condiciones y el lugar donde se realizarán sus pruebas deben ser tomados en cuenta para no tener atrasos en el proceso de construcción y problemas en los ensayos.
- Otra de las recomendaciones radica principalmente en el funcionamiento y construcción del prototipo. Se debe considerar el funcionamiento de las boyas bajo el oleaje inferior, es decir, sumergir completamente el sistema con el objetivo de proteger las boyas de los agentes externos que le afecten en la superficie marina. Además, se debe considerar una carrera más grande para el

vástago del pistón a la hora de su construcción con el objetivo de ofrecer una mayor flexibilidad al sistema cuando se cuente con un oleaje de mayor amplitud o cuando el sistema tenga que trabajar bajo el efecto de un desastre natural.

- Se recomienda experimentar e invertir en el estudio y experimentación alrededor de este tipo de energía. Si bien este tipo de energía no es el mayor generador dentro de las energías limpias, es una opción viable para su estudio e instalación en el país, ya sea con este o distintos sistemas. La energía a partir de las olas debe servir como una fuente para desarrollo y empleo en el país, en especial a las comunidades y personas que estén directamente involucradas y beneficiadas por estos proyectos.
- Por motivos prácticos, en el presente trabajo se mostraron únicamente dos métodos para describir el movimiento de las olas: la teoría lineal y no lineal; sin embargo, las olas que se encuentran en el mar son totalmente irregulares, turbulentas e impredecibles, estas se analizan mediante distintas teorías aplicadas específicamente al estudio del oleaje real. Para la instalación del prototipo a escala real se recomienda analizar las olas considerando dichas teorías para describir su movimiento de una manera más exacta y eficiente.
- Durante el análisis del sistema en general, se pudo observar que los cálculos de las pérdidas por fricción en las tuberías se pudieron haber obviado debido a que los resultados fueron despreciables y no afectaron de gran manera el resultado; sin embargo, al considerar la instalación del prototipo a escala real, estas pérdidas aumentan, ya que aumentará la longitud de las tuberías y el diámetro de las mismas, según sea el caso, por lo tanto estos valores ya serían significativos.
- Para los cálculos se consideró que la caja unificadora de caudal no le provocaría pérdidas de energía significativas al sistema; sin embargo, de la

misma manera en la que ocurre con las tuberías, la magnitud de estas pérdidas crecerá de acuerdo al tamaño del prototipo, ya que la caja unificadora de caudal tendrá que ser capaz de almacenar todos los caudales de las tuberías que llegan a ella; por lo tanto estas pérdidas deben ser consideradas.

- Para lograr un funcionamiento óptimo, los dos prototipos se deben colocar de forma paralela y no en serie, esto se realiza para que las olas que chocan con las boyas de un prototipo no lleguen con una menor cantidad de energía al segundo prototipo y este no trabaje de forma eficiente.
- Si por requerimientos de fabricación de la turbina se desea aumentar la velocidad de salida del flujo de las tuberías, se debe disminuir el diámetro de estas mediante accesorios, ya que mientras menor sea el área, el agua saldrá con más presión.
- Para elegir la turbina a utilizar a escala real, se deben tomar en cuenta aspectos propios de las características del lugar de instalación del prototipo, la potencia teórica que este generará y el presupuesto con el que se cuenta para el desarrollo del proyecto, por lo mismo se recomienda acudir a un experto en el tema que cuente con los criterios de selección y la experiencia necesaria para definir el tipo de turbina más conveniente para el sistema.
- El salto neto o cota piezométrica de la turbina (H) depende de la topografía oceanográfica del lugar de instalación; en este trabajo se asumió un salto neto de 100 m, lo cual es un dato incorrecto, ya que para determinar el valor se requieren datos exactos sobre la profundidad del mar y el lugar en el cual se ubicará la turbina en la superficie.
- Para el desarrollo de este proyecto se asumió que la turbina a escala real en el lugar de instalación trabajaría las 24 horas del día los 7 días de la semana durante un mes; sin embargo, a esta cantidad se le debe restar las horas de mantenimiento mensual que se le darán a la turbina para que no sufra desgastes mayores y su funcionamiento y eficiencia no se vean afectados.

- Se recomienda realizar un estudio de campo en las regiones evaluadas para analizar las condiciones teóricas con las existentes. Debido a que las fuentes tomadas tienen ya varios años de haberse realizado, por lo que algunos cambios pudieron ocurrir. Hacer análisis de contaminación en el agua al igual que realizar planos batimétricos en las zonas de interés, ya que en la actualidad existe escasez de información. La instalación del prototipo se debe realizar cerca a la costa para evitar aumentar costos de instalación y facilidad de mantenimiento y lejana a las principales rutas marítimas para evitar colisiones con embarcaciones.
- Se recomienda efectuar mantenimiento al equipo cada dos semanas para que el desempeño de este no se vea afectado por la flora y fauna local. El ensuciamiento provocado por las condiciones marinas es muy alto por lo que se recomienda utilizar algún tipo de químico no tóxico para evitar la acumulación de sedimento o animales en el prototipo.
- Se recomienda ubicar iluminación en las boyas que están sujetas al prototipo al igual que proporcionar mapas de localización de los prototipos esto reducirá enormemente las colisiones con buques, barcos o lanchas que se muevan cerca de la zona de instalación. Tener sumo cuidado con las líneas de transmisión no ubicándolas en la ruta migratoria de aves, ya que en algunas partes se instalan de manera aérea. La tubería que transporta el caudal necesario para impulsar la turbina esta debe ser ubicada en el fondo del océano y luego dirigirla hacia la casa de máquinas en regiones que no afecte el medio ambiente. Realizar mediciones de ruido a escala 1:1 para evaluar los efectos reales que se pueden tener.
- Para los aspectos legales se debe tomar mucha atención ya que son muchas las entidades del gobierno involucradas en las cuales cada una depende de la autorización de las demás para aprobar el proyecto, por lo que un documento

que no se entregue o se realice de manera errónea detiene todo el trámite con todas las entidades involucradas. Esto puede ocasionar atrasos, pérdida de dinero y en el peor de los casos que el proyecto no sea aprobado.

XVIII. BIBLIOGRAFÍA.

- Administrador del Mercado Mayorista, Guatemala CA. <http://www.amm.org.gt/>
- Amundarain, M. (2012). La energía renovable procedente de las olas. Recuperado de:
http://www.ehu.es/ikastorratza/8_alea/energia/energia.pdf
- Anónimo. (2008). *Marine Current Turbines, LTD*. Sea Generation. Recuperado de:
<http://www.seageneration.co.uk/index.php>
- Anónimo. (2010). *Infografía: Energía de las corrientes marinas*. Eroski Consumer. Recuperado de:
http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2010/02/07/190207.php
- Anónimo. (2009). Dispositivos de generación de energía a través de las olas. Recuperado de: <http://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>
- Anónimo. (2009). *Dispositivos de generación de energía a través de las olas*. Recuperado de: <http://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>
- Anónimo. (2011). *Energías del mar*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). Recuperado de:
<http://www.idae.es/index.php/id.513/re/menu.310/mod.pags/mem.detalle>
- Anónimo. (2012). *Energía del Oleaje*. Educación Ambiental. Recuperado de:
<http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>

- Anónimo. (2012). Alternative energy sources: Tidal energy and wave energy.
Recuperado de: <http://cammiebar.hubpages.com/hub/Alternative-Energy-Sources-Tidal-Energy>
- Anónimo. (2012). *Alternative energy sources: Tidal energy and wave energy*.
Recuperado de: <http://cammiebar.hubpages.com/hub/Alternative-Energy-Sources-Tidal-Energy>
- Anónimo. (2013). «Oleaje de las costas del Océano Pacífico de Guatemala». *Boletín informativo del oleaje*. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). 1 (34):1-5.
- Anónimo. (2013). *Waves*. Hyperphysics. Recuperado de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/waves/watwav2.html>
- Arrivillaga, A. (2003). Diagnóstico Del Estado Actual De Los Recursos Marinos Y Costeros De Guatemala. En A. Arrivillaga, *Informe Ambiental De Guatemala 2002 Y Bases Para La Evaluación Sistemática Del Estado Del Ambiente* (págs. 6-59). Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
- AW-Energy. (2012). WaveRoller Concept. Recuperado de: <http://aw-energy.com/about-waveroller/waveroller-concept>
- Bonjean F. and G.S.E. Lagerloef. (2002). *Diagnostic Model and Analysis of the Surface Currents in the Tropical Pacific Ocean*. Journal of Physical Oceanography. 150 págs..
- Carnegie Wave Energy Limited. (2013). Fremantle Wave Energy Research Facility. Recuperado de: <http://www.carnegiwave.com/index.php?url=/ceto/ceto-development-freo-facility>

Carnegie Wave Energy Limited. (2013). What is CETO. Recuperado de:
<http://www.carnegiewave.com/index.php?url=/ceto/what-is-ceto>

Castillo, Cristian. (2011). *Energía mareomotriz, de las olas, maremotérmica y minihidroeléctricas*. Tesis de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. 58 págs.

