

DEFENSA DE PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE
IMPLEMENTAR UN DISPOSITIVO DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ
EN CHILE

Pablo Ignacio Díaz Piccardo

Comisión:

- ✓ Felipe Caselli
- ✓ Manuel Meneses (Profesor Guía)
- ✓ Matías Quezada

Enero 2022

ÍNDICE

Introducción.....	3
Alcance.....	6
Objetivos.....	7
Contexto.....	8
Metodología.....	10
Aplicación de metodología.....	11
Resultados.....	28
Conclusiones.....	43

Cambio climático

La humanidad se está viendo enfrentada a la era de un cambio climático sin precedentes (Ölçer *et al.*, 2018)

Ante esto...

La comunidad internacional busca disminuir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)

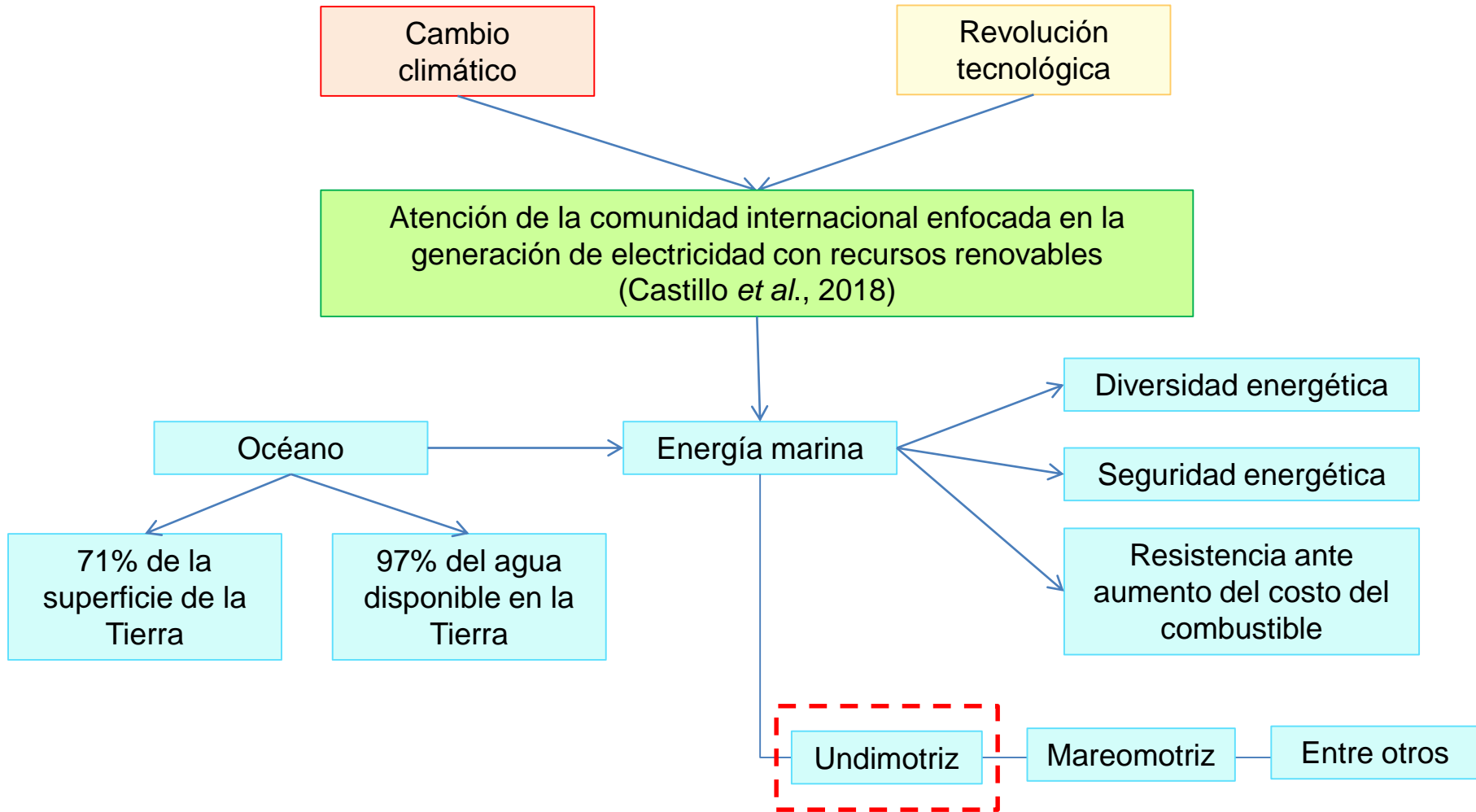
Descarbonización de la matriz energética mundial (Gobierno de Chile, 2015).

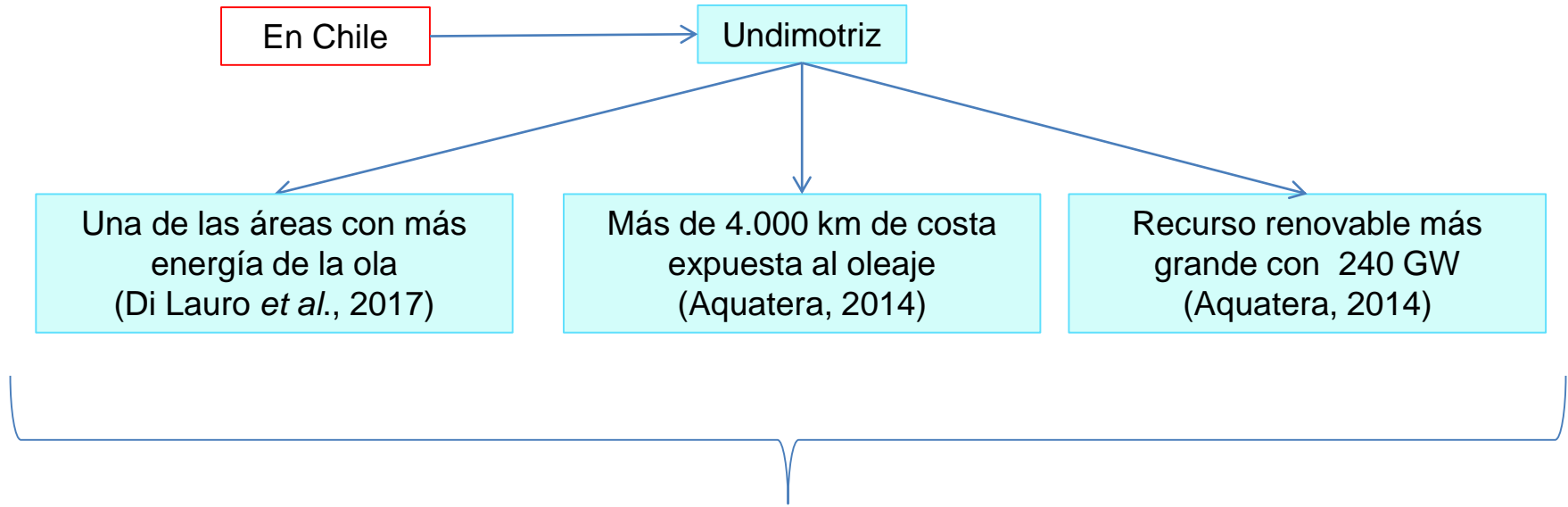
Por otro lado, en los últimos años, se ha presenciado una revolución tecnológica en las energías renovables

Modificación de la matriz energética mundial (Gobierno de Chile, 2015).

Revolución tecnológica

INTRODUCCIÓN





Se considera interesante conocer la prefactibilidad de instalar un dispositivo de captación de energía undimotriz en algún punto de la costa de Chile

- ✓ La información contenida y los parámetros considerados corresponden a información, principalmente, disponible de forma abierta y digital.
- ✓ En el documento no se pretende determinar la viabilidad de los aspectos ambientales ni político/legal.
- ✓ Para la evaluación de prefactibilidad técnico-económica solo se contempla un dispositivo de captación de energía marina del tipo undimotriz.
- ✓ La evaluación económica se realizará a partir de los indicadores valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y periodo de retorno de la inversión (PRI).
- ✓ No se considera comparar con otras energías, ni convencionales ni renovables.
- ✓ No se consideró desarrollo de estudios marítimos.
- ✓ Para la batimetría se utilizaron las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).
- ✓ No se consideran variaciones en las condiciones de oleaje debido al cambio climático.

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Determinar la prefactibilidad técnico-económica de implementar un dispositivo de captación de energía undimotriz en Chile.

