

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ DE LAS CORRIENTES DE MAREA EN EL GOLFO DE CORCOVADO, GOLFO DE ANCUD Y PUERTO MONTE.

NICOLÁS YANKO BOGDANIC HERNÁNDEZ.

PROFESOR GUÍA: JAIME LEYTON ESPOZ.

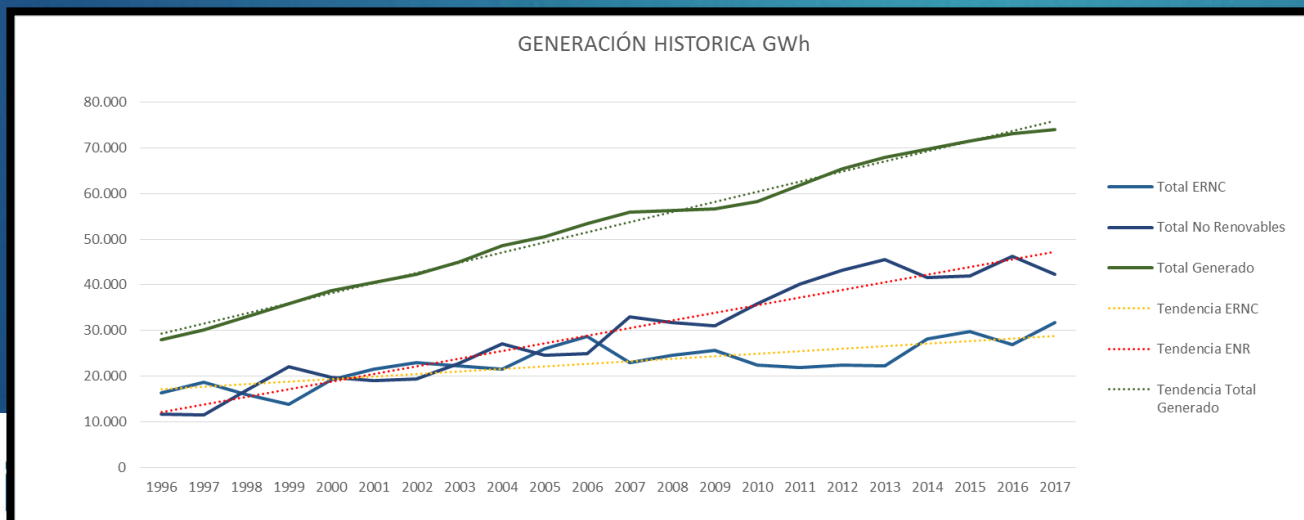
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA.

2023

Introducción.

2

- ▶ Desarrollo tecnológico e industrial de ciudades y/o países conlleva una demanda energética mayor.
- ▶ ¿La industria energética chilena está preparada para afrontar un futuro climático incierto?
- ▶ Dada la forma y estructura del territorio nacional, ¿existen otras opciones factibles de desarrollo energético a nivel nacional o regional?



Objetivos.

▶ **Objetivo General.**

- ▶ Determinar la factibilidad técnica para implementar, con tecnología existente, una central mareomotriz de barrera que pueda generar energía eléctrica en las zonas de el Golfo de Corcovado, Golfo de Ancud y Puerto Montt.

▶ **Objetivos Específicos.**

- ▶ Caracterizar la energía potencial que sea posible almacenar en embalses propuestos en la zona que se intervendrá.
- ▶ Evaluar diferentes dispositivos generadores que sean posibles implementar en las barreras de los embalses propuestos.
- ▶ Proponer formas de implementar, si es necesario, dispositivos en lugares geográficamente complejos.
- ▶ Evaluar el rendimiento esperado de los diferentes dispositivos a implementar en las zonas propuestas.

- ▶ **Las Mareas y sus Fundamentos Físicos.**
 - ▶ Tipos de mareas.
 - ▶ Factores no astronómicos que afectan las mareas.
- ▶ **Energía Mareomotriz: ¿qué es?**
 - ▶ Energía potencial y cinética de las mareas.
 - ▶ Modo de operación de una central de barrera.
 - ▶ Turbinas.
 - ▶ Obra civil: barrera o dique.
 - ▶ Estado del arte.

Las Mareas y sus Fundamentos Físicos.

5

► Marea: Variación periódica del nivel del mar.

- Ascenso y descenso periódico del nivel del mar debido a la interacción de las fuerzas gravitacionales de los astros sobre los océanos.

► Interacción de fuerzas gravitacionales.

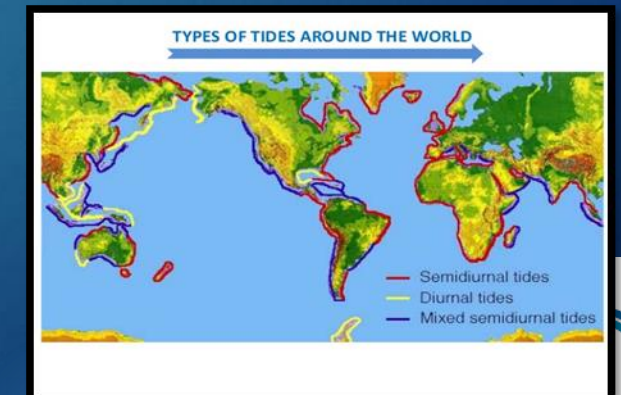
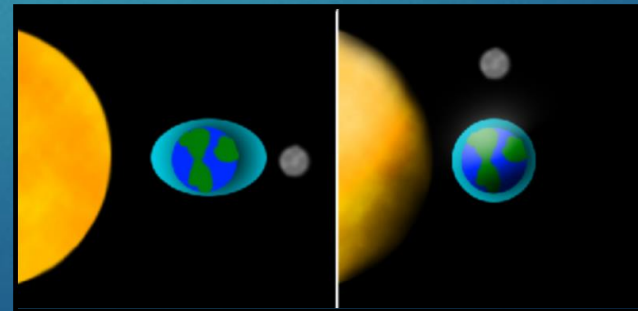
- Ley de Gravitación Universal de Newton.
- Luna en mayor influencia que el Sol ($2,19 \cdot S = L$).
- Constituyentes armónicos.

Nombre Constituyente	Símbolo	Frecuencia (1/h)	Período (h)
Lunar principal (Semi-diurna)	M_2	0,08052	12,42
Solar principal (Semi-diurna)	S_2	0,08333	12,00
Elíptica lunar mayor	N_2	0,07899	12,66
Declinación luni-solar (Semi-diurna)	K_2	0,08354	11,97
Declinación luni-solar (Diurna)	K_1	0,04179	23,93
Lunar principal (Diurna)	O_1	0,03872	25,82
Solar principal (Diurna)	P_1	0,04155	24,07

(Fuente: Elaboración Propia)

► Variaciones en la amplitud y duración.

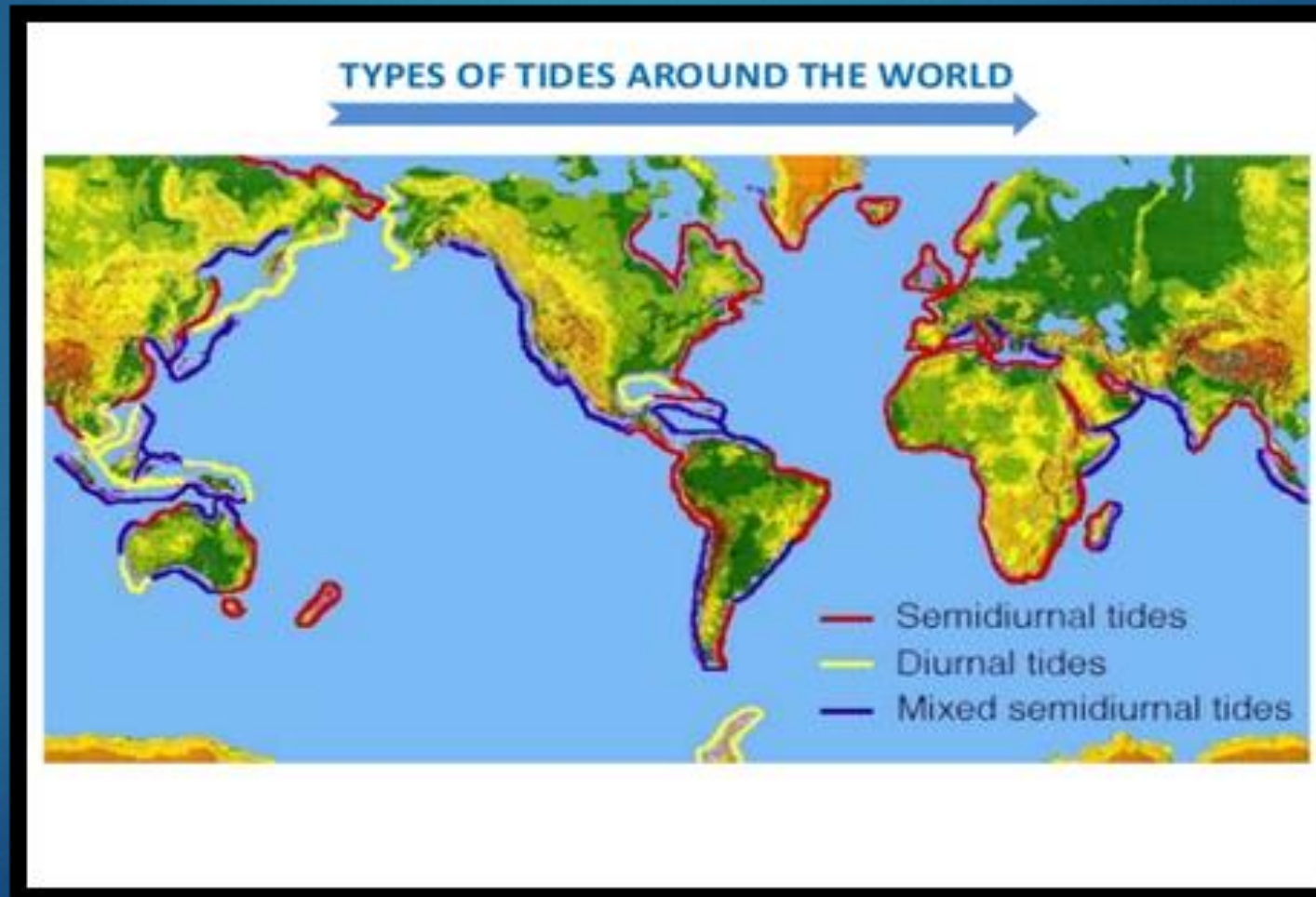
- Hidrografía.
- Propagación en aguas someras.
- Efectos meteorológicos.