Chen, O. (2010). *Oxford Unveils Next-Gen Under Water Turbines*. Inhabitat. Recuperado de: <http://inhabitat.com/oxford-engineers-transverse-horizontal-axis-water-turbine/>

Comisión Nacional de Energía Eléctrica, Republica de Guatemala.
<http://www.cnee.gob.gt/>

CONAP, MARN, SEGEPLAN, FONACON, SIGAP, TNC, WCS, CI, WWF, and Instituto De Incidencia Ambiental. (2009). Analisis De Vacios Y Omisiones Para El Pacifico De Guatemala. En M. S. CONAP, *Planificacion Para La Conservacion Marina* (págs. 1-77). Guatemala.

Consumo de energía eléctrica (KWh per cápita). (2013). Banco Mundial, Agencia Internacional de la Energía (AIE). 5 págs.

Council, O. E. (2012). *Tidal Energy*. Recuperado el 16 de Octubre de 2012, de <http://www.oceanenergycouncil.com/index.php/Tidal-Energy/Tidal-Energy.html>

Córdoba, Diego. (2011). *Ecuaciones de Navier-Stokes*. Barcelona. 22 págs.

Creus, Antonio. (2011). *Neumática e Hidráulica*. 2ª ed. Barcelona. Marcombo, S.A. 305 págs.

De Keulenaer, H. (2007). Seawave slot-cone generator (SSG). Recuperado de:
<http://www.leonardo-energy.org/seawave-slot-cone-generator-ssg>

Deffis Caso, Armando. Energía. Fuentes primarias utilización ecológica. México DF, Editorial Arbol, 1999.

Díaz, Jaime. (2006). *Mecánica de Fluidos e Hidráulica*. 1ª ed. Cali. Editorial de la Universidad del Valle. 201 págs.

Discovery, T. (2013). *Playas del Pacífico en Guatemala*. Recuperado el 13 de Octubre de 2013, de Tropical Discovery:
http://www.tropicaldiscovery.com/regions_guate/pacific/vacaciones.php

Ecotricity. (2013). Seamills: Our Green Energy. Recuperado de:
<http://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/our-green-electricity/and-the-sea/seamills>

Energía mareomotriz, presente y futuro en Guatemala 2005 Guatemala Universidad San Carlos de Guatemala

Energías del mar. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE).
 Recuperado de:
<http://www.idae.es/index.php/id.513/re/menu.310/mod.pags/mem.detalle>

FAO. (2013). *Uso de medidas técnicas en la pesca responsable: regulación de artes de pesca*. Recuperado el 16 de Abril de 2013, de
<http://www.fao.org/docrep/008/y3427s/y3427s04.htm>

Fernández, Pedro. (2010). *Energía de las Olas*. Departamento de Energía Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, España. 60 págs.

Fernández, Pedro. (2011). *Turbinas Hidráulicas*. Departamento de Energía Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, España. 148 págs.

Gabiña, Julio. (2010). *Turbinas submarinas que aprovechan energía de las mareas*. Prospectiva y estrategia aplicada al desarrollo sostenible. Recuperado de: <http://juanjogabina.com/2010/09/05/turbinas-submarinas-que-aprovechan-la-energia-de-las-mareas/>

Gálvez, Armando. (2012). *La desaprovechada energía del mar*. Ecología verde. Recuperado de: <http://www.ecologiaverde.com/tag/energia-marina/>

González, Jaime. (2009). *Energías Renovables*. 2ª ed. Barcelona. Reverté. 524 págs.

González, Joel. (2012). *Energía undimotriz: el aprovechamiento de la energía de las olas*. Recuperado de: <http://www.fierasdelaingenieria.com/energia-undimotriz-el-aprovechamiento-de-la-fuerza-de-las-olas/>

Google Earth. (28 de Septiembre de 2013). Batimetría Guatemala. Guatemala.

Green Peace UK (Producción y dirección). (2008). Wave Power: How it Works. [Video Youtube]. Londres; Inglaterra. Recuperado de: http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=F0mzrbfzUpM

Guatemala. (2012). Instituto Nacional De Sismología, Vulcanología, Metereología E Hidrología. *Departamento de Hidrología*. Recuperado de: <http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia.html>

Hale. M. (2012). Wave Power Generation: Salter's Duck. Recuperado de: <http://people.bath.ac.uk/mh391/WavePower/saltersduck.html>

- Hammons, T. J. (1993). Tidal Power. En *Proceedings of the IEEE* (págs. 419-433).
- Huertas, Carlos. (2006) “*The EIA approach to wave energy within the European Research Training Network Wavetrain*”. International Conference on Ocean Energy. Bremerhaven, Germany.
- Ibáñez, Pedro. (2006) “*Energía Marina: Situación actual y perspectivas*”. Workshop Red de Pilas de Combustible, Baterías e Hidrogeno. Sevilla, España.
- INSIVUMEH. (17 de Agosto de 2013). *Mareas para la costa del Pacificos*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2012, de INSIVUMEH
OCEANOGRAFIA: <http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia.html>
- International Energy Agency. (2012). *Key World Energy Statistics*. Recuperado de: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf>
- Laleu, V. d. (2009). La Rance Tidal Power Plant 40-year operation feedback –Lessons learnt. *BHA Annual Conference* (pág. 40). Liverpool: eDF.
- Lima. (2012). Ministerio de Energía y Minas. *Guía del consumo y facturación de energía eléctrica*. Perú, Gobierno de la República. 2 págs.
- Maldonado, Francisco. (2005). *Diseño de la turbina de un río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán-Región Loreto*. Tesis de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. 69 págs.
- Martínez, Álvaro. (2010). *Obteniendo energía gracias a vórtices en el agua*. Recuperado de: <http://desenchufados.net/vivace-obteniendo-energia-gracias-a-vortices-en-el-agua/>

McGrath, J. (2011). Could Salter's Duck have solved the oil crisis? Recuperado de:
<http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/salters-duck1.htm>

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno de Guatemala.
<http://www.marn.gob.gt/>

Ministerio de energía y minas, Gobierno de Guatemala. <http://www.mem.gob.gt/>

Morris Arroes S.L. (2012). PowerBuoy, el pistón marino. Recuperado de:
<http://www.morissarroes.es/powerbuoy-el-piston-marino/>

Mott, Robert. (2006). *Mecánica de fluidos*. 6ª ed. México. Pearson Educación.
503 págs.

NASA. *Ocean Motion and Surface Currents*. Recuperado de:
<http://oceanmotion.org/html/resources/oscar.htm>

Náutica y Embarcaciones. (2012). Boyas marinas. Recuperado de:
<http://www.nauticayembarcaciones.com/articulos-nauticos/boyas-marinas.html>

Ocean Motion and Surface Currents. Recuperado de:
<http://oceanmotion.org/html/resources/oscar.htm>

Ocean Power Technologies. (2013). Technology. Recuperado de:
<http://www.oceanpowertechnologies.com/technology.htm>

Olivella, José. (1998). *Teoría del buque: ola trocooidal, movimientos y esfuerzos*.
Barcelona. Edicions UPC. 200 págs.

Ortega, Manuel. (2006). *Lecciones de Física*. 9ª ed. México. Monytex. 152 págs.

Ortíz, Agustín. (2012). « *Consumo de energía sube 4.2% en el 2012*». *Prensa Libre* [Guatemala]. 17 de diciembre, pág. 30.

Palazzesi, A. (2009). Pelamis, la serpiente marina robótica que proporciona energía eléctrica. Recuperado de: <http://www.neoteo.com/pelamis-la-serpiente-marina-robotica-que>

Peace Trees (Producción y dirección). (2011). SEARASER Wave Energy Device – How it Works [Video Youtube]. Londres, Inglaterra. Recuperado de: http://www.youtube.com/watch?v=_9jGis5V5LE

Pidwirny, M. Scott, J. (2010). *Physical Geography*. Recuperado de: <http://www.physicalgeography.net/>

Proyecciones. (2011). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Buenos Aires. Buenos Aires. 80 págs.

Ramírez, Erick. (2010). *Vivace: Energía hidráulica ecológica*. Hydroenergía.net. Recuperado de: http://www.hidroenergia.net/index.php?option=com_content&view=article&id=64:vivace-tecnologia-ecologica&catid=35:innovaciones&Itemid=63

Resnick, Rob; Halliday, David. (2004). *Física*. 4ª ed. En español, México. CECSA. 257 págs.