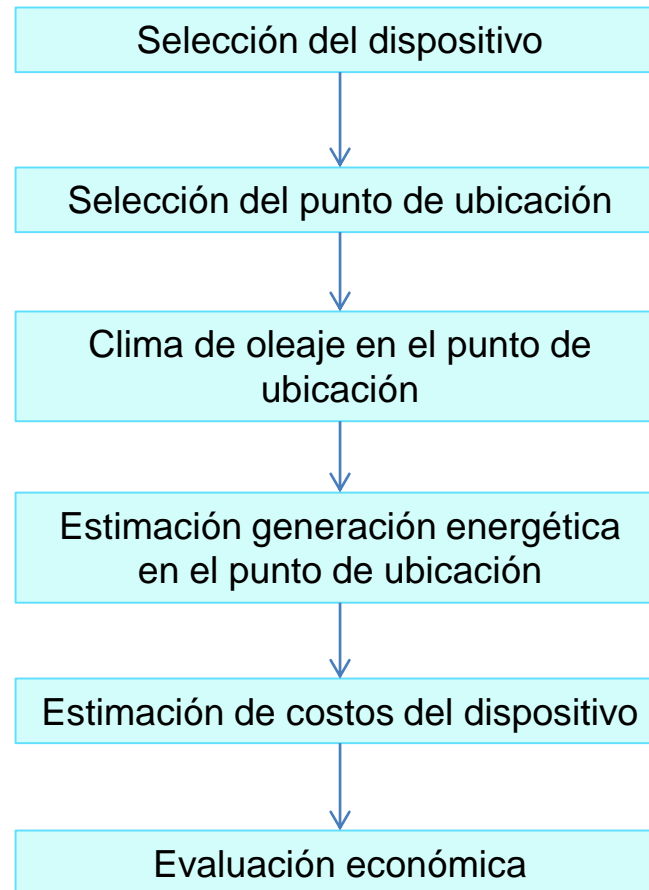
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Aplicar metodología propuesta en una localidad específica del país.
- ✓ Definir un dispositivo de generación undimotriz e identificar sus aspectos técnicos.
- ✓ Seleccionar un punto específico de estudio en la localidad seleccionada, basándose en criterios técnicos.
- ✓ Analizar el desempeño del dispositivo en el punto seleccionado, estimando los ingresos y costos asociados a la producción energética del dispositivo.
- ✓ Evaluar económicamente la implementación del dispositivo.

- ✓ El escenario energético mundial, con las políticas actuales, tiene una demanda de energía que aumenta un 1,3% por cada año hasta el 2040. Esto implica un aumento incesante de las emisiones (International Energy Agency, 2019).
- ✓ En base a diferentes medidas, dentro de las que se encuentra la irrupción de las energías renovables en la matriz energética, se proyecta una desaceleración de las emisiones (International Energy Agency, 2019).
- ✓ En Chile, una meta para el año 2050 (Política Energética) es la generación de, al menos, 70% de la energía eléctrica a través de energías renovables.
- ✓ A pesar que en Chile ha explotado el crecimiento de las tecnologías renovables no convencionales del último tiempo, la oferta energética se compone principalmente de fuentes del tipo convencional (Ministerio de Energía, 2018).
- ✓ La demanda de potencia crece, en promedio, un 7% (Ministerio de Energía, 2018)

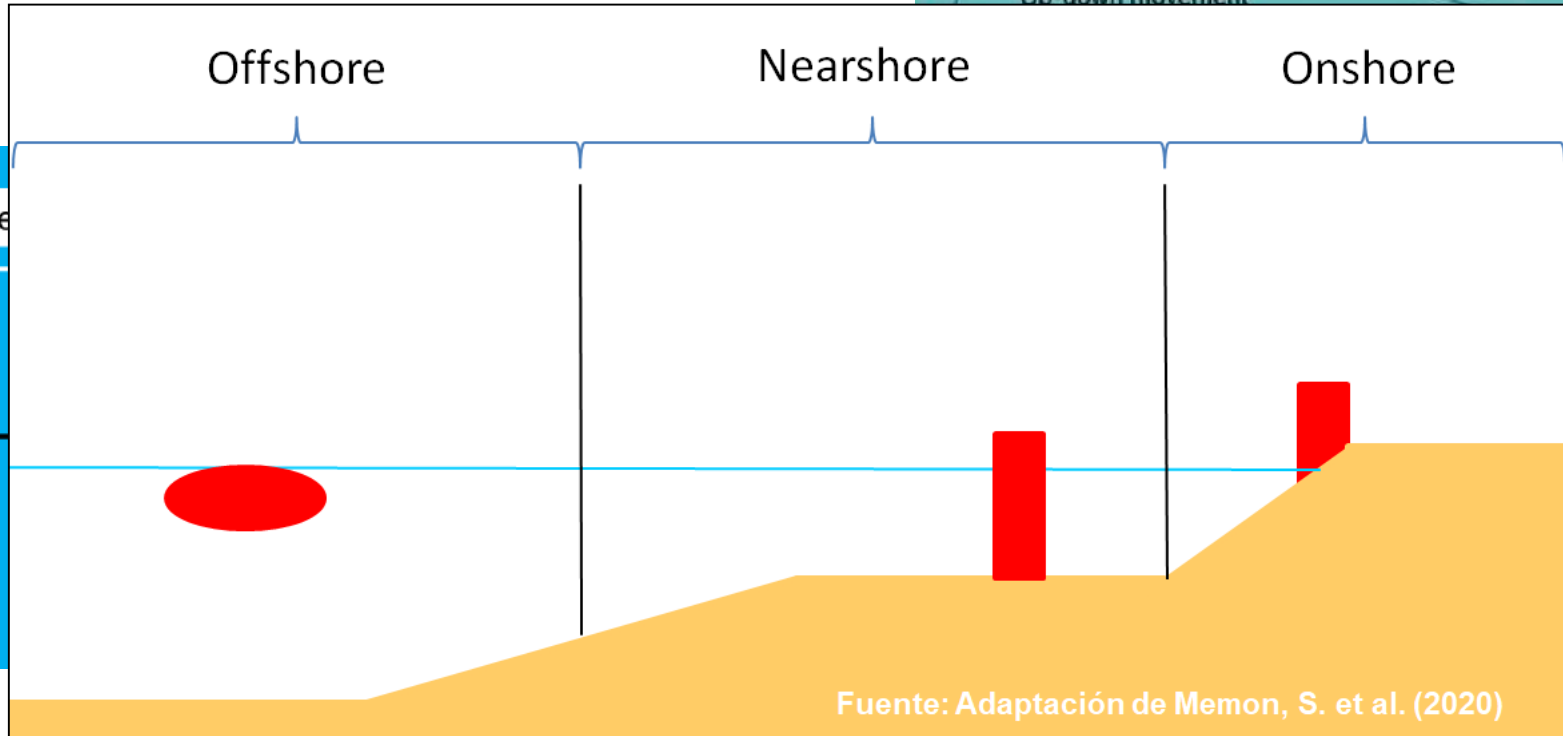
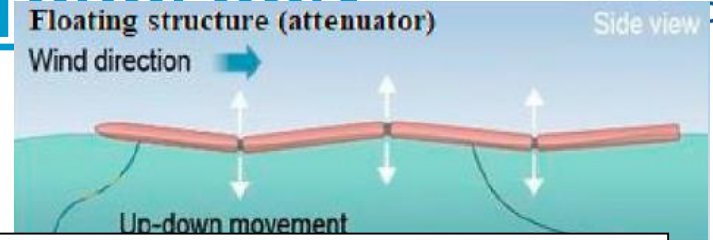
- ✓ Los combustibles fósiles (petróleo crudo, gas natural y carbón) son los que realizan el principal aporte en la matriz energética, con un aporte del 66% respecto del total (Comisión Nacional de Energía, 2020).
- ✓ Dado la necesidad de generar un 70% mediante energías renovables, es necesario explotar otras formas de energía menos desarrolladas y que cuentan con alto potencial; posicionándose, de esta forma, las energías marinas como un recurso importante y prometedor (Castillo et al., 2018).