Las Mareas y sus Fundamentos Físicos.

6

► Tipos o regímenes de marea.



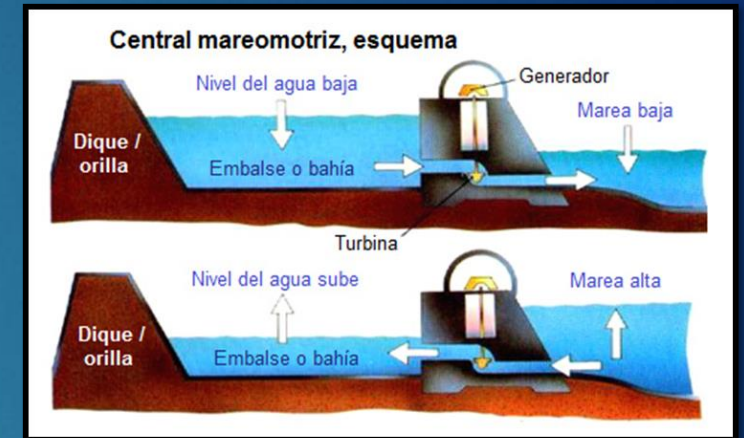
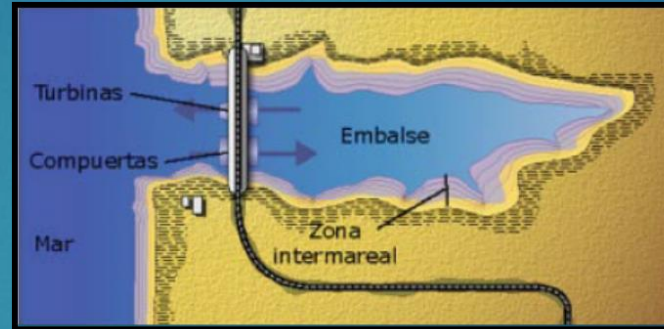
Energía mareomotriz: ¿qué es?

► Energía potencial y cinética de las mareas.

► Potencial.

$$E_f = \rho * g * A_z * \frac{R^2}{2}$$

$$P_{electrica} = P_{total} * N * \frac{T_{gen}}{3600}$$



► Cinética.

$$E_k = \frac{1}{2} * m * v^2$$

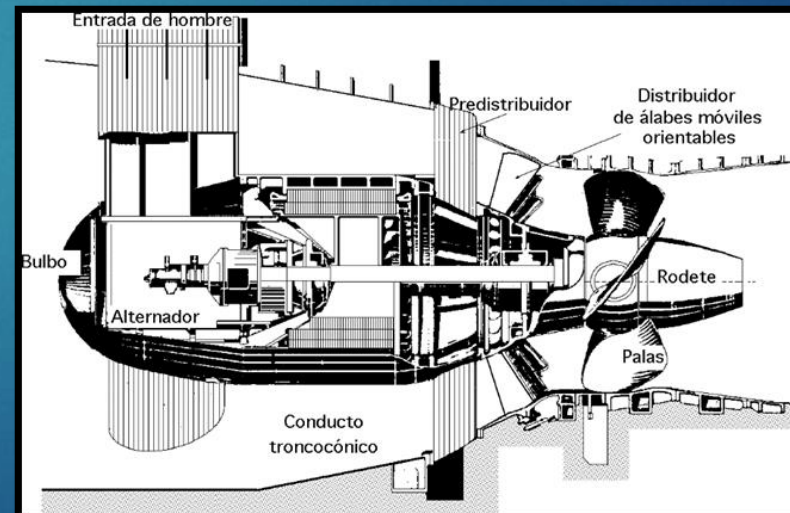
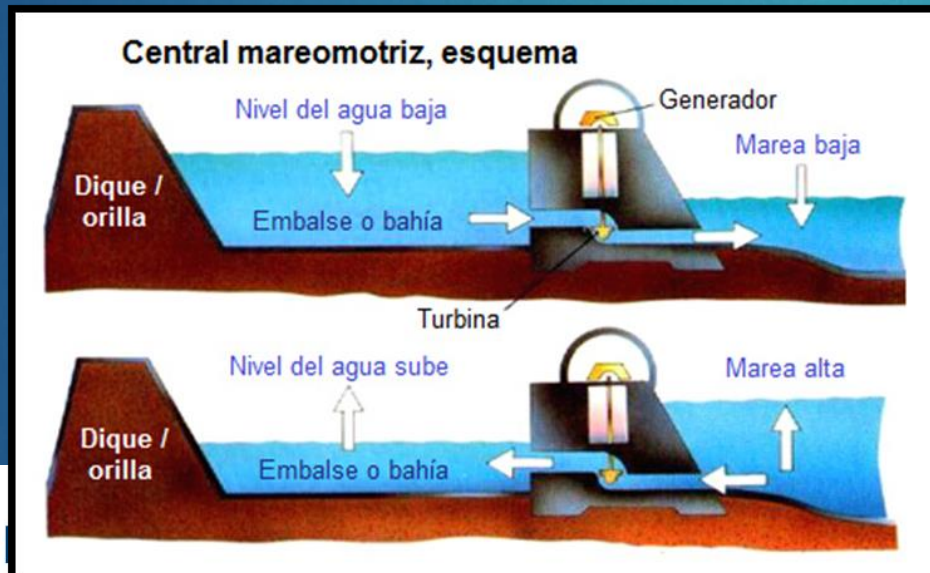
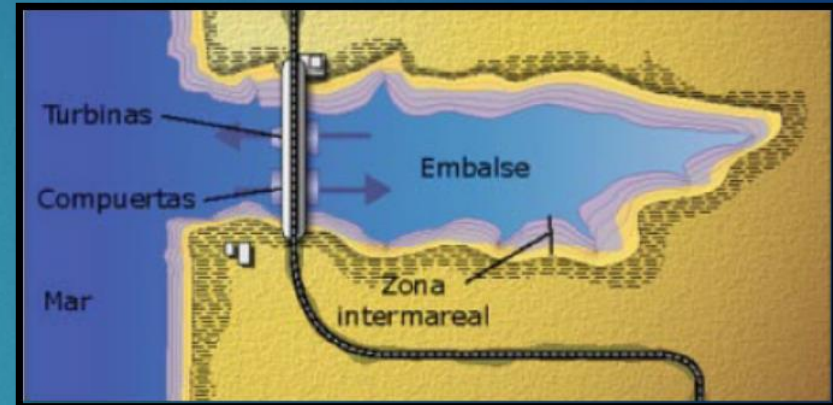
$$P = \frac{1}{2} * A * \rho * v^3$$



Energía mareomotriz: ¿qué es?

- ▶ Central Mareomotriz de Barrera.
- ▶ Potencial.