Ruskell, Mike. (2012). *Scottish Power*. Renewable Energy. Recuperado de: <http://bellacaledonia.org.uk/2012/02/03/scottish-power/>

Sabaté Carreras, Pere (2013). NTP 155: Cables de acero. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo; Barcelona, España. Recuperado de: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_155.pdf

SDE. Ltd. (2012). Why wave energy? Our unique technology. Recuperado de:
http://www.sde.co.il/index.php?option=com_content&view=article&id=128:our-unique-technology&Itemid=130

Serway, Raymond A.; Jewett, John W. (2004). *Physics for Scientists and Engineers*. 6ª ed. New York. Brooks/Cole. 245 págs.

Sierra, J.P.; Presti, A. (1998). *Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular*. 5ª ed, Barcelona. 34 págs.

Silva, Gustavo. (2002). *Introducción a la hidráulica marina*. Recuperado de:
<http://www.geocities.com/gsilvam/maritima.htm>

Smith, A. (2007). Exciting new British invention. Recuperado de: <http://searaser.net/>

Surf-forecast.com (2012). Mutriku Previsión de olas. Recuperado de: http://es.surf-forecast.com/breaks/Mutriku/forecasts/latest/six_day

Surf-forecast.com (2012). *Mutriku Previsión de olas*. Recuperado de: http://es.surf-forecast.com/breaks/Mutriku/forecasts/latest/six_day

Surf-forecast.com (2012). Povo do Varzim Previsión de olas. Recuperado de:
http://es.surf-forecast.com/breaks/Povoado-Varzim/forecasts/latest/six_day.

Surf-forecast.com (2012). *Povo do Varzim. Previsión de olas*. Recuperado de:
http://es.surf-forecast.com/breaks/Povoado-Varzim/forecasts/latest/six_day.

Surf-forecast.com (2012). Puerto San José Previsión de olas. Recuperado de:
<http://es.surf-forecast.com/breaks/Puerto-San-Jose/forecasts/latest>

Surf-forecast.com (2012). *Puerto San José Previsión de olas*. Recuperado de:
<http://es.surf-forecast.com/breaks/Puerto-San-Jose/forecasts/latest>

Srensen, B. (2011). *Renewable Energy Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics and Planning*. Burlington: Academic.

Tarback, Edward J.; Lutgens, Frederick K. (2000). *Ciencias de la Tierra – Una Introducción a la Geología Física*. 8ª ed. México. 168 págs.

Thorpe, T. W. (1999). *A Brief Review of Wave Energy*. United Kingdom.

Torres, Gonzalo. (2008). *Sea Gen: Turbinas para el fondo marino*. iSON21.
Recuperado de: <http://www.ison21.es/2008/05/06/seagen-turbina-para-la-energia-de-las-mareas/>

UNESCO. (2009). «Un mundo de ciencia: La otra crisis». *Boletín trimestral de información sobre las ciencias exactas y naturales*. 7(2): 1-1

Unión Europea. (2013). Sustainable Energy Systems: Wave SSG. Recuperado de:
http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/gp/gp_events/ocean_energy/1040_wave_ssg_en.pdf

Uppsala Universitet. (09 de Abril de 2013). *Wave Power Project - Lysekil*.
Recuperado el 25 de Marzo de 2013, de ELEKTRICITETSLÄRA:
http://www.el.angstrom.uu.se/forskningsprojekt/WavePower/Lysekilsprojektet_E.html#Ekologi

Wave Dragon (2005). Technology: Wave Dragon. Recuperado de:
http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=35

XIX. ANEXOS.

A. Energía por medio de las corrientes marinas.

Tabla 1. Velocidad de corrientes del Océano Pacífico en las costas de Guatemala, Año 2013

Velocidad de corrientes del Océano Pacífico		
Median Surface Current (92.2W-90.2W, 12.2N-14.2N)		
Date	Mean	Median
	Speed	Speed
	(m/s)	(m/s)
01/01/2013	0.175	0.186
01/06/2013	0.293	0.268
01/11/2013	0.199	0.204
01/16/2013	0.0889	0.0937
01/21/2013	0.18	0.2
01/26/2013	0.258	0.308
01/31/2013	0.434	0.404
02/05/2013	0.503	0.48
02/10/2013	0.532	0.583
02/15/2013	0.471	0.469
02/20/2013	0.4	0.431
02/25/2013	0.424	0.379
03/02/2013	0.478	0.511
03/07/2013	0.452	0.517
03/12/2013	0.54	0.577
03/18/2013	0.644	0.698
04/27/2013	0.188	0.204
05/02/2013	0.17	0.181
05/07/2013	0.13	0.129
05/28/2013	0.168	0.17
06/02/2013	0.182	0.2
06/07/2013	0.167	0.181
06/12/2013	0.215	0.222
06/17/2013	0.161	0.143
06/22/2013	0.214	0.245
06/27/2013	0.221	0.236
Promedio	0.301066667	0.318952778

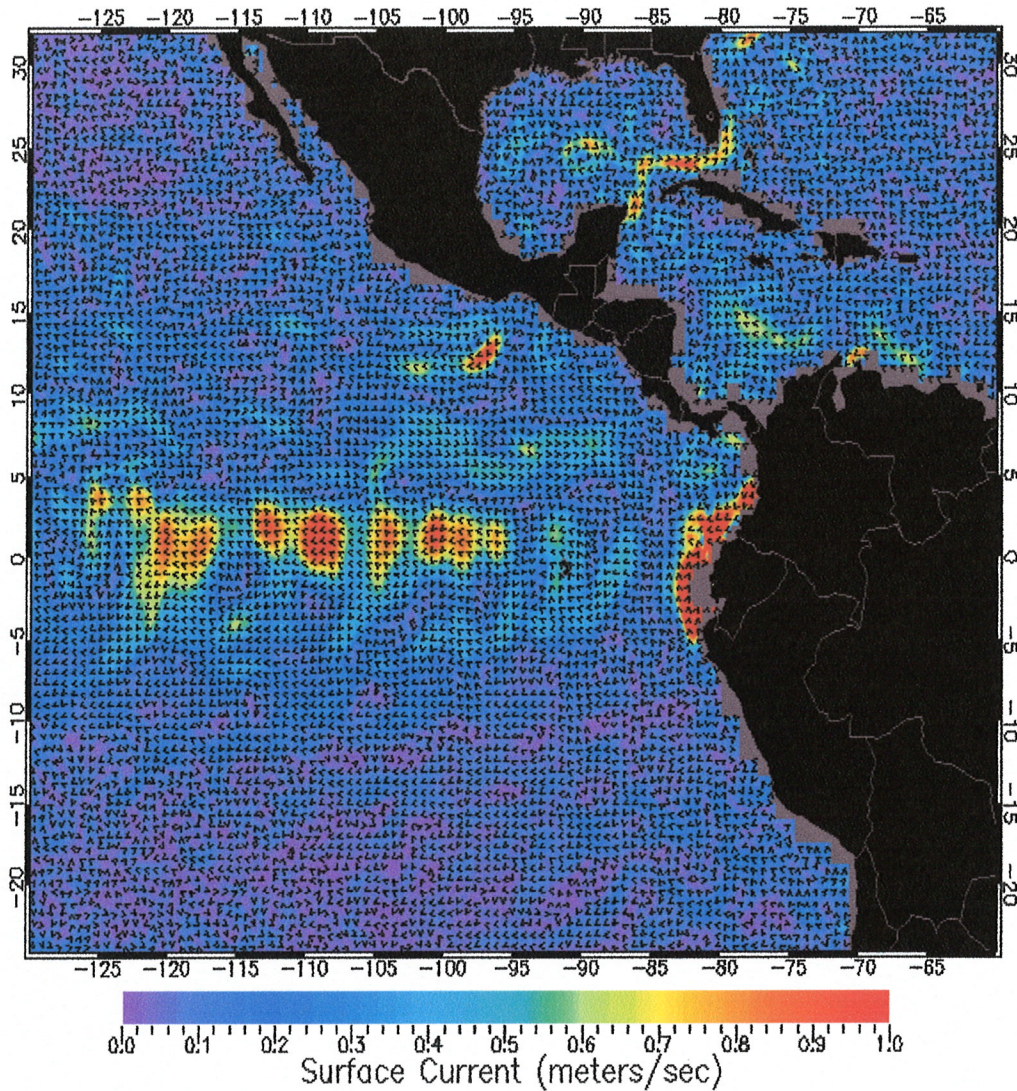
Fuente: NASA. Ocean Motion and Surface Currents. 2013.

Tabla 2. Velocidad de corrientes del Océano Atlántico en las costas de Guatemala, Año 2013.