METODOLOGÍA





SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO





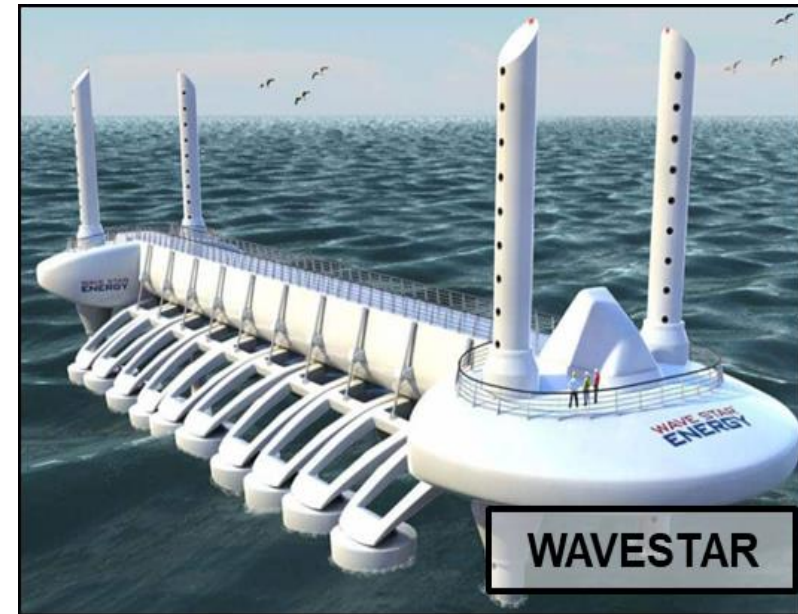
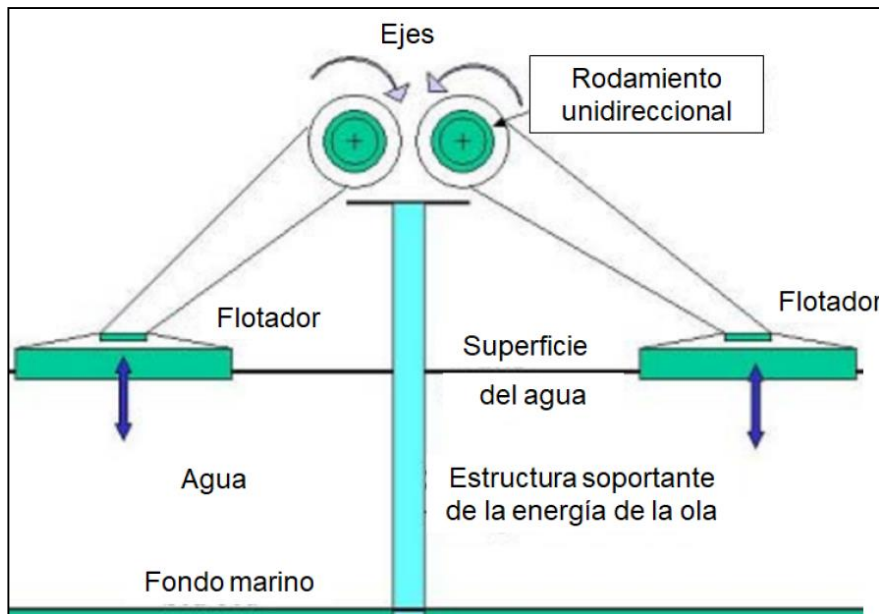
SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO

Selección del dispositivo



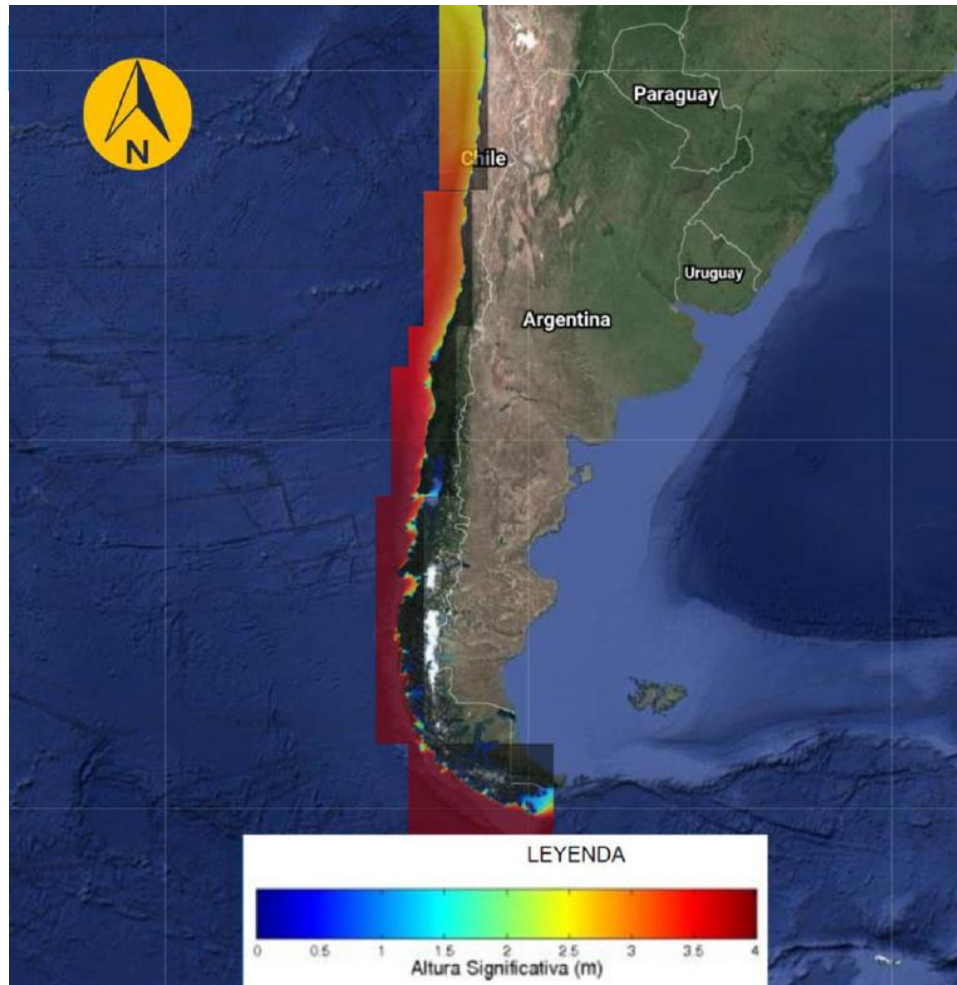
SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO

- ✓ 20 flotadores.
- ✓ 70 m de largo.
- ✓ 17 m ancho.
- ✓ 6,5 m altura.
- ✓ Costo dispositivo: 45,5 millones USD.

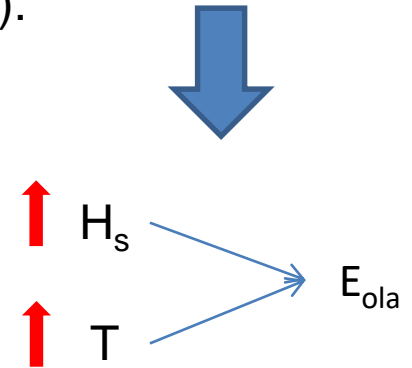


Fuente: Adaptación de Wave Star Energy (2004).

SELECCIÓN DEL PUNTO DE UBICACIÓN



- ✓ Explorador de Energía Marina.
- ✓ Altura de ola (H_s), periodo (T) y energía undimotriz (E_{ola}).

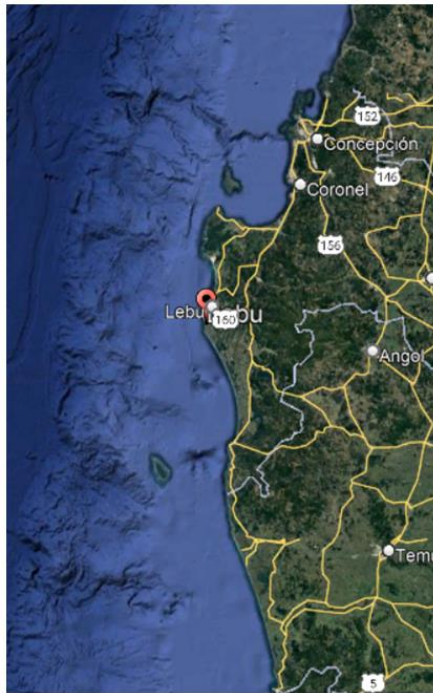


SELECCIÓN DEL PUNTO DE UBICACIÓN

- ✓ Sector expuesto al oleaje.
- ✓ Lebu, Región del Biobío.
- ✓ Coordenadas:

Latitud: $-37,592720^{\circ}$

Longitud: $-73,674908^{\circ}$



CLIMA DE OLA EN EL PUNTO DE UBICACIÓN

- ✓ Parámetros de resumen promedios del año 2010.

Mes	Hs [m]	Tm [s]
Enero	2,70	9,63
Febrero	2,49	9,03
Marzo	2,40	10,08
Abril	2,68	10,54
Mayo	2,90	10,62
Junio	3,23	9,83
Julio	3,27	9,97
Agosto	3,09	10,41
Septiembre	2,59	9,78
Octubre	2,90	9,97
Noviembre	2,62	9,20
Diciembre	2,44	9,26
Promedio:	2,78	9,86

ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN EN EL PUNTO DE UBICACIÓN

Mes	Hs [m]	Tm [s]	Potencia WaveStar (kW)
Enero	2,70	9,63	2.394
Febrero	2,49	9,03	2.132
Marzo	2,40	10,08	1.676
Abril	2,68	10,54	2.240
Mayo	2,90	10,62	2.240
Junio	3,23	9,83	3.051
Julio	3,27	9,97	3.051
Agosto	3,09	10,41	2.841
Septiembre	2,59	9,78	2.394
Octubre	2,90	9,97	2.394
Noviembre	2,62	9,20	2.394
Diciembre	2,44	9,26	1.777
Promedio:	2,78	9,86	2.382

ESTIMACIÓN DE COSTOS

- ✓ Dispositivo (suministro e instalación),
- ✓ Conexión a la red,
- ✓ Costos de operación y mantenimiento,
- ✓ Gastos administrativos,
- ✓ Entre otros.