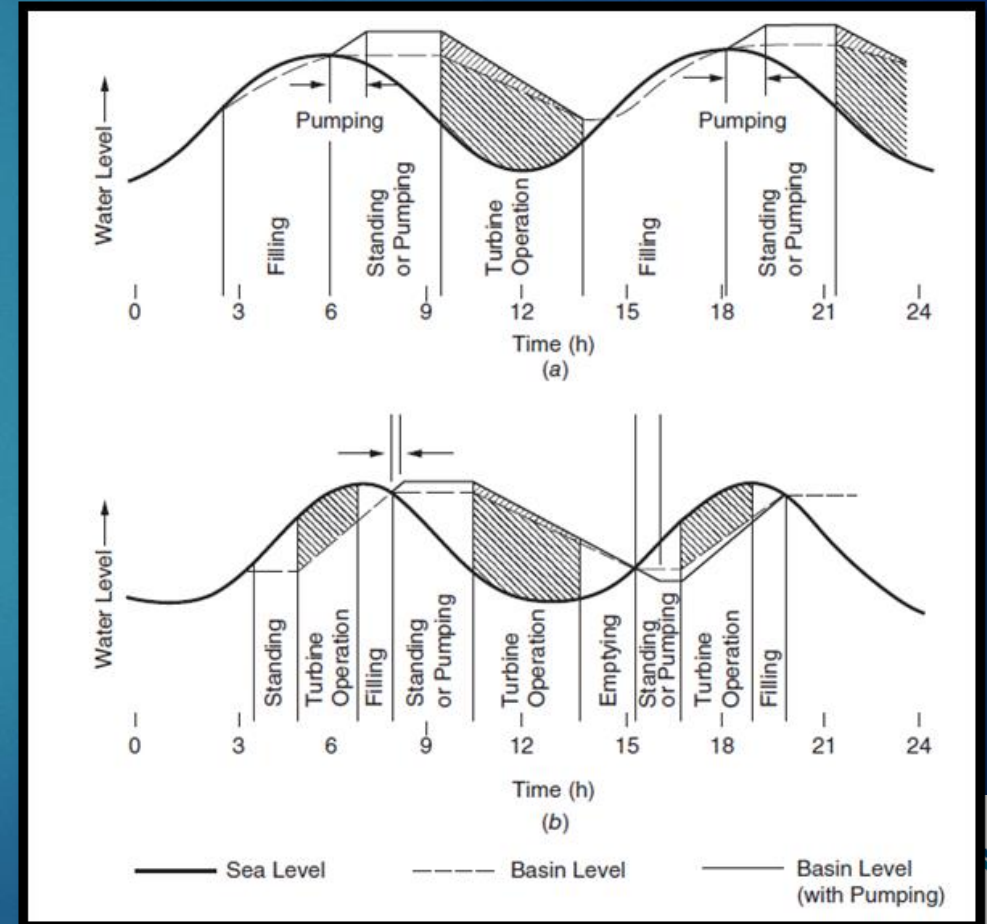
$$E_f = \rho * g * A_z * \frac{R^2}{2}$$



Energía mareomotriz: ¿qué es?

9

- ▶ Centra Mareomotriz de Barrera.
 - ▶ Modos de Operación Central de Barrera.
 - ▶ Modo flujo.
 - ▶ Modo reflujo.
 - ▶ Ambos sentidos.



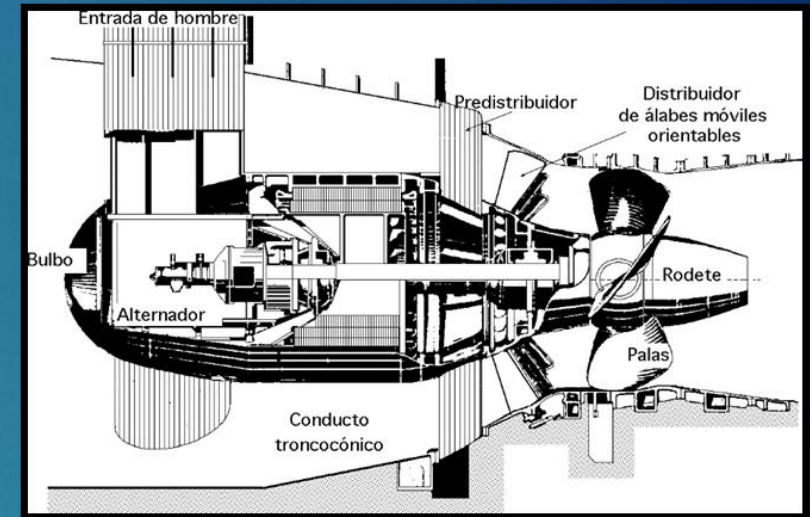
Energía mareomotriz: ¿qué es?

10

▶ Turbinas Generadoras.

▶ Bulbo:

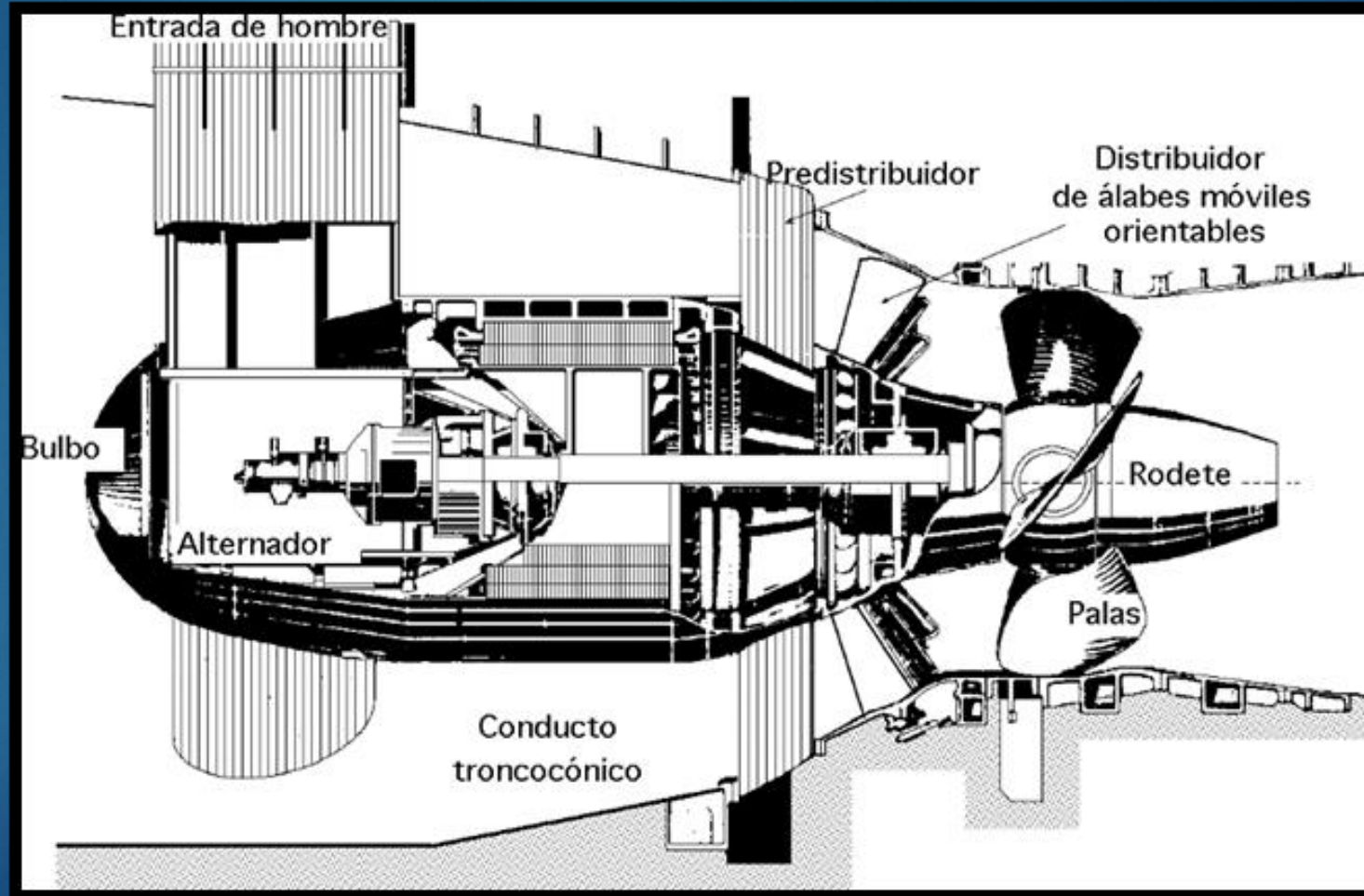
- ▶ Saltos de agua menores (1,5 a 20 m; 5 m. nominal) en comparación a dispositivos de centrales de represa.
- ▶ Generación en doble dirección (flujo y refluo).
- ▶ Funcionan como bombas.
- ▶ Rodete 5,3 m. diámetro → 10 MW P. Nominal.
↳ 11,7 m. de profundidad requerida.



Energía mareomotriz: ¿qué es?

11

► Turbina Bulbo.