Velocidad de corrientes del Océano Atlántico		
Median Surface Current (88.2W-86.2W, 16.2N-18.2N)		
Date	Mean	Median
	Speed	Speed
	(m/s)	(m/s)
01/01/2013	0.193	0.154
01/06/2013	0.241	0.24
01/11/2013	0.265	0.259
01/16/2013	0.214	0.241
01/21/2013	0.176	0.214
01/26/2013	0.166	0.181
01/31/2013	0.17	0.142
02/10/2013	0.177	0.187
02/15/2013	0.168	0.199
02/20/2013	0.122	0.146
02/25/2013	0.101	0.113
03/02/2013	0.114	0.115
03/07/2013	0.219	0.258
03/12/2013	0.148	0.11
03/18/2013	0.127	0.128
03/23/2013	0.15	0.151
03/28/2013	0.14	0.146
04/02/2013	0.146	0.131
04/07/2013	0.27	0.211
04/12/2013	0.259	0.274
04/17/2013	0.227	0.226
04/22/2013	0.193	0.205
04/27/2013	0.23	0.223
05/17/2013	0.219	0.19
05/22/2013	0.165	0.125
05/28/2013	0.187	0.204
06/02/2013	0.208	0.221
06/07/2013	0.186	0.214
06/12/2013	0.0877	0.106
06/17/2013	0.238	0.234
06/22/2013	0.282	0.298
06/27/2013	0.366	0.363
Promedio	0.192880556	0.195416667

Fuente: NASA. Ocean Motion and Surface Currents. 2013.

Figura 1. Representación gráfica de las velocidades de corrientes marinas en el continente americano.




Fuente: NASA. Ocean Motion and Surface Currents. 2013.

B. Desarrollo de la hoja de cálculo electrónica.

1. Cinemática de las olas.

Datos determinados experimentalmente:

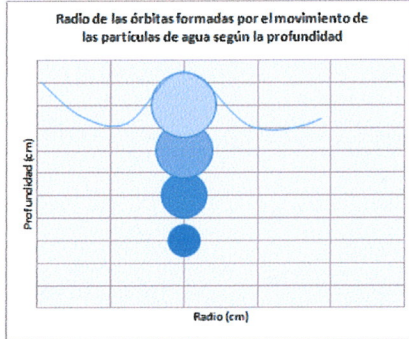
Amplitud de la ola (λ)	0.3	m
Profundidad (h)	0.4	m
Altura de la ola (H)	0.1	m
Periodo de la ola (T)	1	seg
Gravedad (g)	9.81	m/s ²
Densidad del agua (ρ)	1000	kg/m ³
Anchura de la cresta, longitud de frente de Ondas (b)	0.3	m



Desplazamiento vertical de las órbitas formadas por el movimiento de las partículas de agua

r_0 (cm)	h (cm)	r
5	0	5
5	5	1.658E-45
5	10	5.5E-91
5	15	1.82E-136
5	20	6.05E-182
5	25	2.01E-227
5	30	6.65E-273
5	35	0
5	40	0

$r = r_0 e^{-\frac{2\pi}{\lambda} h}$



Radio de las órbitas formadas por el movimiento de las partículas de agua según la profundidad

Determinación de la teoría de ondas a aplicar en el análisis

Relación H/λ	0.333333333
Utilizar:	Teoría de ondas no lineal

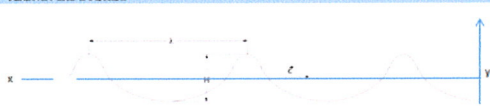
2. Teoría de ondas no lineal.

TEORÍA DE ONDAS NO LINEAL

TEORÍA DE STOKES

Desplazamiento vertical de la ola

x (m)	t (seg)	y (m)
0	0	0.05006879
0.1	1	-0.025033
0.2	2	-0.0250342
0.3	3	0.05006879
0.4	4	-0.0250317
0.5	5	-0.0250395



$$y = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{3}{64} \frac{\lambda^2 H^2}{\pi^2 h^3} \cos\left\{2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)\right\}$$

Velocidad de Traslación de la Ola (Celeridad)

Velocidad de Traslación de la Ola, Celeridad (c)	Componente Horizontal de la Velocidad de la Partícula de Agua	Componente Vertical de la Velocidad de la Partícula de Agua
En aguas profundas, donde $h > \lambda/2$ $c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi}$	$u = \frac{\pi H}{T} \cdot e^{\frac{2\pi y}{h}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$	$v = \frac{\pi H}{T} \cdot e^{\frac{2\pi y}{h}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$
En aguas poco profundas, donde $h < \lambda/2$ $c = \sqrt{g(h+H)}$	$u = \frac{\lambda H}{2hT} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{3}{64} \frac{\lambda^2 H^2}{\pi^2 h^3 T} \cos\left\{2\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)\right\}$	$v = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{y+H}{h} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$

AGUAS PROFUNDAS
Velocidad de Traslación de la Ola (c): 15610634 m/seg

s (m)	t (seg)	y (m)	Componente Horizontal (u), m/s	Componente Vertical (v), m/s
0	0	0.05006679	0.896502633	0
0.1	1	-0.025033	-0.092985887	0.161059324
0.2	2	-0.0250342	-0.092986144	-0.161052903
0.3	3	0.05006679	0.896502632	-2.63443E-05
0.4	4	-0.0250317	-0.092983631	0.161066946
0.5	5	-0.0250355	-0.0929904	-0.161045881

Energía de la Ola (E):	1.104113459 Joules
Potencia de la Ola (N):	7.290493861 W/m

Análisis del Prototipo

$$E = \frac{\rho g \lambda b H^2}{8} \left(1 + \frac{9H^2}{64 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 h^6} \right) \quad N = \frac{\rho g b H^2 c_g}{8} \left(1 + \frac{9H^2}{64 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 h^6} \right)$$

3. Análisis del prototipo.

ANÁLISIS DEL PROTOTIPO

Dimensiones de la boya

hb	0.03 m
a	0.25 m
b	0.095 m

Datos:

Altura de la Ola (H)= L	0.1 m
Diámetro interno del pistón (ϕ)	0.035 m
Densidad del agua (ρ)	1000 kg/m ³
Gravedad (g)	9.81 m/s ²

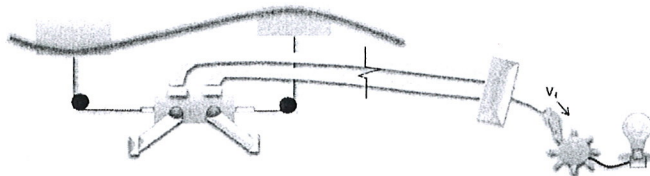
Cálculo del Caudal	Cálculo de Fuerza Bogante		Cálculo de la Presión en el Pistón
	Boya 1	Boya 2	
Área transversal del pistón (A)=	Factor experimental de altura=		Presión (P1)= 16345.92 N/m ²
Volumen de agua desplazado por el pistón (Vp)=	0.75	0.25	
Tiempo de duración de un ciclo (t)=	Volumen desplazado (Vd)=		2.370159 PSI
	0.000962185 m ²	0.00160313 m ³ 0.00063438 m ³	Presión (P2)= 5448.64 N/m ² 0.790053 PSI
Caudal (Q) por cada tubería=	Fuerza Bogante 1 (Fb1)= 15.72666 N	N	Presión en Pistón 10897.28 N/m ² 1.580106 PSI
Caudal (Q) total del sistema=	Fuerza Bogante 2 (Fb2)= 5.242219 N	N	
	9.62115E-05 m ³ /seg	Fuerza en Pistón= 10.48444 N	

<i>Velocidad inicial</i>	
Velocidad inicial (W)=	0.1 m/s

Análisis del sistema general

4. Análisis del sistema.

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD FINAL GENERADA POR EL SISTEMA



ANÁLISIS DEL SISTEMA

Datos Pérdidas por fricción:

Número de Reynolds (Re):	1899.79	
FLUJO: LAMINAR		
Diámetro de la tubería (φ):	0.75	in
φ =	0.0191	m
Área transversal de la tubería (A):	0.0003	m²
Temperatura (C):	20	
Viscosidad cinemática (ν):	0.00001003	m²/s
Material:	PVC rígido	
Rugosidad (ε):	0	m
Velocidad inicial (V _i):	0.0	m/s
Largo de Tubería (L):	1829	m
Caudal (Q):	0.000192423	m³/seg

Cálculo de Velocidad de Salida

Ecuación de Bernoulli

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + h = h_f + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2$$

Datos Bernoulli

V ₁ :	0.1	m/s
2g:	19.62	m/s²
P ₁ :	10897.28099	N/m²
γ:	8800	N/m³
z ₁ :	0.13	m
P ₂ :	0	N/m²
z ₂ :	0.3	m
h:	2.511	m

CÁLCULO DE LA POTENCIA GENERADA POR EL SISTEMA A ESCALA

POTENCIA TEÓRICA DEL SISTEMA

Cálculo de la Potencia Teórica del Sistema

$$P = \rho g Q h_s$$

Con un prototipo a escala se genera:

P ₁ :	2.649	W
P ₂ :	2562.757	mW

Con dos prototipos a escala se genera:

P:	5.298	W
	5298.479	mW

Cálculo de pérdidas por fricción

Flujo Laminar	Flujo Turbulento
f = 0.033687362	Ecuación de Swamee-Jain (Para todo rango de flujo turbulento)
Ecuación de Darcy-Weisbach	$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re\sqrt{0.79}}\right)\right]^2}$
$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$	f = 5.0470888
h_f = 0.002 m	f = 0.0038427
	Ecuación de Darcy-Weisbach en función del caudal
	$h_f = f \frac{8 \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}$
	h_f = 0.022 m

RESULTADO

h_f = 0.002 m

Cálculo de pérdidas localizadas

Per conexión de sección súbita

φ ₁ :	0.75	in
φ ₂ :	0.5	in
φ ₁ & φ ₂ :	0.66666667	
k:	0.13	
ΔL:	0.000666	m

RESULTADO

ΔL = 0.000666 m

Diagrama del funcionamiento de la caja orientadora de caudal

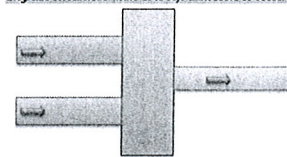


Diagrama simplificado



5. Potencia en el lugar de instalación.

MÉTODO 1

<i>Cálculo de un factor de altura de la ola para el cálculo de potencia</i>			<i>Cálculo de cantidad de sistemas a escala necesarios para generar 100W=1 foco promedio</i>	
Potencia generada por un sistema de dos prototipos:				
Pe=	2.114	W	Cantidad de prototipos (n):	
Altura de ola de ensayos del prototipo a escala (H):			Watts a generar=	100 W
He=	0.1	m	n=	3
Altura de ola del lugar de instalación del prototipo a escala (H):				
Hi=	1.5	m		
factor de altura de la ola:	21.14189986			
P=	31.713	W		

MÉTODO 2

Determinación de las dimensiones del nuevo pistón

Altura de ola en los ensayos de laboratorio (He)=	0.1 m
Longitud del pistón a escala (Le)=	0.12 m
Diámetro interno del pistón a escala (φe)=	0.035 m
Altura de ola en el lugar de instalación (Hi)=	1.5 m
Periodo de la ola en el lugar de instalación (T)=	15 s
Altura piezométrica neta supuesta para el sistema (H)=	100 m

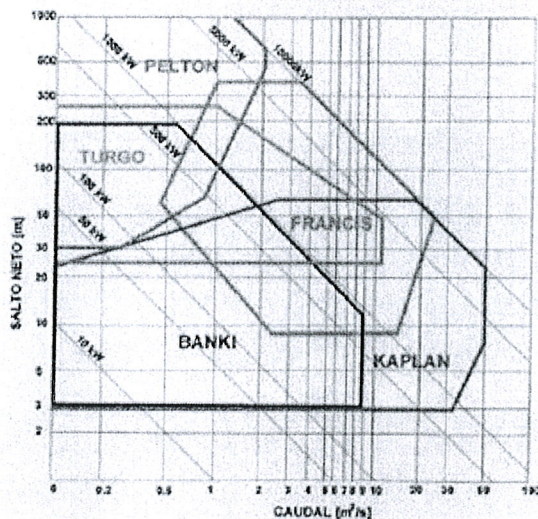
Longitud del nuevo pistón (Li)=	1.8	m
Diámetro interno del nuevo pistón (φi)=	0.53	m

Cálculo del caudal generado por el prototipo

Caudal generado por el pistón= 0.021647537 m³/s

Determinación de turbina a utilizar, potencia del nuevo sistema y productividad del sistema

Eficiencia aproximada de la turbina (%η)= 90 %



CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL NUEVO SISTEMA

P=	19494.883	W
	19.495	KW
	0.019	MW

PRODUCTIVIDAD MENSUAL DEL SISTEMA

P=	14036.30	KWh/mes
----	----------	---------

Cálculo de cantidad de viviendas con consumo de energía promedio beneficiadas con la productividad del sistema al año

Potencia necesaria en una casa promedio=	420.00	KWh/mes
Viviendas beneficiadas	33	

Figura 2. Artículo sobre el megaproyecto publicado en el Diario La Hora, Guatemala.

La Hora
Guatemala, 23 de agosto de 2013, Página 21

Universidad

Un esfuerzo conjunto de Diario La Hora y la Universidad del Valle de Guatemala para enfocar los problemas del país y sus soluciones.

Excelencia que trasciende

El agua, un recurso energético

Trabajos hechos por estudiantes de Ingeniería Civil de la UVG aportan nuevos datos

FOR INGENIERO COMO LIDERAR
Soylen DÍAZ

La hidrónica debería ser una pasión para los ingenieros civiles con especialidad en estructuras e infraestructuras.

Tradicionalmente, en Guatemala, la hidrónica, más de las áreas del plan de estudio de Ingeniería Civil de la UVG, no despierta mucho entusiasmo en los alumnos ya que la preferencia va hacia el diseño, la administración de proyectos o la supervisión de obras.

Sin embargo, en los últimos años las cosas han cambiado. En el 2011, después de los acontecimientos de la tormenta Agatha, el Departamento de Ingeniería Civil organizó el primer seminario sobre puentes de cables dedicado al recuperación de puentes y estructuras de puentes, con la participación del doctor Robert Estrada, decano de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de Wyoming.

En el 2012, se realizó un taller con la empresa Aquacorp (IDHO, Picos, Servipicos, Hidrosuena) por medio de la ingeniera María Antoniana Castillo, gerente de mercados. Se hizo el ejercicio de confrontar la oferta académica de los cursos relacionados con el agua con la oferta profesional de la empresa. A raíz de este taller, se hicieron adaptaciones en los contenidos de los cursos en el área de aguas. Temas como bombas, sistema contra incendios o piscinas son ahora esta-

INGENIERO EXPERTO

Ingeniero MBA Roberto Gode Levefien es el director de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala. Asesor en Estructuras, por la Escuela Politécnica Federal de Los Hornos, Saco.

Laboró por dos años como asistente del aborregador de Hidráulica de Agua y un año como ingeniero encargado del área de modelación. En dicha universidad fabricó modelos hidráulicos a pequeña escala, pero en grandes tamaños, para representar lagos, ríos o rrepresas en una época donde apenas existían los primeros programas de simulación.

Prototipo para la generación de energía Undimontz. Muestra traza en funcionamiento.

Se realizó en clases o presentados en conferencias o charlas.

Este mismo año se desarrolló un taller de hidrónica práctica con la colaboración de docentes del departamento e ingenieros de la empresa. Esta experiencia permitió resientir la enseñanza de temas más ligados a la realidad profesional.

Ha sido muy grato ver que con estas iniciativas aumentó el interés de los alumnos hacia la hidrónica. Desde de ellos es que se derivaron este tema en sus trabajos de graduación.

El primer proyecto es el desarrollo de una estación medidora de tirante (weir) de un río cuyo principal objetivo es proveer información en tiempo real. Una

estación cuenta con una base de datos que recolecta información y un módulo de transmisión de datos. Con esta se pueden determinar los ciclos de crecidas, comportamiento del río y calcular niveles de alerta por posibles inundaciones. Gracias a este proceso, información vital para la protección de infraestructuras vital, industrial, hidroeléctricas y poblaciones. Asimismo brinda información para los ingenieros y un punto de partida para el diseño de dragajes y estructuras cercanas al río.

El segundo proyecto es un sistema de distribución de agua potable con bomba de anillo cuyo objetivo principal es evaluar el uso de esta bomba para una re-

dentada en una comunidad del municipio de México. Se buscó la mejor opción de fuente de agua en el sector alternativas de potabilización y consultos para que sea factible económicamente de fácil mantenimiento y autónoma bajo administración de la propia comunidad.

El tercer proyecto es el desarrollo de un prototipo para la generación de energía Undimontz a partir de la energía mecánica contenida en el movimiento de las olas. Este tipo de energía renovable proviene de una fuente natural e inagotable: el mar. El proyecto consistió en desarrollar un prototipo a pequeña escala que sea económicamente factible de fácil instalación en el país y con un im-

planteo ambiental insignificante.

Como quinto de periodo, se realizó una investigación sobre los distintos métodos de generación de energía mediante el mar y los prototipos que han sido desarrollados en otros países. Se evaluó cada uno de ellos y se determinó cuál sería el método más adecuado para las costas de Guatemala. Se analizaron las olas en las costas del Pacífico y del Atlántico y se concluyó que las olas más apropiadas para lograr el buen funcionamiento de este prototipo son las del mar del Pacífico debido a que son de una mayor altura y un periodo de oscilación promedio más alta.

Se realizaron diseños del prototipo y se ensayaron en el canal de olas del laboratorio de Ingeniería Civil de la UVG.