ESTIMACIÓN DE COSTOS: DISPOSITIVO

Costos	% de C.I	USD	CLP
Dispositivo WaveStar	-	42.507.949	33.234.840.000
Instalación WaveStar	10	4.248.000	3.321.298.800
Amarres	Incluido en la fabricación del dispositivo		
Instalación amarres	Incluido en la fabricación del dispositivo		
Gestión del proyecto	Incluido en la fabricación del dispositivo		
Piezas de repuesto	2	849.600	664.259.760
Conexión a la red	5	2.124.000	1.660.649.400

ESTIMACIÓN DE COSTOS: CABLEADO



Rango (MW)	kV	Suministro/km (USD)	Suministro/km (CLP)
0,25 - 7	20	79.419	62.093.759
8,1 - 20	38	232.873	182.071.532
21 - 110	110	387.672	303.101.741

Tipo	Instalación/km (USD)	Instalación/km (CLP)
Sin zanja	138.151	108.013.230
Con zanja	389.585	304.597.309
Cubierto de roca	1.297.236	1.014.244.230

ESTIMACIÓN DE COSTOS: CABLEADO



Tipo	km
Sin zanja	7,51
Con zanja	0,78
Cubierto de roca	0,39

ESTIMACIÓN DE COSTOS: CABLEADO

Tipo	km	Instalación (USD)	Instalación (CLP)
Sin zanja	7,51	1.037.513	811.179.357
Con zanja	0,78	303.877	237.585.901
Cubierto de roca	0,39	505.922	395.555.250
Total:		1.847.312	1.444.320.508

ESTIMACIÓN DE COSTOS:

Costos	USD	CLP
Dispositivo WaveStar	42.507.949	33.234.840.000
Instalación WaveStar	4.248.000	3.321.298.800
Amarres	Incluido en la fabricación del dispositivo	
Instalación amarres	Incluido en la fabricación del dispositivo	
Gestión del proyecto	Incluido en la fabricación del dispositivo	
Cable	688.904	538.619.455
Instalación de cableado	1.846.097	1.443.370.863
Piezas de repuesto	849.600	664.259.760
Estudio Impacto Ambiental	447.656	350.000.000
Conexión a la red	2.124.000	1.660.649.400
Total:	52.712.206	41.213.038.278
Seguro	1.577.529	1.233.391.148
Total final:	54.161.833	42.346.429.426

ESTIMACIÓN DE COSTOS:

OPEX anual	USD	CLP
Gastos operacionales	269.018	214.327.034

Elemento	Vida útil [años]
Dispositivo WaveStar	10
Cableado	20
Piezas de repuesto	10
Conexión a la red	10

Fuente: Tabla Vida Útil SII.

ESTIMACIÓN DE INGRESOS

- ✓ Venta de energía.
- ✓ Venta de potencia.
- ✓ Precio medio de inyección de energía: 75,5 USD/MWh
- ✓ Precio Potencia: 7,65 USD/kW/mes

Mes	Ingreso Energía (USD)	Ingreso Potencia (USD)
Enero	134.476	27.540
Febrero	108.182	27.540
Marzo	94.144	27.540
Abril	121.766	27.540
Mayo	125.825	27.540
Junio	165.852	27.540
Julio	171.381	27.540
Agosto	159.585	27.540
Septiembre	130.138	27.540
Octubre	134.476	27.540
Noviembre	130.138	27.540
Diciembre	99.818	27.540
Total anual	1.575.780	330.480

ESTIMACIÓN DE INGRESOS

Año	Pe (\$/MWh)	Variación Anual	Pp (\$/kW/mes)	Variación Anual
2016	56,705	-	6,095	-
2017	63,344	12%	6,087	0%
2018	47,778	-25%	5,384	-13%
2019	63,482	33%	6,109	13%
2020	60,005	-5%	6,083	0%
	Promedio:	4%		0%

EVALUACIÓN ECONÓMICA

- ✓ Horizonte del proyecto: 20 años (Marquis et al., 2010).
- ✓ Tasa de descuento: 8,5% (Ley 20.936 , 2016).
- ✓ Tasa de inflación: 2,97%
- ✓ Impuesto a la renta: 27% (Ley de Impuesto a la renta)



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos de caja											
Venta de energía	1.575.780	1.638.812	1.704.364	1.772.539	1.843.440	1.917.178	1.993.865	2.073.620	2.156.564	2.242.827	
Venta de potencia	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	
Costos de operación y mantenimiento	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	
Costos por consumo de energía	-9.531	-9.846	-10.174	-10.515	-10.870	-11.238	-11.622	-12.020	-12.435	-12.867	
Depreciación											
Dispositivo WaveStar (VU=10 años)	-4.250.795	-4.250.795	-4.250.795	-4.250.795	-4.250.795	-4.250.795	-4.250.795	-4.250.795	-4.250.795	-4.250.795	
Cableado (VU=20 años)	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	
Piezas de repuesto (VU=10 años)	-84.960	-84.960	-84.960	-84.960	-84.960	-84.960	-84.960	-84.960	-84.960	-84.960	
Conexión a la red (VU=10 años)	-212.400	-212.400	-212.400	-212.400	-212.400	-212.400	-212.400	-212.400	-212.400	-212.400	
<i>Utilidad antes de impuesto</i>	-2.954.889	-2.892.173	-2.826.949	-2.759.115	-2.688.568	-2.615.199	-2.538.895	-2.459.540	-2.377.009	-2.291.178	
<i>Pérdida</i>	0	-2.954.889	-5.847.063	-8.674.012	-11.433.127	-14.121.695	-16.736.894	-19.275.789	-21.735.329	-24.112.338	
<i>Impuesto(27%)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Utilidad neta</i>	-2.954.889	-2.892.173	-2.826.949	-2.759.115	-2.688.568	-2.615.199	-2.538.895	-2.459.540	-2.377.009	-2.291.178	
<i>Depreciación de instalaciones</i>	4.582.600	4.582.600	4.582.600	4.582.600	4.582.600	4.582.600	4.582.600	4.582.600	4.582.600	4.582.600	
FLUJO DE CAJA	0	1.627.711	1.690.427	1.755.651	1.823.485	1.894.032	1.967.401	2.043.705	2.123.061	2.205.591	2.291.422
Egresos de caja											
Dispositivo WaveStar	-42.507.949										
Instalación WaveStar	-4.248.000										
Cable	-688.904										
Instalación de cableado	-1.846.097										
Piezas de repuesto	-849.600										
Estudio Impacto Ambiental	-319.754										
Conexión a la red	-2.124.000										
Seguro	-1.577.529										
FLUJO DE CAPITAL	-54.161.833	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
FLUJO DE CAJA NETO	-54.161.833	1.627.711	1.690.427	1.755.651	1.823.485	1.894.032	1.967.401	2.043.705	2.123.061	2.205.591	2.291.422
FLUJO DE CAJA ACUMULADO	-54.161.833	-52.534.123	-50.843.696	-49.088.045	-47.264.560	-45.370.527	-43.403.126	-41.359.422	-39.236.361	-37.030.770	-34.739.349