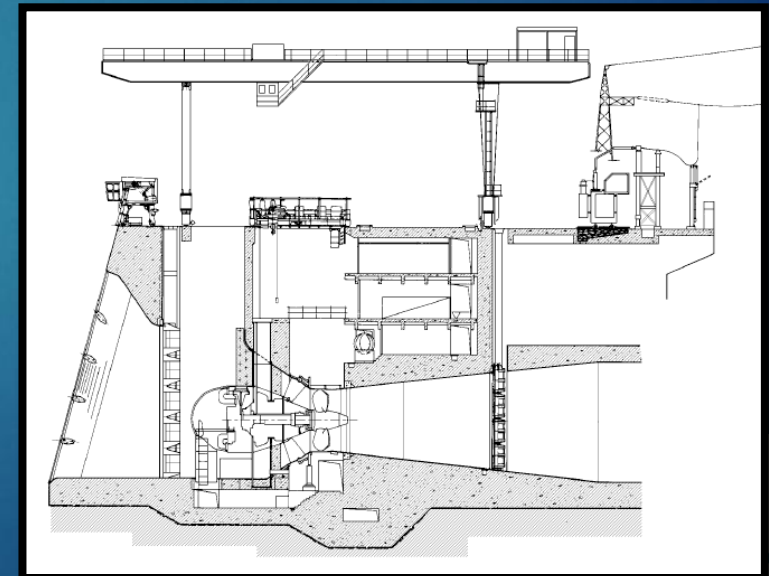
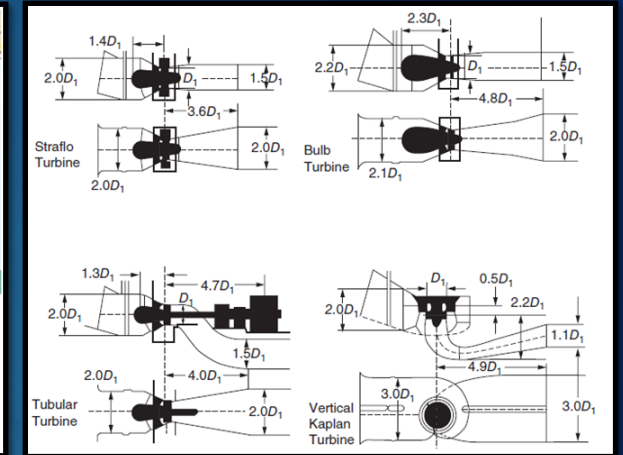
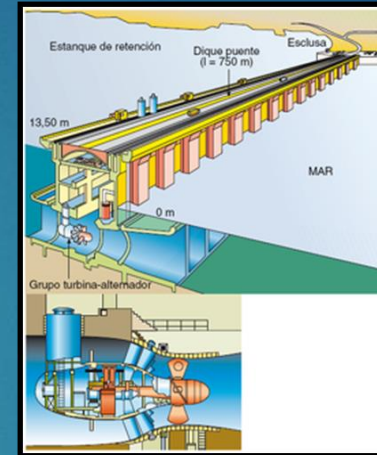
Energía mareomotriz: ¿qué es?

12

► Obra Civil: Barrera.

► Características:

- Variaciones “rápidas” de los niveles de agua.
- Según el caso, la producción de la central es en ambos sentidos.
- Barrera protegida frente a las olas.
- Su dimensión dependerá los equipos que se instalen.



Energía mareomotriz: ¿qué es?

13

► Estado del arte.

► Resumen centrales analizadas alrededor del mundo.

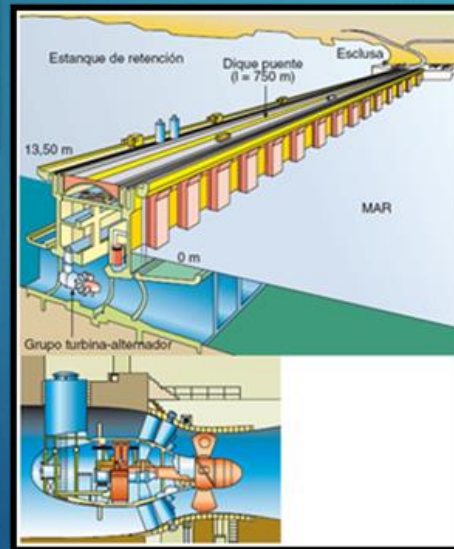
País	Central	Año puesta en marcha	Amplitud media de Marea (m)	Área de embalse (km ²)	Tipo de Turbina	Modo de Operación	Núm.. Turbinas Instaladas	Potencia del dispositivo (MW)	Potencia Instalada (MW)	Generación (GWh/año)
Francia	La Rance	1966	8,5	20	Bulbo	Doble	24	10	240	540
Corea del Sur	Sihwa	2011	9	43,8	Bulbo	Reflujo	10	25,4	254	552
China	Jiangxia	1980	7,1	2	Bulbo	Doble	5	0,5 a 0,7	3,2	7
Rusia	Kislaya	1968	2,4	2	Bulbo	Doble	1	0,4	0,4	3,5
Canadá	Annápolis	1984	6,4	6	Straflo	Reflujo	1	18	18	30



Energía mareomotriz: ¿qué es?

► Ejemplos Centrales Mareomotrices de barrera.

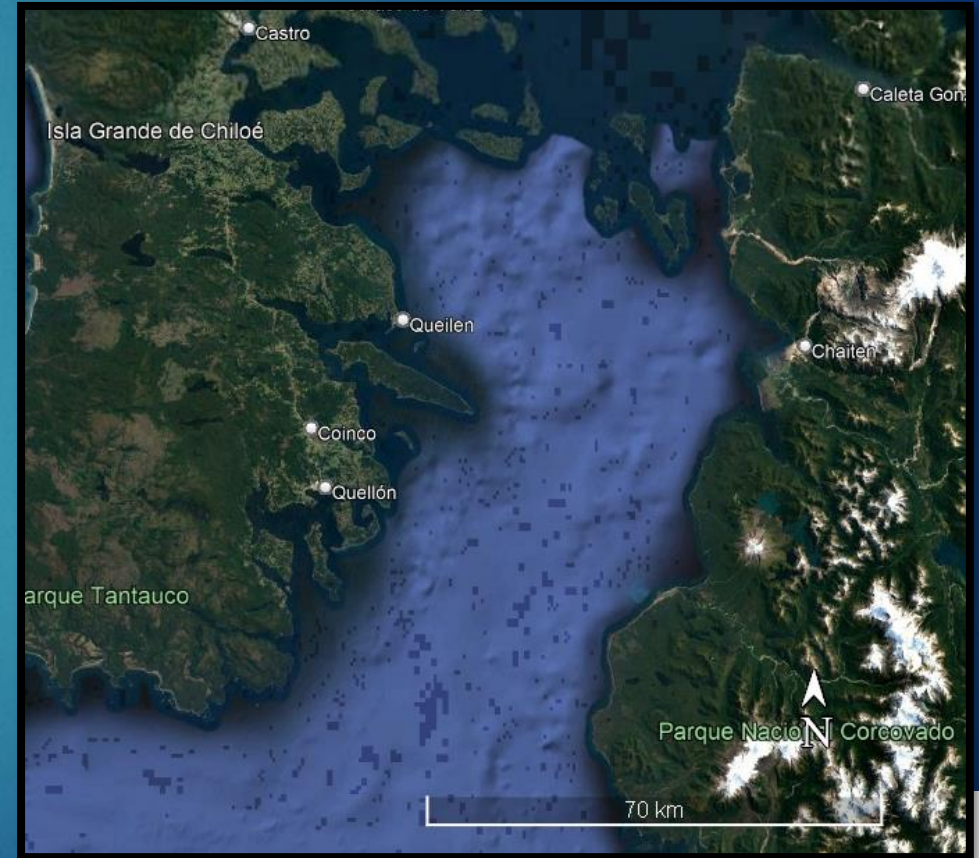
La Rance, Francia.



Sihwa, Corea del Sur



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.



Caracterización zona de interés.

16

Región de los Lagos ($40^{\circ}15'$ - $44^{\circ}14'$ S ; $74^{\circ}49'$ – $71^{\circ}34'$ O).

- Relieve y formas costeras acorde.
- Localidades cercanas pertenecen al SIC.
- Presencia de pequeñas termoeléctricas.

► Zonificación regional.

- Plan Regional Ordenamiento Territorial
 - Competitividad Regional fomenta desarrollo y transferencia tecnológica (cadena productiva de principales artículos y servicio).
- Desarrollo en torno a fomentar la industria alimenticia de la región.
- 11 centrales hidroeléctricas, 6 termoeléctricas (P.inst. 95,6 MW) y 3 parques eólicos.

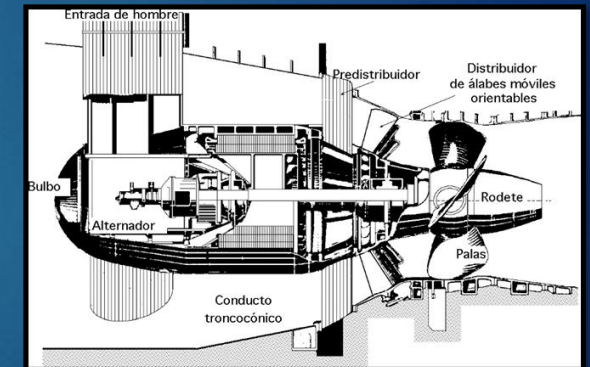


Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

► Condiciones naturales apropiadas para la generación.

- Rangos de marea preferentemente > 5 m.
- Barrera → Espacio suficiente para cerrar fiordo y albergar sala de maquinas.
- Área embalse → la mayor posible.
- Profundidad → Generadores siempre inundados.