El proyecto surgió como una respuesta a los altos índices de consumo de energía eléctrica en el país, y al aprovechamiento potencial de los costes oceánicos. A diferencia de otros proyectos de generación eléctrica que usan combustibles fósiles o energía nuclear, es un proyecto de obtención de energía limpia, sin dañar el ambiente.

El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle busca impulsar la hidrónica a través de una participación activa tanto de los docentes como de los alumnos y con la colaboración de empresas privadas.

Para más información contactar: <http://www.uvg.edu.gt/facultad/ingles/ingenieria/civil/contacto.html>

Más información: www.uvg.edu.gt • info@uvg.edu.gt • Tel. 2368-8309

Fuente: Diario La Hora, 2013.

C. Formulario y Guía para solicitud de registro.

Figura 1. Formulario para generadoras menores a 5 MW, pág. 1.

Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Energía

FORMULARIO PARA SOLICITUD DE REGISTRO PARA UTILIZAR BIENES DE DOMINIO PÚBLICO PARA LA INSTALACION DE CENTRALES GENERADORAS HIDROELECTRICAS MENORES O IGUALES A 5 MW.

Señores
Ministerio de Energía y Minas:

Atentamente, en forma voluntaria y por convenir a mis intereses, acudo a solicitar el **Registro para Utilizar Bienes de Dominio Público para la Instalación de Centrales Generadoras Hidroeléctricas menores o iguales a 5 MW**. Para el efecto, presento lo siguiente:

1. MARCO LEGAL

Datos del Solicitante:

PARA UNA PERSONA INDIVIDUAL:

- Nombre completo: _____
- Edad: _____ Estado civil: _____
- Profesión u Oficio: _____ Nacionalidad: _____
- Domicilio: _____
- Cédula de Vecindad ó Documento Personal de Identificación: _____
- Extendida por: _____
- Si es extranjero: Pasaporte No: _____ extendido por _____

PARA UNA PERSONA JURÍDICA:

- Nombre, Razón o Denominación Social de la Entidad solicitante: _____

- Documento donde conste la constitución de la entidad solicitante: _____

- Datos de Inscripción de la entidad solicitante: _____

- Domicilio: _____

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363

E-mail: directordge@mem.gob.gt

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Figura 2. Formulario para generadoras menores a 5 MW, pág. 2.

Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Energía

Información del Representante Legal:

- Nombre: _____
- Edad: _____ Estado Civil: _____
- Profesión u Oficio: _____ Nacionalidad: _____
- Domicilio: _____
- Cédula de Vecindad o Documento Personal de Identificación: _____
- Extendida por: _____
- Si es extranjero: Pasaporte No.: _____ extendido por: _____
- Calidad con que actúa: _____
- Documento (s) que acreditan la calidad con que actúa: _____

- Datos de inscripción del Representante Legal: _____

INFORMACIÓN PARA NOTIFICACIONES:

- Lugar para recibir notificaciones: _____

- Teléfono (s): _____
- Fax: _____
- E-mail: _____

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 E-mail: directordge@mem.gob.gt

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Figura 3. Formulario para generadoras menores a 5 MW, pág. 3.

Ministerio de Energía y Minas

Dirección General de Energía

2. MARCO TECNICO DE LA SOLICITUD**Descripción de las principales características de la central**

a. **Nombre de la Central Generadora.** Este deberá ser el mismo tanto en el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, Estudios Eléctricos y en toda la documentación presentada: _____

b. **Localización de la Central Generadora**

• Finca, caserío, aldea, etc.: _____

• Municipio (s): _____

• Departamento(s): _____

c. **Tipo de Central Hidroeléctrica:**

A filo de agua: _____ De embalse: _____ Capacidad del embalse (m³): _____

Regulación: Diaria: _____ Semanal: _____ Mensual: _____ Anual: _____

d. **Nombre del río (s)** _____

e. **Cota (s) Máxima:** _____ m.s.n.m.

f. **Cota pie de presa:** _____ m.s.n.m.

g. **Cota Casa de máquinas:** _____ m.s.n.m.

h. **Cota (s) Mínima:** _____ m.s.n.m.

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363

E-mail: directordge@mem.gob.gt

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Figura 4. Formulario para generadoras menores a 5 MW, pág. 4.

Ministerio de Energía y Minas	Dirección General de Energía
<p>i. Coordenadas del proyecto en UTM WGS 84 y Geodésicas de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cota máxima UTM: _____ Geodésicas: _____ • Cota mínima UTM: _____ Geodésicas: _____ • Cota presa UTM: _____ Geodésicas: _____ • Cota casa de máquinas UTM: _____ Geodésicas: _____ 	
<p>j. Cantidad de Turbinas: _____ Tipo: _____</p>	
<p>k. Capacidad Instalada de la central (MW). Este deberá ser el mismo tanto en el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, Estudios Eléctricos y toda la documentación presentada: _____</p>	
<p>l. Fechas del proyecto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inicio de construcción (día, mes, año): _____ / _____ / _____ • Fin de construcción (día, mes, año): _____ / _____ / _____ • Operación Comercial (día, mes, año): _____ / _____ / _____ 	
<p>m. Capacidad de la subestación de la central (MVA): _____</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niveles de tensión de transformación (kV): _____ 	
<p>n. Longitud de la Línea de Transmisión de interconexión al sistema (km): _____</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nivel de tensión de la línea (kV): _____ • Capacidad de transporte de la línea (MVA): _____ • Subestación de Interconexión al sistema: _____ 	
24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363	E-mail: directordge@mem.gob.gt

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Figura 5. Formulario para generadoras menores a 5 MW, pág. 5.

Ministerio de Energía y Minas

Dirección General de Energía

3. ACEPTACIONES:

- 3.1. Señalo que toda la información consignada en el formulario de solicitud e información complementaria (otra documentación requerida) es fiel y correcta; por lo que autorizo al Ministerio de Energía y Minas para que la verifique y acepto expresamente que si el Ministerio determina que la documentación es incompleta e incorrecta, esta solicitud será rechazada.
- 3.2. Acepto, si existiesen otros aprovechamientos en el (los) río (s), a no afectar la operación de estos.
- 3.3. Señalo que si en la fecha indicada de inicio proyectado de la construcción, o derivada de una inspección realizada por esta Dirección se establece que no existe evidencia de la misma, este registro quedará sin efecto sin responsabilidad por parte del Ministerio
- 3.4. La inscripción en el registro no otorga derechos, autorizaciones o concesiones a favor del solicitante y la misma obedece a razones de control del uso de los bienes de dominio público, para su utilización por este Ministerio y demás entidades afines al Subsector eléctrico.
- 3.5. A informar a la Dirección General de Energía cada seis meses a partir de la fecha de Registro del Proyecto, sobre el avance en la construcción del proyecto.

4. NOTAS IMPORTANTES:

- Tomar en cuenta que a partir del mes de junio de 2013, las acciones deberán ser únicamente nominativas de conformidad con lo que para el efecto establece la Ley de Extinción de Dominio.
- Toda la información tendrá que ir en los espacios creados para el efecto, no se aceptarán formularios que hallan tenido alteración en su formato.

Lugar y fecha: _____

f) _____

Firma Persona Individual o Representante Legal

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363

E-mail: directordge@mem.gob.gt

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Figura 6. Guía para solicitud de registro para generadoras menores a 5 MW, pág. 1.

Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Energía

**GUÍA PARA LA PRESENTACIÓN DE SOLICITUDES DE REGISTRO
PARA UTILIZAR BIENES DE DOMINIO PÚBLICO PARA LA INSTALACION DE
CENTRALES GENERADORAS HIDROELECTRICAS MENORES O IGUALES A 5MW**

1 GENERALIDADES

1.1 REQUISITOS DE LA SOLICITUD

El solicitante deberá presentar la solicitud en la Dirección General de Energía, ubicada en la 24 calle 21-12 de la zona 12, ciudad de Guatemala.

La solicitud comprenderá original y copia digital de lo siguiente:

- a. Formulario de solicitud, que contendrá las generalidades del objeto de la solicitud.
- b. Mapa de ubicación de la Central Generadora desde la cota máxima (cota de corona de presa) solicitadas a la cota mínima (desfogue). Este Mapa será el original del instituto Geográfico Nacional -IGN-, escala 1:50,000.
- c. Mapa (con sus respectivas curvas de nivel) donde figuran las principales obras de la central generadora indicando las coordenadas de las cotas máxima y mínima. (en formato A1 en escala 1:12,500), timbrado, sellado y firmado por un ingeniero civil.
- d. Plano (con sus respectivas curvas de nivel) donde figuran las principales obras de la Central Generadora (presa, tuberías, túneles, casa de maquinas, subestación, línea de transmisión en formato A1 en escala 1:12:500), timbrado, sellado y firmado por un ingeniero civil.