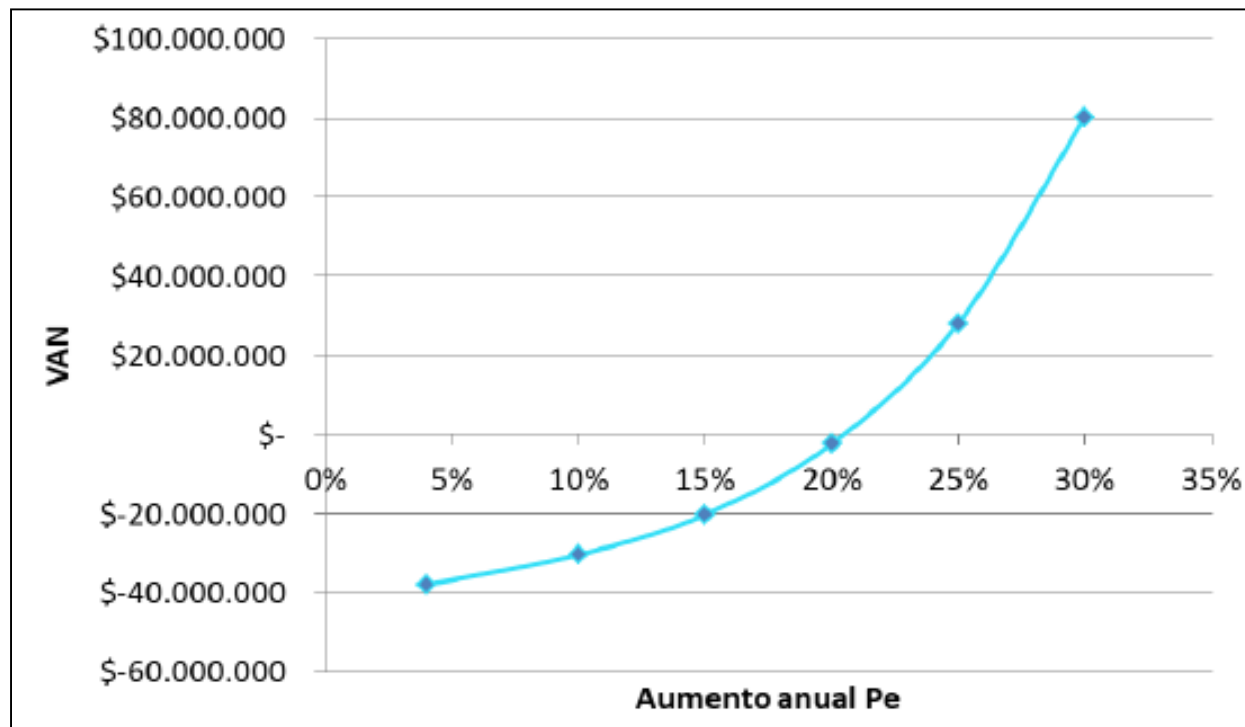
RESULTADOS

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2.242.827	2.332.540	2.425.842	2.522.875	2.623.790	2.728.742	2.837.892	2.951.407	3.069.463	3.192.242	3.319.932
330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480	330.480
-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018	-269.018
-12.867	-13.315	-13.782	-14.267	-14.771	-15.296	-15.842	-16.409	-17.000	-17.614	-18.252
-4.250.795										
-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445	-34.445
-84.960										
-212.400										
-2.291.178	2.346.241	2.439.076	2.535.625	2.636.035	2.740.462	2.849.066	2.962.014	3.079.480	3.201.645	3.328.696
-24.112.338	-26.403.516	-24.057.275	-21.618.199	-19.082.574	-16.446.539	-13.706.077	-10.857.011	-7.894.997	-4.815.517	-1.613.872
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2.291.178	2.346.241	2.439.076	2.535.625	2.636.035	2.740.462	2.849.066	2.962.014	3.079.480	3.201.645	3.328.696
4.582.600	34.445	34.445	34.445	34.445	34.445	34.445	34.445	34.445	34.445	34.445
2.291.422	2.380.686	2.473.521	2.570.070	2.670.480	2.774.907	2.883.511	2.996.459	3.113.925	3.236.090	3.363.141
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.291.422	2.380.686	2.473.521	2.570.070	2.670.480	2.774.907	2.883.511	2.996.459	3.113.925	3.236.090	3.363.141
-34.739.349	-32.358.662	-29.885.141	-27.315.071	-24.644.590	-21.869.683	-18.986.172	-15.989.713	-12.875.787	-9.639.697	-6.276.556

Concepto	USD
Inversión inicial	-54.161.833
Venta de energía	46.923.714
Venta de potencia	6.609.600
Costos de operación y mantenimiento	-5.380.370
Costos por consumo de energía	-267.667
Depreciación	-46.170.453
<i>Utilidad antes de impuesto</i>	1.714.824
Impuesto (27%)	No aplica
<i>Utilidad neta</i>	1.714.824
Depreciación de instalaciones	46.170.453
FLUJO DE CAJA ACUMULADO	-6.276.556
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	-37.952.614
TIR	-1%
PRI	Mayor a 20 años

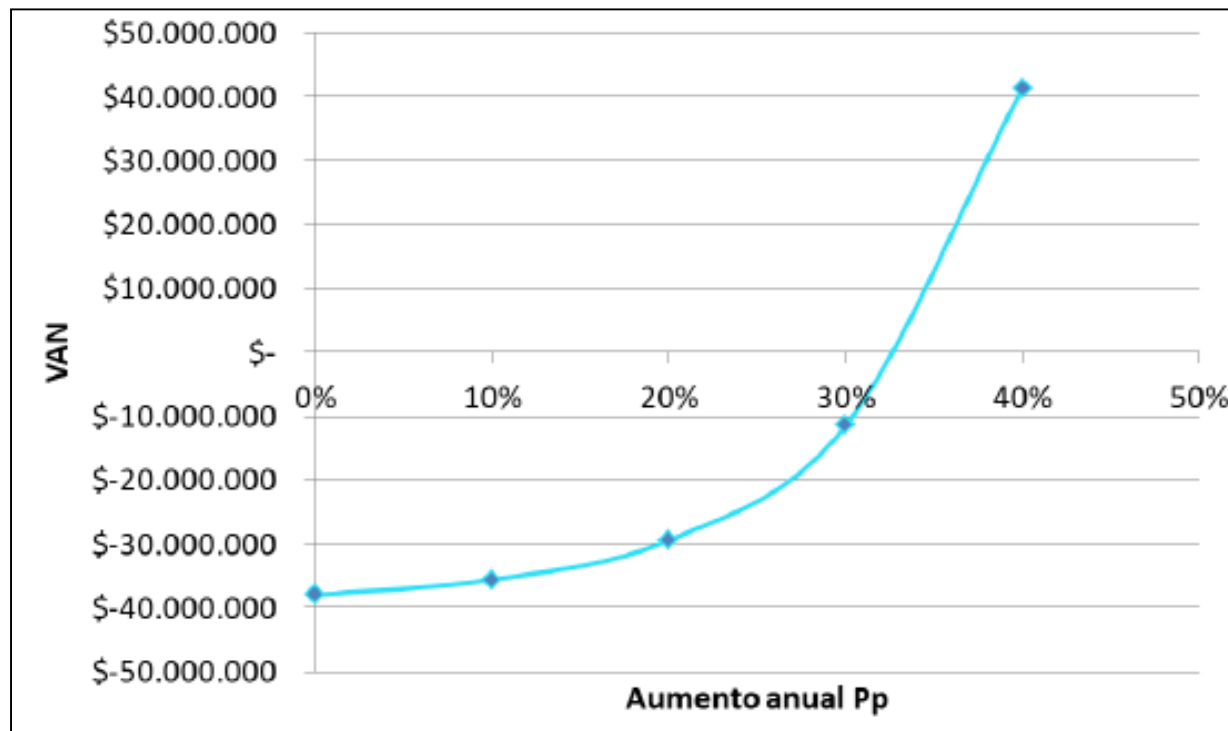
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: PRECIO DE ENERGÍA

- ✓ Valor inicial: 4%
- ✓ Variación: 10%, 15%, 20%, 25% y 30%



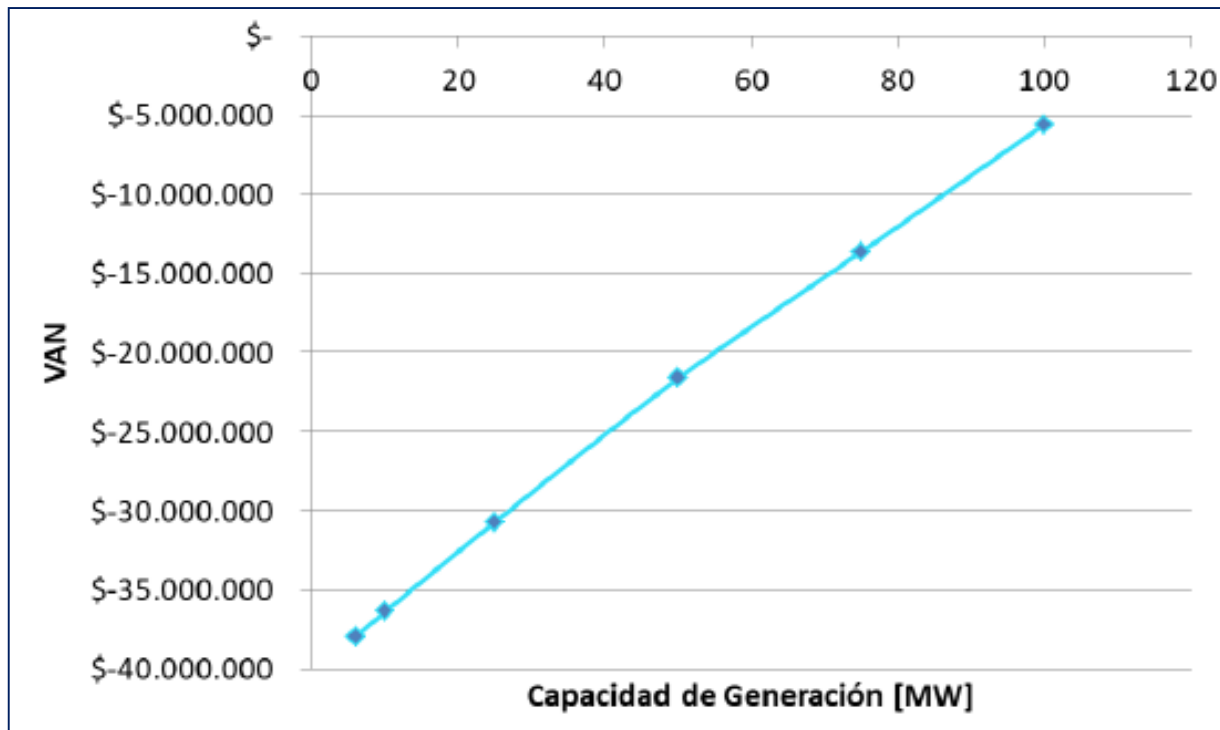
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: PRECIO DE POTENCIA