Rango de marea	Preferentemente > 5 m de altura.
Largo óptimo de la barrera	Asegurar el máximo aprovechamiento de la energía potencial acumulada en el embalse.
Área de la zona embalsada	La mayor posible.
Morfología del lecho marino acorde a la entrada del embalse.	El fondo marino donde se instalará la barrera debe ser lo más regular posible y no presentar profundidades excesivas pero deben sobrepasar los 12 m para la instalación de dispositivos.



$$E_f = \rho * g * A_z * \frac{R^2}{2}$$



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

18

► Externalidades positivas/negativas.

Sectores de interés alejados de centros de consumo (De la mano con la capacidad productiva de la central).	La ubicación del embalse define si se alimenta una red eléctrica aislada o se adhiere a la red eléctrica del sistema interconectado central (SIC, SEN en la actualidad).
Capacidad portuaria acorde con las necesidades del proyecto.	En todas las etapas del proyecto son necesarios el transporte y manejo adecuado de materiales, maquinarias y mano de obra al lugar de implementación.
Conflictos con el uso del suelo.	Dados los antecedentes, las centrales mareomotrices de barrera, en su etapa constructiva, generan grandes cambios en el ecosistema intervenido.

Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

- ▶ Selección Preliminar.
- Google Earth → Posibles Embalses.
- Batimetría → Descarte preliminar
 - Mover barreras.
 - Generar mas barreras "ciegas".
 - Intervenir espacios diferentes al proyectado.

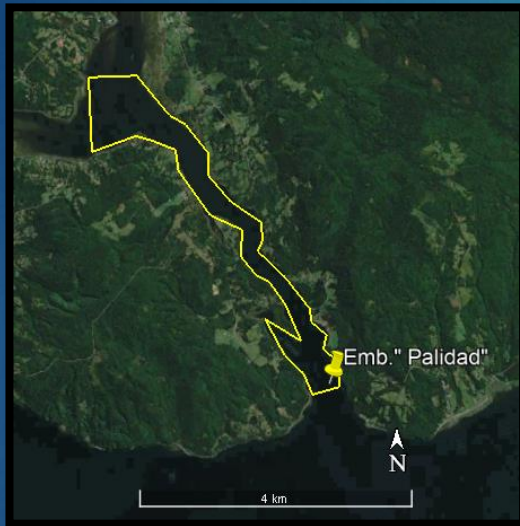
Embalse Propuestos Preliminarmente	Área del Embalse (km ²).	Longitud de la barrera preliminar (m).
Palidad/San Miguel	2,7	500
Embalse Asasao	7,9	1) 330 y 2) 500
Embalse El Dao	8,13	360
Embalse Castro	20,2	940
San Rafael	3,9	330
Embalse Calbuco	3,75	1) 380 y 2) 220
Embalse Puerto Montt	1,74	1) 320 y 2) 190
Embalse Auchac	8,7	580



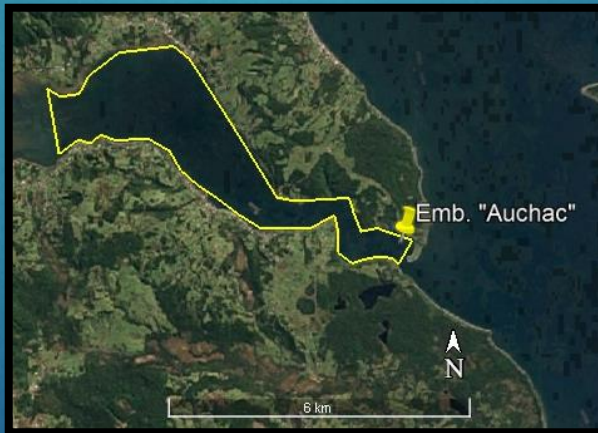
Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

20

► Embalse "Palidad".



► Embalse "Auchac".



► Embalse "Asasao".



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

21

► Embalse "San Rafael".



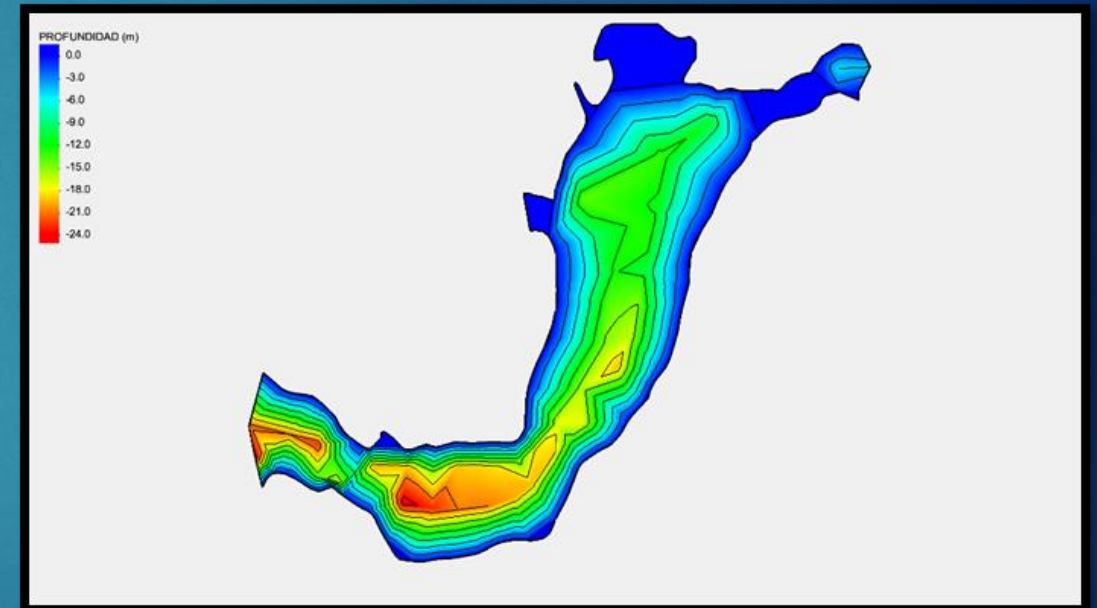
► Embalse "El Dao"



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

22

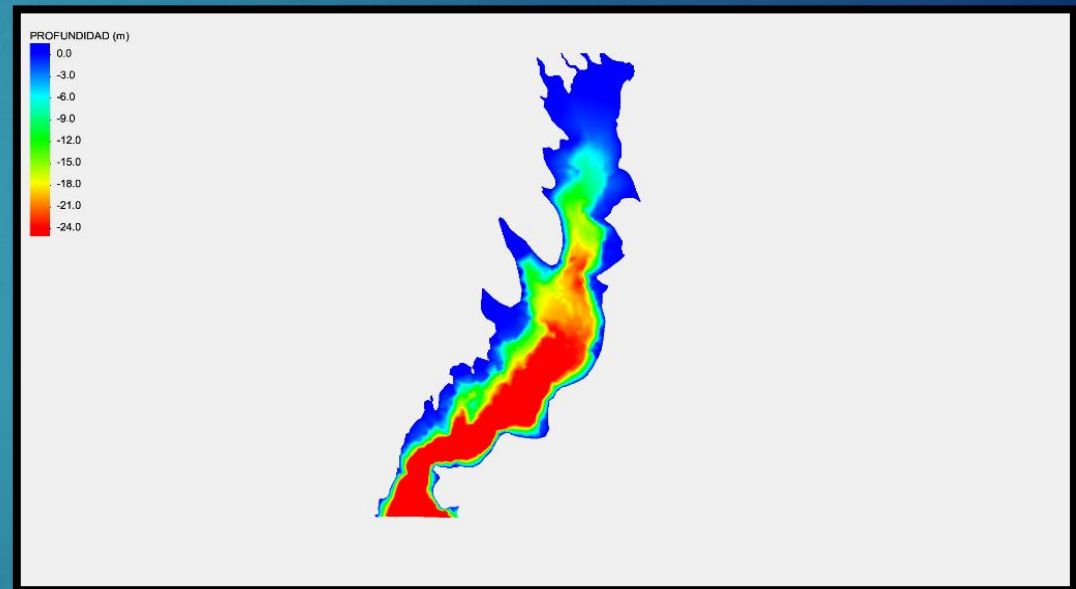
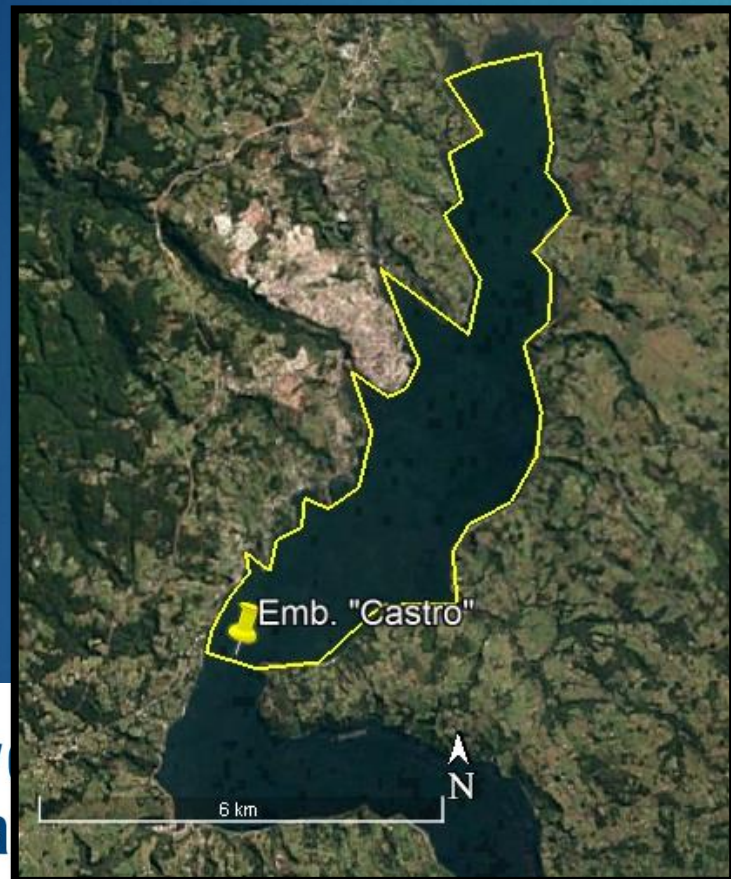
- Embalse "Calbuco".