Si la solicitud es presentada por una Persona Individual

- a. Fotocopia legalizada de la Cédula de Vecindad, del Documento Personal de Identificación o del Pasaporte en el caso de ser Extranjero.
- b. Fotocopia legalizada de patente de comercio de empresa.
- c. Si se actúa como mandatario de persona individual, adjuntar fotocopia legalizada del documento correspondiente con su respectiva razón registral.

Si la solicitud es presentada por una Persona Jurídica

- a. Fotocopia legalizada del testimonio de la escritura pública de constitución de Sociedad y sus modificaciones si las hubiere, con sus respectivas razones registrales.
- b. Fotocopia legalizada del documento con que se acredite la calidad con que se actúa con su respectiva razón registral.
- c. Fotocopia legalizada de la patente de sociedad y empresa.
- d. Fotocopia legalizada de la Cédula de Vecindad, del Documento Personal de Identificación o del Pasaporte en el caso de ser Extranjero del Representante Legal.

Figura 7. Guía para solicitud de registro para generadoras menores a 5 MW, pág. 2.

2 DEFINICIONES

Para los efectos de la aplicación de esta Guía se establecen las siguientes definiciones:

Central generadora: Toda infraestructura utilizada para la generación de energía eléctrica, hidroeléctrica o geotérmica.

Cota máxima (Cota de corona de presa): Altura máxima sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) de la parte superior de la presa, la cual refleja el espejo de agua donde el río termina su cauce natural.

Cota pie de presa: Es la altura (m.s.n.m.) donde se ubique la presa a nivel del lecho del río.

Cota de casa de máquinas: Es la altura (m.s.n.m.) donde se ubicará la casa de máquinas.

Cota mínima (desfogue): La altura aguas abajo de la casa de máquinas o altura (m.s.n.m.) de desfogue de aguas de la central, con una cota en la cual el desfogue de aguas no afecte hidráulicamente la operación de otras centrales o instalaciones existentes.

Nombre del proyecto: Será el nombre con el cual se identifique a la central generadora, este deberá ser el mismo en el Estudio de Evaluación del Impacto Ambiental (EIA), Estudios Eléctricos y toda la documentación presentada en este Ministerio. El nombre no debe coincidir con otros proyectos Autorizados por este Ministerio (consultar la página Web de este Ministerio de proyectos ya Autorizados)

Figura 8. Guía para solicitud de registro para generadoras menores a 5 MW, pág. 3.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA Y PLANOS DE LA CENTRAL

2.1 Descripción técnica

- Ubicación:
 - a. Indicar la finca, caserío, aldea, comunidad, municipio(s), departamento(s), donde se ubicara el proyecto.
 - b. Indicar las coordenadas (GTM, UTM wgs84 y Geodesicas) de Cota máxima, cota pie de presa, Casa de Máquinas y Desfogue de la Central.
 - c. Mapa cartográfico donde se muestre la ubicación del proyecto, así como el acceso al proyecto, desde la cabecera municipal.
- Descripción de las características técnicas del embalse, si es el caso. Ésta contendrá: Tipo; volumen total, nivel máximo, normal y mínimo.
- Descripción, tipo y dimensiones de las características técnicas de los principales componentes de la central: presas, canales, túneles o tuberías de conducción; cámara de compensación; casa de máquinas, subestación, línea de transmisión, turbina y generador; y, tipo de regulación, indicando si las instalaciones son existentes o nuevas; además incluir un cuadro con las principales características técnicas del proyecto.
- Evaluación del recurso que incluya; factor de planta de la central, producción de energía anual y mensual, curva de duración de caudales.

2.2 Planos

Todos los planos tendrán que ir timbrados, firmados y sellados por un Ingeniero Civil.

- Planos de planta acotados de la central donde figuren las curvas de nivel, desde la cota máxima o toma de aguas hasta el desfogue de aguas. La escala de estos planos deberá ser 1:12,500 o escala donde se muestre claramente todos los componentes y dimensiones de la central.
- Planos en planta y perfil acotados y separados por componente a una de 1:12,500 o en la escala en que se muestre claramente todos los componentes y dimensiones de la:
 - a. Presa o Embalse (si existiera)
 - b. Canales o túneles
 - c. Tanque de compensación (cámara de carga)
 - d. Tubería de presión
 - e. Casa de máquinas. Estos planos deberán ir timbrados, sellados y firmados por un Ingeniero Mecánico.
 - f. Diagrama unifilar de la central hasta la interconexión: estos deberán ir timbrados sellados y firmados por un Ingeniero Electricista.

Figura 9. Guía para solicitud de registro para generadoras menores a 5 MW, pág. 4.

2.2.1 En el caso que la central tenga asociadas subestaciones, se incluirá lo siguiente:

- Descripción de las principales características técnicas de la subestación, entre las que se incluirán: Nombre de la subestación del proyecto, nombre de la subestación o línea a interconectarse; tipo de subestación y área a ocupar.

2.2.2 En el caso que la central tenga asociadas líneas de transporte de energía eléctrica, se incluirá lo siguiente:

- Planos en planta delimitando el trazo de la ruta de la línea de transporte, el cual incluirá las subestaciones eléctricas de entrada, salida e intermedias. La escala de este plano deberá ser 1:12,500 o escala a convenir.
- Descripción de las principales características técnicas de la línea de transmisión, entre las que se incluirán: Nombre de la línea, tipo, longitud (Km), voltaje de operación (kV); límite térmico, subestación a la cual se interconectarán, ubicación (localidad, municipio, departamento) del punto de interconexión y a quien pertenece la subestación o línea donde se conectarán, coordenadas (GTM, UTM-wgs84 y Geodesicas), del punto de interconexión,

2.3 Presupuesto del Proyecto

- Monto total del proyecto, desde el inicio de construcción hasta la finalización de la misma.

2.4 Especificación de los bienes de dominio público y particulares

- Especificación de los bienes de dominio público y particulares que se utilizarán, con la individualización de aquellos con cuyos propietarios el interesado no ha llegado a un acuerdo directo de compra o de servidumbre para su utilización.
- Fotocopias legalizadas de los documentos con que el solicitante acredite la propiedad o posesión de los inmuebles donde se ubicará el proyecto.

2.5 Estudio de Evaluación del Impacto Ambiental

Estudio de Evaluación del Impacto Ambiental y la resolución de aprobación del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN- (referencia Artículo 8, Decreto Número 68-86).

Licencia ambiental vigente.

El nombre del proyecto debe de coincidir con el del estudio eléctrico, el formulario, y toda la documentación presentada. Así mismo la capacidad debe de ser la misma en todos los estudios y documentación presentada. El nombre de la central no deberá coincidir con los proyectos ya Autorizados en este Ministerio (consultar la página Web de este Ministerio de proyectos ya Autorizados).

Figura 10. Guía para solicitud de registro para generadoras menores a 5 MW, pág. 5.

2.6 Estudios Eléctricos de Flujo de Carga

Presentar estudios eléctricos de flujo de carga, aprobados por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. El nombre y la capacidad de la central deberán de coincidir con toda la documentación presentada a éste Ministerio.

Notas importantes:

- El solicitante se obliga a presentar o ampliar la información adicional que se le requiera respecto a los documentos presentados en su solicitud.
- Todos los planos deberán ir timbrados, sellados y firmados por el profesional correspondiente.
- Todos los planos deberán ir en formato A1 y doblados, y colocados en el folder que contiene la solicitud.
- Toda la información presentada deberá venir en original; y copia digital (en cd), así como en formato digital en Word; además deberá presentar un índice en el que se indique los folios de los documentos presentados.
- Los estudios, descripción técnica, planos, etc.; son distintos a los incluidos en el Estudio de Evaluación del Impacto Ambiental; por lo que deberán presentarse en forma separada de dicho Estudio.
- Si la central utilizara más de un río, poner todas las cotas máximas de los ríos utilizados (consultar al personal del Departamento de Desarrollo Energético previo a presentar la solicitud).
- Al momento de la presentación de la información, si el interesado incumpliera en uno de los requisitos establecidos en el Formulario y esta Guía, la solicitud será rechazada.
- Toda la documentación deberá venir en idioma español

Si los interesados desean únicamente un Registro, solamente deberá cumplir con los requisitos del formulario y de la presente Guía.

Los interesados en solicitar la AUTORIZACIÓN DEFINITIVA para las centrales generadoras hidroeléctricas menores o iguales a 5 MW la pueden realizar, debiendo cumplir con lo establecido en la Ley General de Electricidad, su Reglamento (Artículo 4), Acuerdo Ministerial AG-110-2002 y la Guía para la presentación de este tipo de solicitudes.

Atentamente,

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS

Requisitos y formularios para agentes generadores, transportistas y distribuidores.

Figura 11. Requisitos Agente Generador.



- Memorial dirigido al Ministerio de Energía y Minas, solicitando su inscripción e indicando en el mismo, el lugar para recibir notificaciones debidamente firmado. Adjunto formulario de solicitud.