- ✓ Valor inicial: 0%
- ✓ Variación: 10%, 20%, 30% y 40%



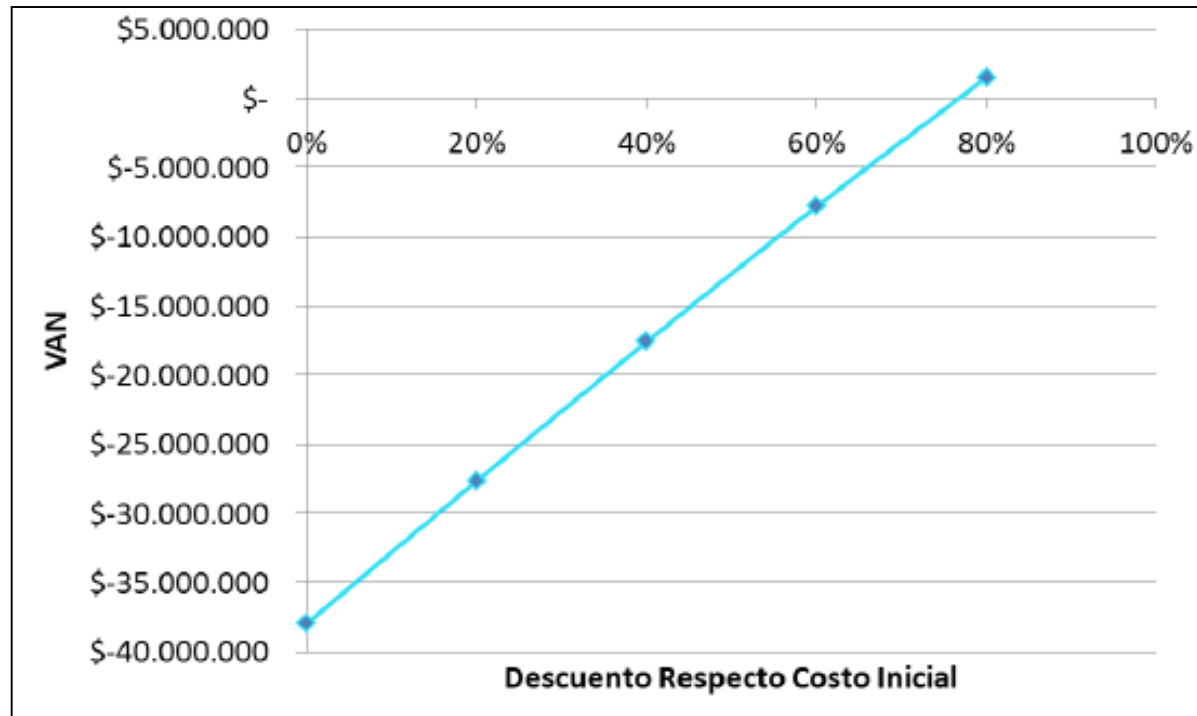
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: CAPACIDAD DE GENERACIÓN

- ✓ Valor inicial: 6MW
- ✓ Variación: 10 MW, 25 MW, 50 MW, 75 MW y 100 MW



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: COSTO INICIAL WAVESTAR

- ✓ Valor inicial: 0%
- ✓ Variación: 20%, 40%, 60% y 80%



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MULTIVARIADO

- ✓ Método de simulación de Monte Carlo (Risk Simulator).
- ✓ 5.000 escenarios en el análisis.
- ✓ Simulación bajo criterio de Laplace: todos los valores tienen igual probabilidad de ocurrencia (Alvarenga *et al.*, 2009)
- ✓ Simulación bajo criterio de escasez de información: distribución triangular con inputs correspondientes al valor superior, inferior y caso más probable (Epidat, 2014).

Variable	Límite inferior	Caso más probable ⁵	Límite superior
Variación anual del precio medio de inyección de energía	-25%	4%	33%
Variación anual del precio de potencia	-13%	0%	13%
Variación del costo inicial del dispositivo	-30%	0% ⁶	30%
Inflación	1,41%	2,97%	4,72%
Tasa de descuento	7%	8,5%	10%

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MULTIVARIADO

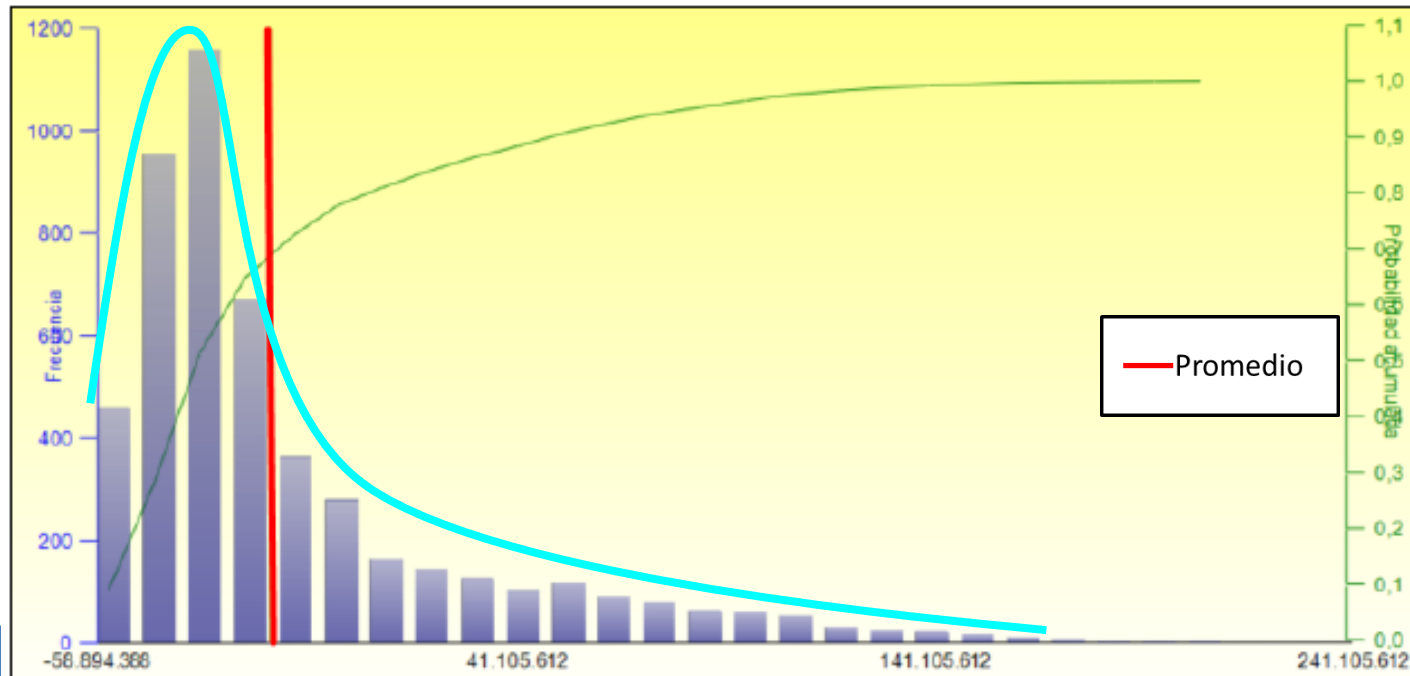
- ✓ Método de simulación de Monte Carlo (Risk Simulator).
- ✓ 5.000 escenarios en el análisis.
- ✓ VAN, TIR y PRI.
- ✓ Simulación bajo criterio de Laplace: todos los valores tienen igual probabilidad de ocurrencia (Alvarenga *et al.*, 2009)
- ✓ Simulación bajo criterio de escasez de información: distribución triangular con inputs correspondientes al valor superior, inferior y caso más probable (Epidat, 2014).

Variable	Límite inferior	Caso más probable ⁵	Límite superior
Variación anual del precio medio de inyección de energía	-25%	4%	33%
Variación anual del precio de potencia	-13%	0%	13%
Variación del costo inicial del dispositivo	-30%	0% ⁶	30%
Inflación	1,41%	2,97%	4,72%
Tasa de descuento	7%	8,5%	10%

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MULTIVARIADO

Distribución uniforme (VAN):

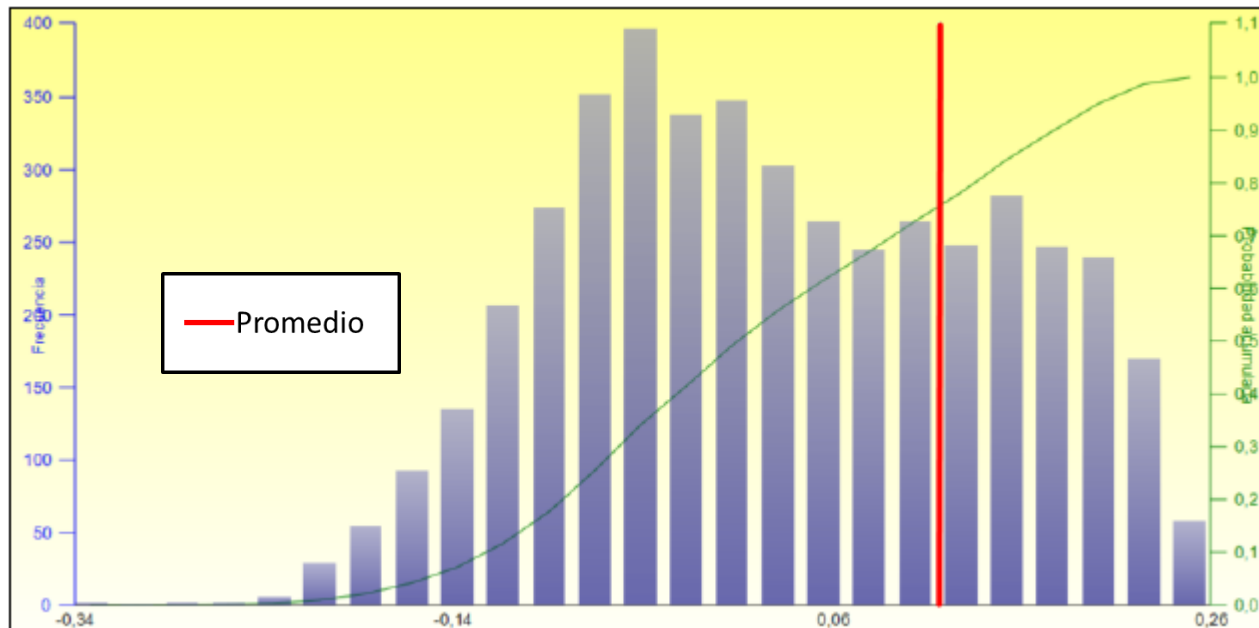
- ✓ VAN promedio: -17,6 millones USD.
- ✓ Moda: -33,8 millones USD.
- ✓ Coeficiente de curtosis positivo: leptocúrtica.
- ✓ Coeficiente de asimetría positivo.
- ✓ Probabilidad VAN positivo: 22%.



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MULTIVARIADO

Distribución uniforme (TIR):

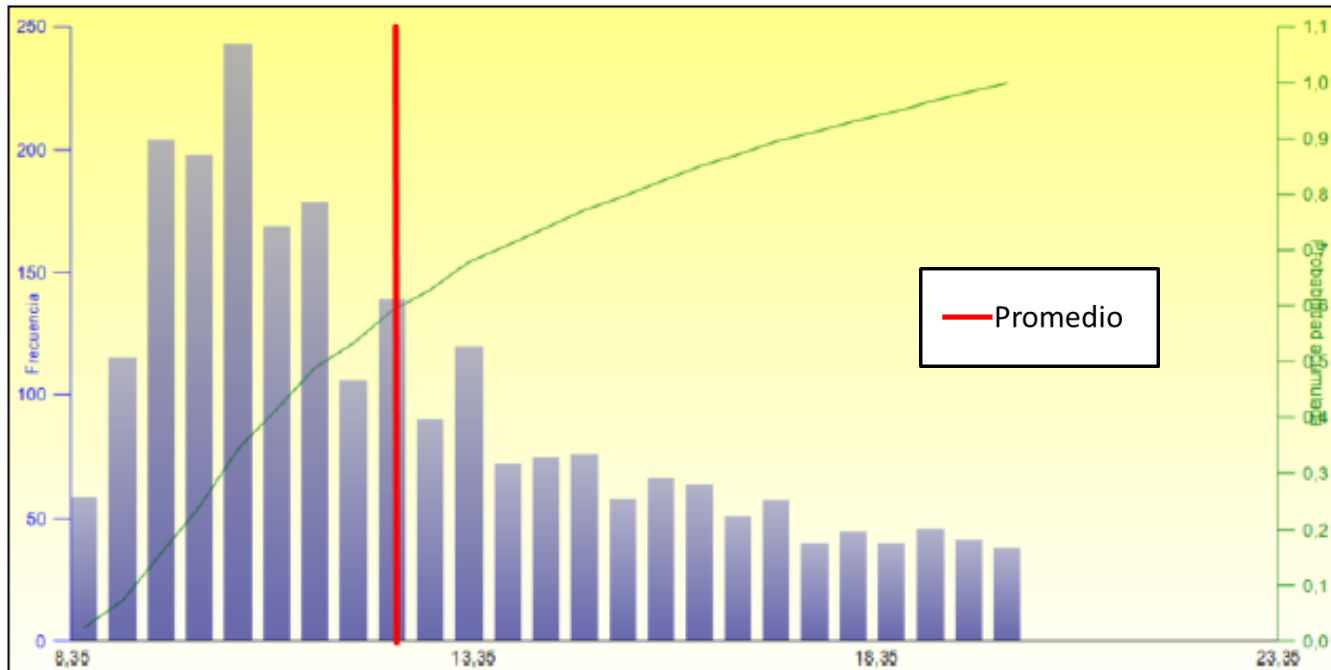
- ✓ TIR promedio: 1,73%.
- ✓ Probabilidad de TIR mayor a tasa de descuento: 24 %:



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MULTIVARIADO

Distribución uniforme (PRI):

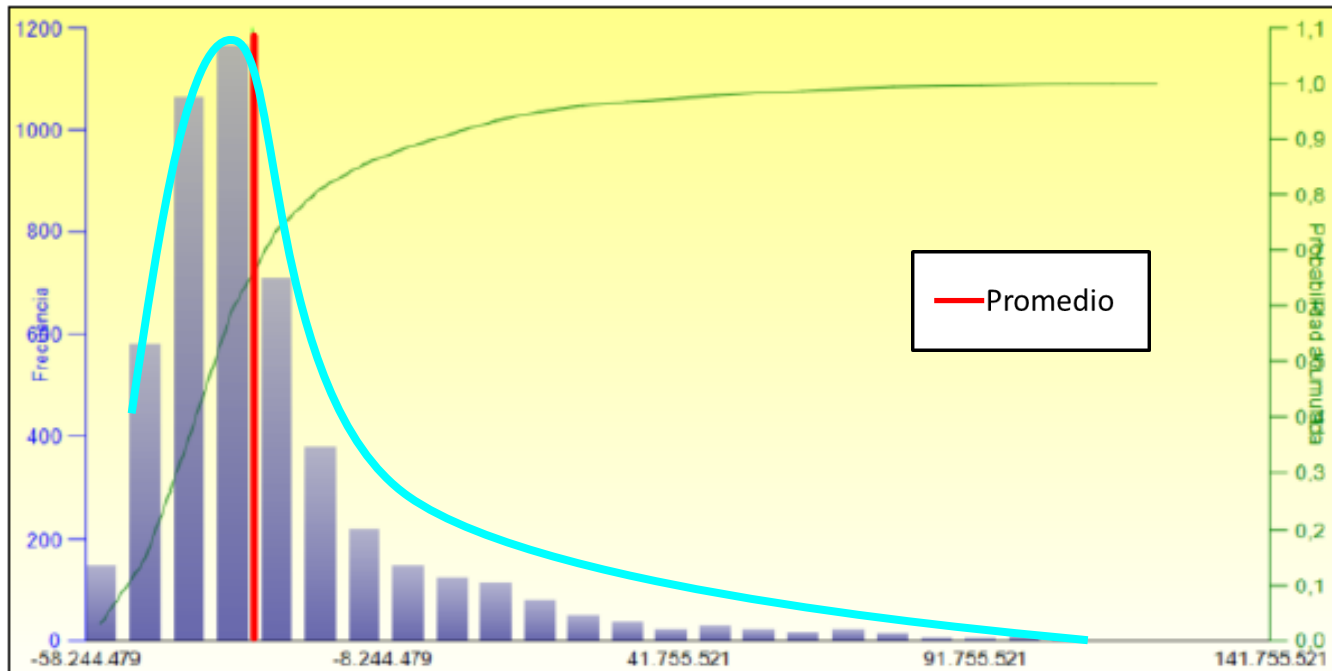
- ✓ PRI promedio: 12,4 años.
- ✓ Probabilidad de PRI mayor a 20 años: 52%.



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MULTIVARIADO

Distribución triangular (VAN):

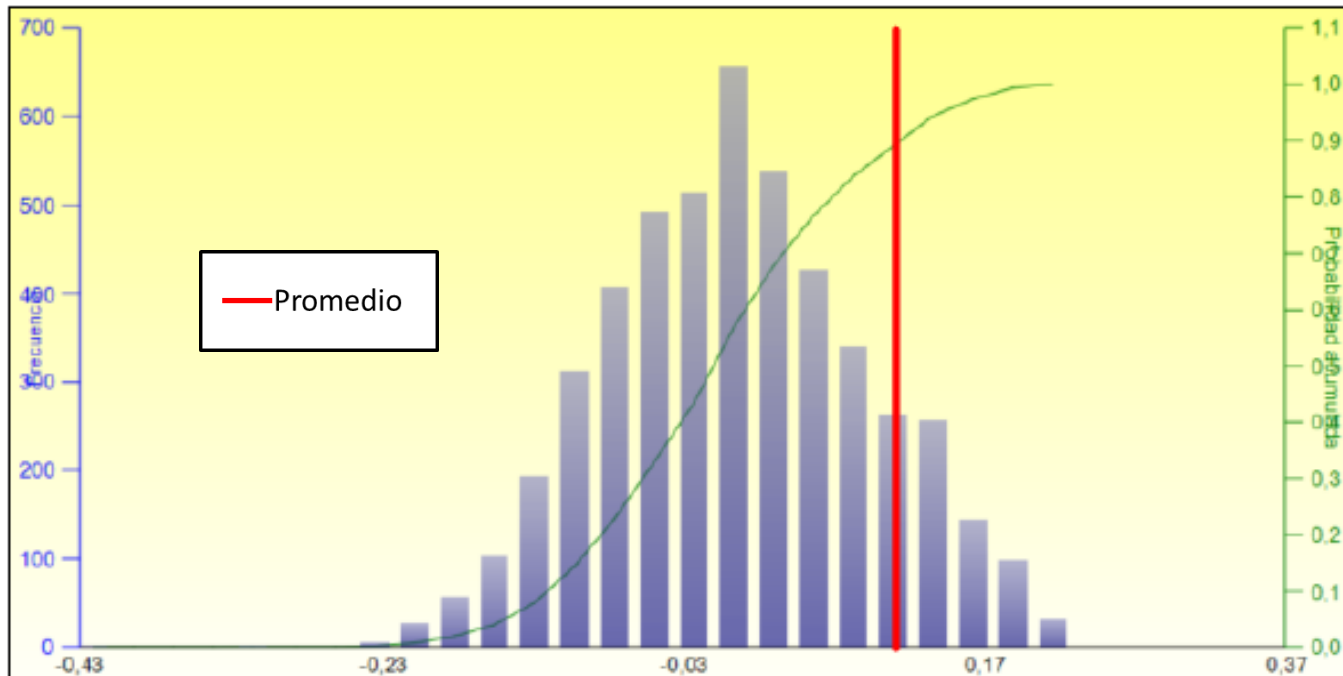
- ✓ VAN promedio: --29,9 millones USD.
- ✓ Moda: -33,5 millones USD.
- ✓ Coeficiente de curtosis positivo: leptocúrtica.
- ✓ Coeficiente de asimetría positivo.
- ✓ Probabilidad VAN positivo: 10%.



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MULTIVARIADO

Distribución triangular (TIR):

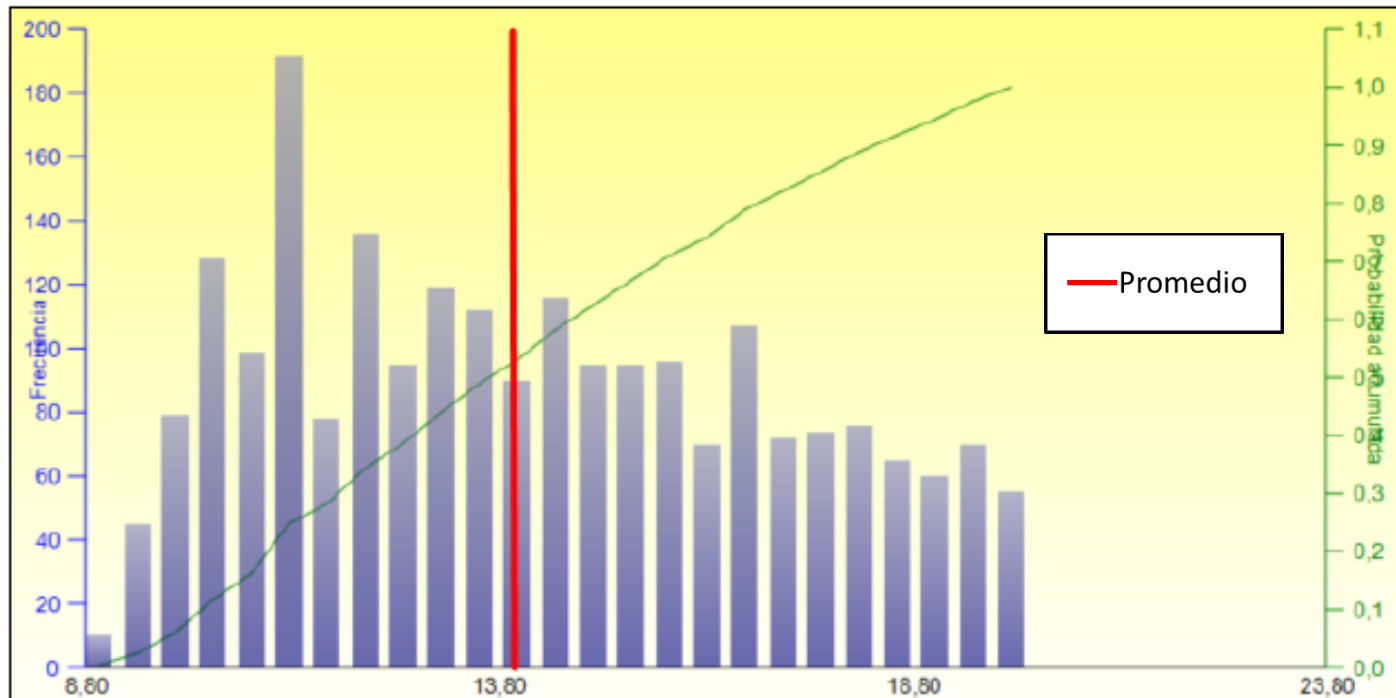
- ✓ TIR promedio: -0,36%.
- ✓ Probabilidad de TIR mayor a tasa de descuento: 24 %.



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MULTIVARIADO

Distribución triangular (PRI):

- ✓ PRI promedio: 14 años.
- ✓ Probabilidad de PRI mayor a 20 años: 55%.



CONCLUSIONES

- ✓ En el mundo se presencia un aumento constante del consumo energético.
- ✓ Para la situación actual, esto implica aumento de gases de efecto invernadero, relacionados a la carbonización como fuente de generación eléctrica.
- ✓ Por esta razón, las energías renovables toman un rol importante, ya que permiten disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- ✓ En Chile, se presenta la irrupción de energía solar y eólica. Sin embargo, en este contexto, con el fin de poder aprovechar al máximo el potencial energético renovable que ofrece Chile y alcanzar las metas propuestas para el año 2050, es pertinente considerar la incorporación de nuevas formas de generación renovable

CONCLUSIONES

- ✓ Implementar el dispositivo WaveStar en la costa de Lebu no es viable dado que el VAN da menor a 0 (aproximadamente -37,9 millones USD) y la TIR negativa (-1%).
- ✓ La no viabilidad de la implementación del dispositivo WaveStar en la costa de Lebu se debe principalmente a que la inversión inicial es mayor que los ingresos generados en los 20 años de funcionamiento del proyecto.
- ✓ Para que el dispositivo sea rentable debe costar un 23% del precio actual, con un costo por 6 MW de 16.183.098 USD, Es decir, para que el WaveStar sea rentable, debiese tener un costo de 2.697.183 USD/MW.
- ✓ Para el proyecto, al comparar las simulaciones realizadas con el Método de Monte Carlo, la distribución triangular es pesimista respecto a la distribución uniforme.
- ✓ De todas formas, ambas comparten el comportamiento global de demostrar que el proyecto es riesgoso.

¡MUCHAS GRACIAS!

DEFENSA DE PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE
IMPLEMENTAR UN DISPOSITIVO DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ
EN CHILE

Pablo Ignacio Díaz Piccardo

Correo: dipicc.pablo@gmail.com

Enero 2022