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

23

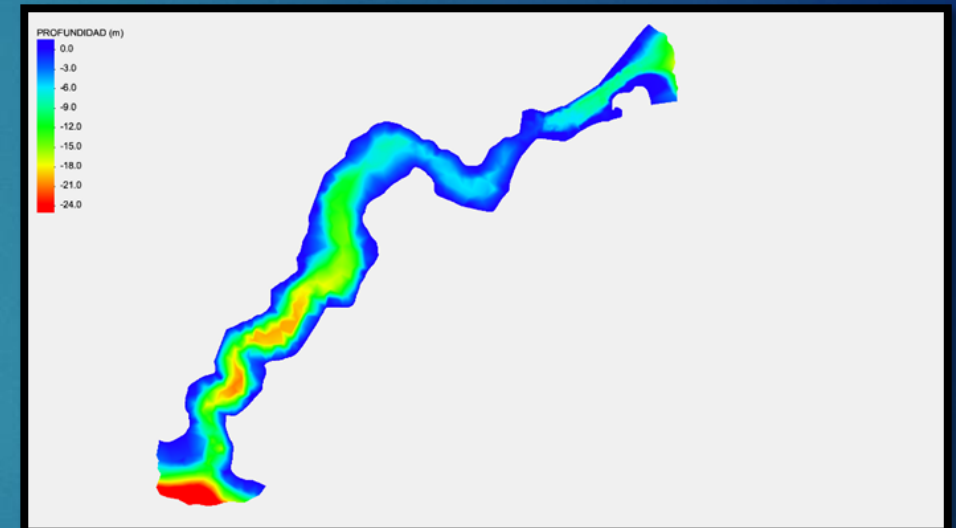
► Embalse "Castro"



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

24

- Embalse Puerto Montt.



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

▶ Antecedentes y Datos del entorno natural.

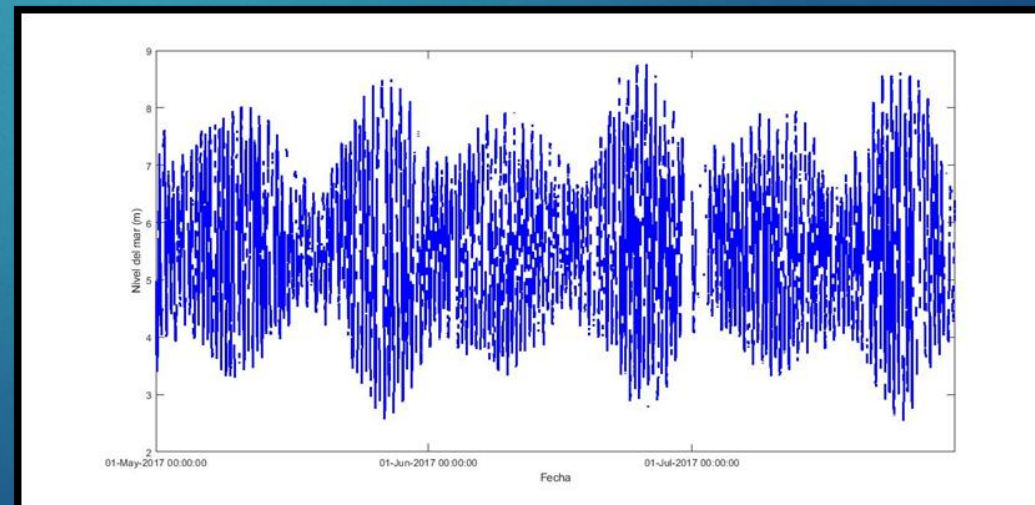
- Nivel del Mar  Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC, UNESCO).
- Estaciones de monitoreo tiempo real y datos históricos (Instalaciones SHOA).
- Serie de datos incompleta.

tidal amplitude and phase with 95% CI estimates

tide	freq	amp	amp_err	pha	pha_err	snr
MM	0.0015122	0.1445	0.187	289.82	90.14	0.6
MSF	0.0028219	0.0485	0.154	41.63	185.06	0.1
ALP1	0.0343966	0.1118	0.106	100.67	57.09	1.1
2Q1	0.0357064	0.0907	0.102	170.01	67.90	0.79
Q1	0.0372185	0.0745	0.092	117.28	87.17	0.66
O1	0.0387307	0.1372	0.112	337.99	45.88	1.5
NO1	0.0402686	0.0615	0.079	240.21	94.46	0.6
K1	0.0417807	0.0565	0.082	113.51	103.50	0.47
J1	0.0432929	0.0614	0.087	44.96	103.49	0.5
OO1	0.0448308	0.0779	0.084	106.32	71.49	0.87
UPS1	0.0463430	0.0983	0.093	145.73	60.34	1.1
*EPS2	0.0761773	0.1179	0.082	149.62	46.94	2.1
MU2	0.0776895	0.1095	0.090	324.20	45.10	1.5
*N2	0.0789992	0.3356	0.100	314.14	15.72	1.1
*M2	0.0805114	1.6145	0.092	205.91	2.92	3.1e+02
L2	0.0820236	0.0838	0.081	204.39	57.00	1.1
*S2	0.0833333	0.5070	0.087	199.48	10.66	3.4
ETA2	0.0850736	0.0663	0.084	290.11	67.79	0.62
MO3	0.1192421	0.0433	0.066	225.83	103.04	0.43
M3	0.1207671	0.0105	0.052	203.41	253.45	0.04
MK3	0.1222921	0.0747	0.078	160.67	63.29	0.92
SK3	0.1251141	0.0692	0.072	357.29	69.61	0.93
MN4	0.1595106	0.0579	0.073	51.38	89.65	0.62
*M4	0.1610228	0.2214	0.079	241.96	20.59	7.8
SN4	0.1623326	0.0575	0.084	297.18	91.02	0.47
MS4	0.1638447	0.0872	0.084	221.04	62.39	1.1
*S4	0.1666667	0.2099	0.088	157.80	27.54	5.8
2MK5	0.2028035	0.0429	0.081	1.73	116.18	0.28
2SK5	0.2084474	0.0035	0.069	13.20	254.66	0.0026
2MN6	0.2400221	0.0562	0.107	211.49	138.51	0.27
M6	0.2415342	0.0609	0.114	100.51	120.18	0.29
2MS6	0.2443561	0.0497	0.106	29.71	130.18	0.22
2SM6	0.2471781	0.0824	0.107	311.72	101.13	0.59
3MK7	0.2833149	0.0784	0.073	240.03	70.55	1.2
M8	0.3220456	0.0708	0.085	265.20	67.04	0.7

↓

Análisis armónico
para el período
mediante t_tide de MatLab
+ Residuo
(01-05-2017 a 30-07-2017).



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

- Rangos de Marea Embalses seleccionados (01-05-2017 a 30-07-2017).

- Puerto Montt

N° Pleas	N° Bajas	
176	176	
Max. Plea	Min. Baja	
10,027	3,329	
Nivel Medio del Mar	Nivel Medio de Marea	
8,634	6,591	
Alt. Med. Pleamar	Alt. Med. Plea Mas Alta	
8,634	9,123	
Alt. Med. Bajamar	Alt. Med. Baja Más Baja	
4,549	4,079	
NRS	Rango Medio Marea	
3,329	4,085	
Rango Marea Sicigia	Desigualdad media Diurna	
5,625	0,490	Plea
	0,470	Baja

- Castro

N° Pleas	N° Bajas	
176	176	
Max. Plea	Min. Baja	
8,593	2,728	
Nivel Medio del Mar	Nivel Medio de Marea	
7,348	5,557	
Alt. Med. Pleamar	Alt. Med. Plea Más Alta	
7,310	7,784	
Alt. Med. Bajamar	Alt. Med. Baja Más Baja	
3,765	3,363	
NRS	Rango Medio Marea	
2,728	3,545	
Rango Marea Sicigia	Desigualdad media Diurna	
5,173	0,473	Plea
	0,402	Baja

Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

► Energía Proporcionada por Embalse.

-Embalse Puerto Montt.

3 meses	Efecto simple	Efecto doble	
Flujo	3,0434	4,5759	GWh
Reflujo	3,0578		

Aproximación Anual (Nivel mínimo de producción)	12,1736	18,3044	GWh
	12,2312		

- Embalse Castro.

3 meses	Efecto simple	Efecto doble	
Flujo	27,3242	41,0572	GWh
Reflujo	27,4187		

Aproximación Anual (Nivel mínimo de producción)	109,2968	164,2288	GWh
	109,6748		

Conclusión.

A la fecha, la tecnología que se utiliza convencionalmente en este tipo de proyectos aún no alcanza el desarrollo necesario para aprovechar saltos de agua tan bajos, como los encontrados en la zona de estudio, pues no son suficientes para que los equipos alcancen su velocidad nominal.

Por otro lado, los avances hasta ahora alcanzados nos hacen pensar que otros tipos de dispositivos podrían aprovechar la energía disponible en el movimiento vertical del nivel del mar ya que, como se observó en el estudio, el “Embalse Castro”, por ejemplo, contiene y es posible extraer mediante estas centrales, una cantidad de energía de entre un 7% a un 10,5% aproximadamente, de la energía consumida por la región mensualmente dentro del período analizado.

Por lo anterior se hacen necesarios estudios que busquen mejorar el desempeño de la tecnología actual para su implementación en la zona, ya que la energía acumulada está presente y disponible.

Muchas gracias.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ DE LAS CORRIENTES DE MAREA EN EL GOLFO DE CORCOVADO, GOLFO DE ANCUD Y PUERTO MONTE.

NICOLÁS YANKO BOGDANIC HERNÁNDEZ.

PROFESOR GUÍA: JAIME LEYTON ESPOZ.

INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA.

2023

Diapositivas extras de apoyo.

Energía mareomotriz: ¿qué es?

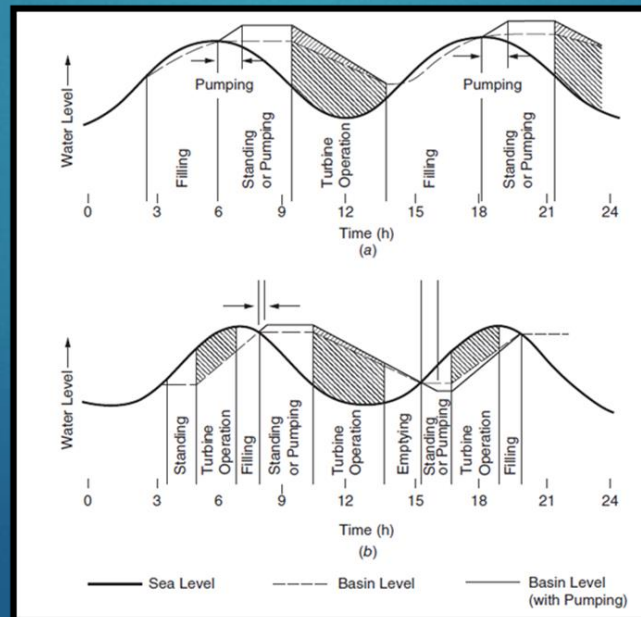
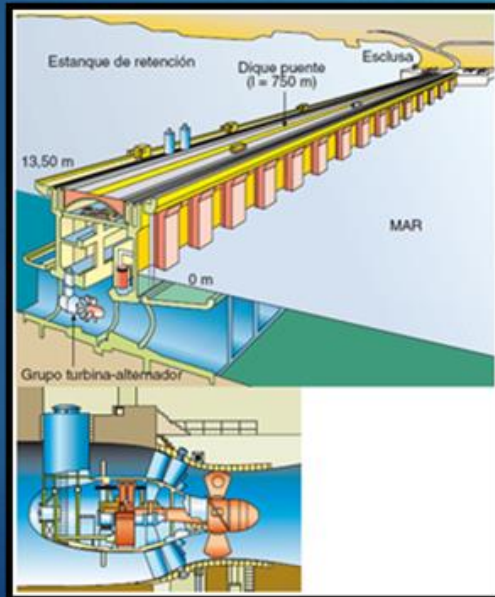
► Estado del arte: Proyectos alrededor del mundo.

I. La Rance (Bretaña, Francia).

54 m. de ancho, 750 m. de largo y 27 m. de altura.

Cuenta con 24 turbinas bulbo de 10 MW.

Generación anual 540 GWh/año.



Energía mareomotriz: ¿qué es?

33

► Estado del arte: Proyectos alrededor del mundo.

2. Planta Mareomotriz Sihwa (Ansan, Corea del Sur).

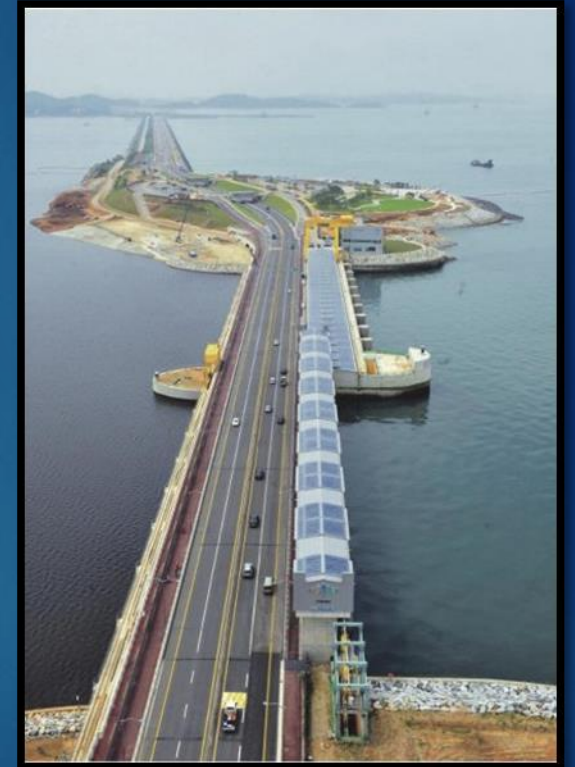
Dique de 12,7 km. de largo, mitiga inundación.

Posee un área de embalse de 43,8 km².

Modo Reflujo simple. Rango de marea de hasta 9 m.

10 generadores de 25,4 MW.

Generación 552 GWh/año.

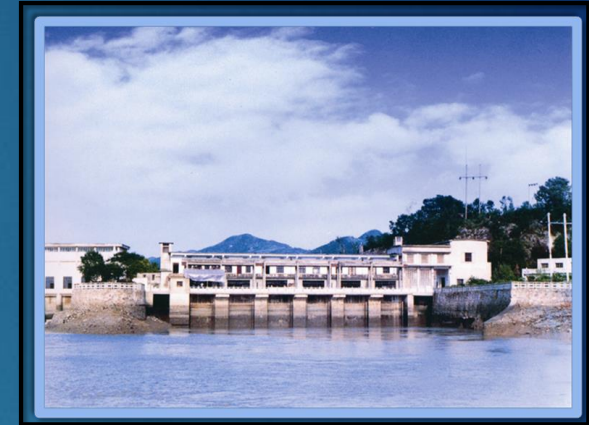


Energía mareomotriz: ¿qué es?

34

► Estado del arte: Proyectos alrededor del mundo.

3. Planta Mareomotriz Jiangxia (Zhejiang, China).
Rango medio de marea de 7,1 m., embalse 2 km².
Capacidad instalada de 3,2 MW en combinación de turbinas Straflo y Bulbo. Genera 7 GWh/año.



Energía mareomotriz: ¿qué es?

35

► Estado del arte: Proyectos alrededor del mundo.

4. Planta Mareomotriz Kislaya Guba (Mar de Barents, Rusia).

Central piloto (1968), 1 unidad bulbo (400 kW).

Grandes estragos ambientales, llegando nuevo equilibrio. Genera 3,5 GWh/año.



5. Planta Mareomotriz de Annapolis (Canadá).

44,3 m. de ancho, 30,5 m de alto y 47 m. de largo.

1 turbina Straflo 18 MW, modo simple de reflujos.

Gran impacto ambiental ictiofauna y transporte sedimentario. Genera 30 GWh/año.



Energía mareomotriz: ¿qué es?

36

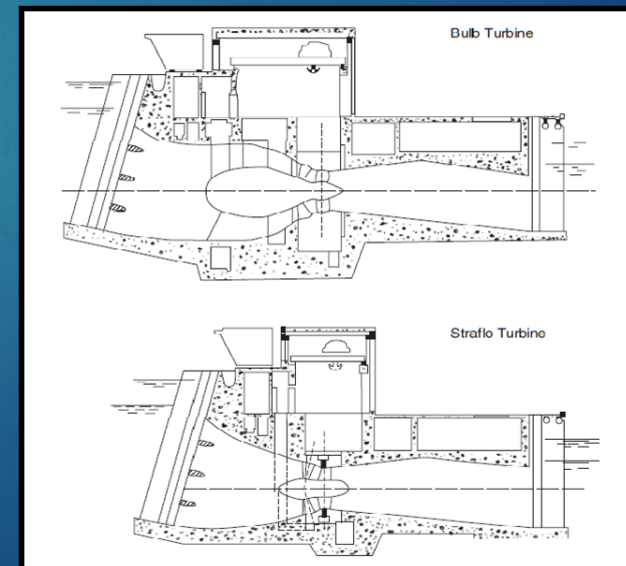
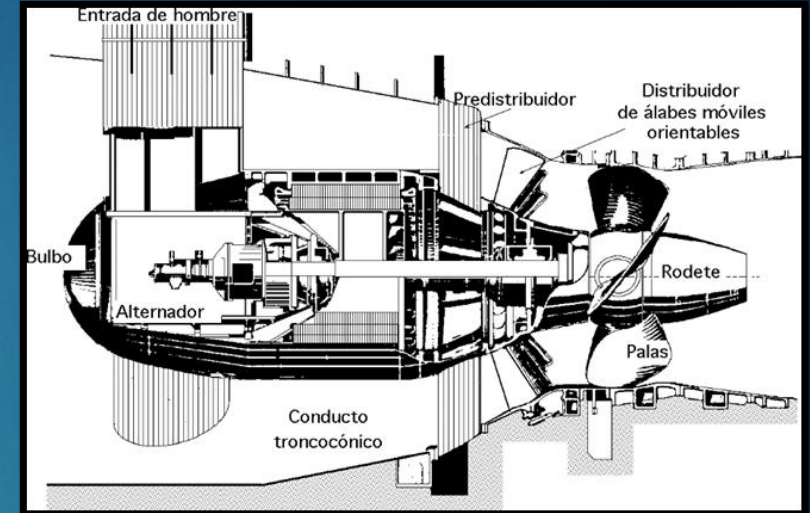
▶ Turbinas Generadoras.

▶ Bulbo:

- ▶ Saltos de agua menores (1,5 a 20 m; 5 m. nominal).
- ▶ Generación en doble dirección (flujo y refluo).
- ▶ Funcionan como bombas.
- ▶ Rodete 5,3 m. diámetro → 10 MW P. Nominal
↳ 11,7 m. de profundidad requerida.

▶ Straflo:

- ▶ Mas pequeñas, menos espacio utilizado.
- ▶ Rendimiento similar bajo el mismo salto.
- ▶ Un solo sentido de funcionamiento.
- ▶ No funcionan como bombas
- ▶ Disminuye el tamaño de la obra civil.
- ▶ Mayor eficiencia mejorando el trazado hidráulico.
- ▶ Rodete 7,6 m. diámetro → 18 MW P. Nominal.

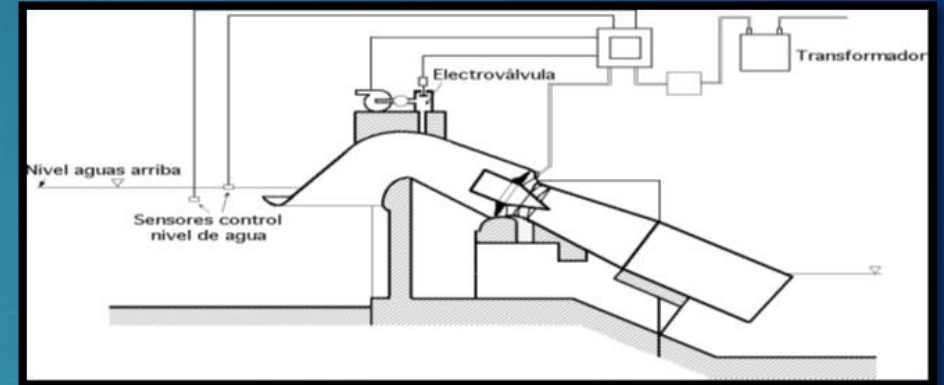


Energía mareomotriz: ¿qué es?

37

▶ Turbinas Generadoras.

- ▶ Bulbo con Sifón (Ultra bajo salto).
 - ▶ Saltos de 1,5 a 3,5 metros.
 - ▶ 400 kW en dispositivos grandes, 2 m. de diámetro del rodete.
 - ▶ Utilizadas en minicentrales hidroeléctricas.
- ▶ Turbinas V.L.H.
 - ▶ Salto nominal 2,5 metros.
 - ▶ 450 kW en dispositivos de 4,5 metros de diámetro.
 - ▶ *Ichthyophile* (amigable con los peces) (34 rpm).



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

- ▶ Antecedentes y Datos del entorno natural.
 - Imágenes satelitales Google Earth.
 - Batimetría del lugar SHOA+Global Mapper 15+ADCIRC(SMS).

Cartas Utilizadas	Nombre	Tipo	Escala
CL2A1081	Isla Guafo a Golfo de Penas	M	500.000
CL2LL070	Bahía de Corral a Isla Guafo	G	350.000
CL2LL071	Bahía de Corral a Isla Guafo (C. Norte)	M	500.000
CL2LL072	Bahía de Corral a Isla Guafo (C. Sur)	M	500.000
CL4LL030	Paso Guar a Golfo de Ancud	G	40.000
CL4LL060	Canal Dalcahue a Canal Yal	G	50.000
CL5LL013	Paso Tautil	M	20.000
CL5LL015	Puerto Calbuco	M	20.000
CL5LL020	Puerto Pilolcura	M	5.000
CL5LL025	Puerto Montt	G	10.000
CL5LL030	Zona Portuaria	M	5.000
CL5LL040	Estero Castro	M	20.000
CL6LL010	Marina de Chilquihue	P	2.000

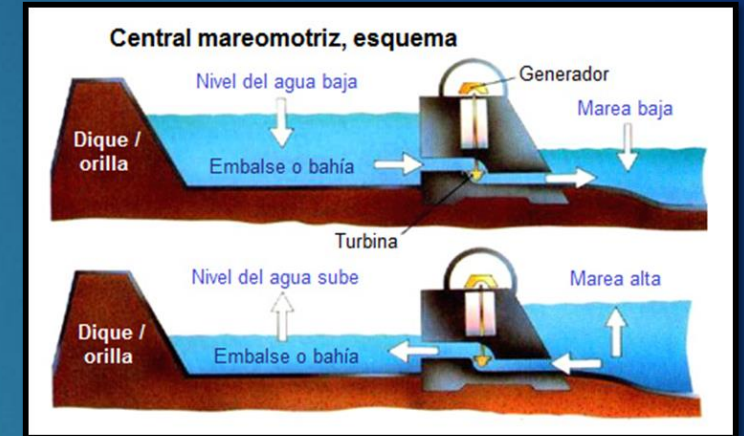
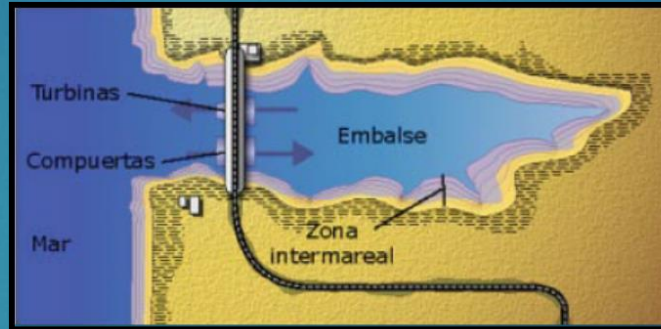
Energía mareomotriz: ¿qué es?

► Energía potencial y cinética de las mareas.

► Potencial.

$$E_f = \rho * g * A_z * \frac{R^2}{2}$$

$$P_{electrica} = P_{total} * N * \frac{T_{gen}}{3600}$$



► Cinética.

$$E_k = \frac{1}{2} * m * v^2$$

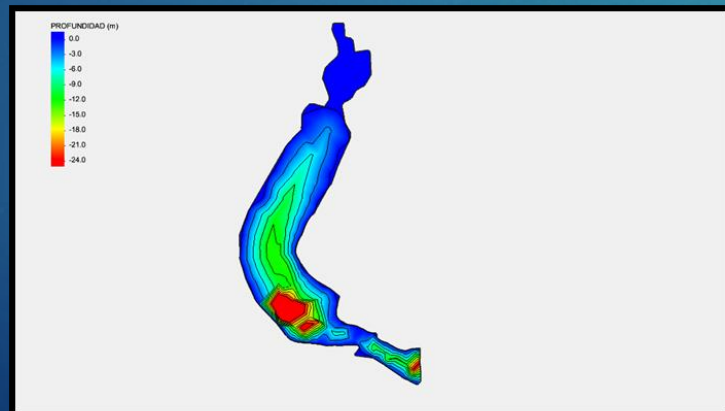
$$P = \frac{1}{2} * A * \rho * v^3$$



Potencial mareomotriz mediante embalses en la Región de Los Lagos.

40

► Embalse “San Rafael”.



► Embalse “El Dao”