Para personas individuales:

- Fotocopia legalizada de la Patente de Comercio.
- Fotocopia legalizada de la cédula de vecindad / DPI o pasaporte del propietario.

Para personas jurídicas:

- Fotocopia legalizada del testimonio de la escritura de constitución de la sociedad y sus modificaciones, con la razón del Registro respectivo.
- Fotocopia legalizada del acta de nombramiento del representante legal de la entidad, debidamente razonado por el registro correspondiente.
- Fotocopia legalizada de la patente de comercio de empresa y patente de sociedad.
- Fotocopia legalizada de la cédula de vecindad / DPI o pasaporte.

Para Generadores mayores a 5 MW

- Declaración jurada de las características técnicas de sus unidades generadoras y documentación que demuestre tener una potencia máxima mayor de 5 MW, en el sitio de ubicación de la planta, libre de consumos internos.
- Resolución de aprobación de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica -CNEE-, de los Estudios de Acceso al Sistema de Transporte.
- Si utiliza bienes de dominio público, fotocopia del Contrato de Autorización Definitiva.

Para Generadores Distribuidos Renovables

- Declaración jurada de las características técnicas de sus unidades generadoras y documentación que demuestre tener una potencia menor de 5 MW, en el sitio de ubicación de la planta, libre de consumos internos.
- Resolución de aprobación de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica de los Estudios Eléctricos de Flujo de Carga.

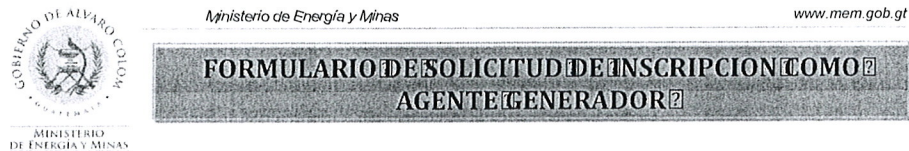
La solicitud deberá presentarse en original y copia, con su respectivo folder y fastener, en la Dirección General de Energía, ubicada en la 24 Calle 21-12 Zona 12, Guatemala.

Dirección General de Energía

24 calle 21-12 zona 12, Guatemala

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Figura 12. Formulario Agente Generador.



Señor Ministro de Energía y Minas:

Me permito presentarle la información general de la entidad a que represento.

Nombre (persona individual o jurídica) _____

Representante legal _____

Profesión u oficio _____

Nacionalidad _____

Cédula de Vecindad/DPI _____

Número de pasaporte _____

Domicilio _____


Dirección para recibir notificaciones _____

Teléfono _____ Fax _____ E-mail _____

Fecha _____

Firma _____
(Representante legal o persona individual)

Figura 13. Requisitos Agente Transportista.



Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Energía

REQUISITOS PARA INSCRIBIRSE COMO AGENTE TRANSPORTISTA

- Memorial dirigido al Ministerio de Energía y Minas, solicitando su inscripción e indicando en el mismo, el lugar para recibir notificaciones debidamente firmado. Adjunto formulario de solicitud.

Para personas individuales:

- Fotocopia legalizada de la Patente de Comercio.
- Fotocopia legalizada de la cédula de vecindad / DPI o pasaporte del propietario.

Para personas jurídicas:

- Fotocopia legalizada del testimonio de la escritura de constitución de la sociedad y sus modificaciones, con la razón del Registro respectivo.
- Fotocopia legalizada del acta de nombramiento del representante legal de la entidad, debidamente razonado por el registro correspondiente.
- Fotocopia legalizada de la patente de comercio de empresa y patente de sociedad.
- Fotocopia legalizada de la cédula de vecindad / DPI o pasaporte.

Además deberá presentar:

- Reporte de los Agentes, Grandes Usuarios e Integrantes del Mercado Mayorista, que estarán conectados a su sistema de transporte, con datos de la potencia firme y la vigencia del contrato; la potencia firme conectada deberá ser igual o mayor de 10 MW.
- Resolución de aprobación de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica –CNEE-, de los Estudios de Acceso al Sistema de Transporte.
- Fotocopia legalizada del Contrato de Autorización Definitiva para Uso de Bienes de Dominio Público.

La solicitud deberá presentarse en original y copia, con su respectivo folder y fastener, en la Dirección General de Energía, ubicada en la 24 Calle 21-12 Zona 12, Guatemala.

www.mem.gob.gt Email: directordge@mem.gob.gt

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Figura 14. Formulario Agente Transportista.



Ministerio de Energía y Minas

Dirección General de Energía

**FORMULARIO DE SOLICITUD DE INSCRIPCION COMO AGENTE
TRANSPORTISTA**

Señor Ministro de Energía y Minas:

Me permito presentarle la información general de la entidad a que represento.

Nombre (persona individual o jurídica) _____

Representante legal _____

Profesión u oficio _____

Nacionalidad _____

Cédula de Vecindad/DPI _____

Número de pasaporte _____

Domicilio _____

Dirección para recibir notificaciones _____

Teléfono _____ Fax _____ E-mail _____

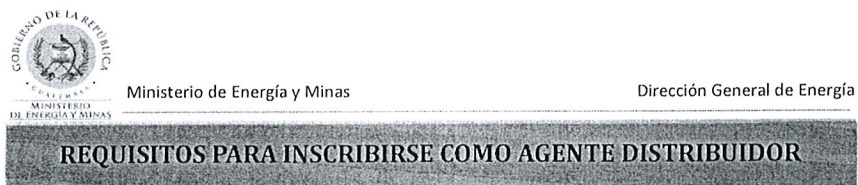
Fecha _____

Firma _____
(Representante legal o persona individual)

www.mem.gob.gt
[Email: directordge@mem.gob.gt](mailto:directordge@mem.gob.gt)

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Figura 15. Requisitos Agente Distribuidor.



- Memorial dirigido al Ministerio de Energía y Minas, solicitando su inscripción e indicando en el mismo, el lugar para recibir notificaciones debidamente firmado. Adjunto formulario de solicitud.

Para personas individuales:

- Fotocopia legalizada de la Patente de Comercio.
- Fotocopia legalizada de la cédula de vecindad / DPI o pasaporte del propietario.

Para personas jurídicas:

- Fotocopia legalizada del testimonio de la escritura de constitución de la sociedad y sus modificaciones, con la razón del Registro respectivo.
- Fotocopia legalizada del acta de nombramiento del representante legal de la entidad, debidamente razonado por el registro correspondiente.
- Fotocopia legalizada de la patente de comercio de empresa y patente de sociedad.
- Fotocopia legalizada de la cédula de vecindad / DPI o pasaporte.

Además deberá presentar:

- Declaración jurada de contar con un mínimo de 15,000 usuarios.
- Resolución de aprobación de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, de los Estudios de Acceso al Sistema de Transporte.
- Fotocopia legalizada del Contrato de Autorización Definitiva para Uso de Bienes de Dominio Público.

La solicitud deberá presentarse en original y copia, con su respectivo folder y fastener, en la Dirección General de Energía, ubicada en la 24 Calle 21-12 Zona 12, Guatemala.

Figura 16. Formulario Agente Distribuidor.



Ministerio de Energía y Minas

Dirección General de Energía

**FORMULARIO DE SOLICITUD DE INSCRIPCION COMO AGENTE
DISTRIBUIDOR**

Señor Ministro de Energía y Minas

Me permito presentarle la información general de la entidad a que represento.

Nombre (persona individual o jurídica) _____

Representante legal _____

Profesión u oficio _____

Nacionalidad _____

Cédula de Vecindad/DPI _____

Número de pasaporte _____

Domicilio _____

Dirección para recibir notificaciones _____

Teléfono _____ Fax _____ E-mail _____

Fecha _____

Firma _____
(Representante legal o persona individual)

www.mem.gob.gt

 Email: directordge@mem.gob.gt

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

XX. TERMINOLOGÍA.

- BANKI: Turbina hidráulica de flujo transversal diseñada por Anthony Michell, Donát Bánki y Fritz Ossberger en 1933.
- CNEE: Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
- FRANCIS: Turbomáquina de flujo mixto y reacción, inventada por James Francis en 1848,
- IEA: International Energy Agency.
- INSIVUMEH: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
- KAPLAN: Turbina hidráulica de flujo axial y reacción, inventada por Viktor Kaplan en 1912.
- NASA: National Aeronautics and Space Administration.
- PELTON: Turbina hidráulica de flujo transversal, admisión parcial y de acción, inventada por Lester Allan Pelton en 1879.
- THAWT: Transversal, Horizontal and Axial Water Turbine.
- TURGO: Turbina hidráulica de impulso diseñada para saltos de desnivel medio, fue diseñada por la compañía Gilkes en 1919.
- UNESCO: The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- VIVACE: Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean.