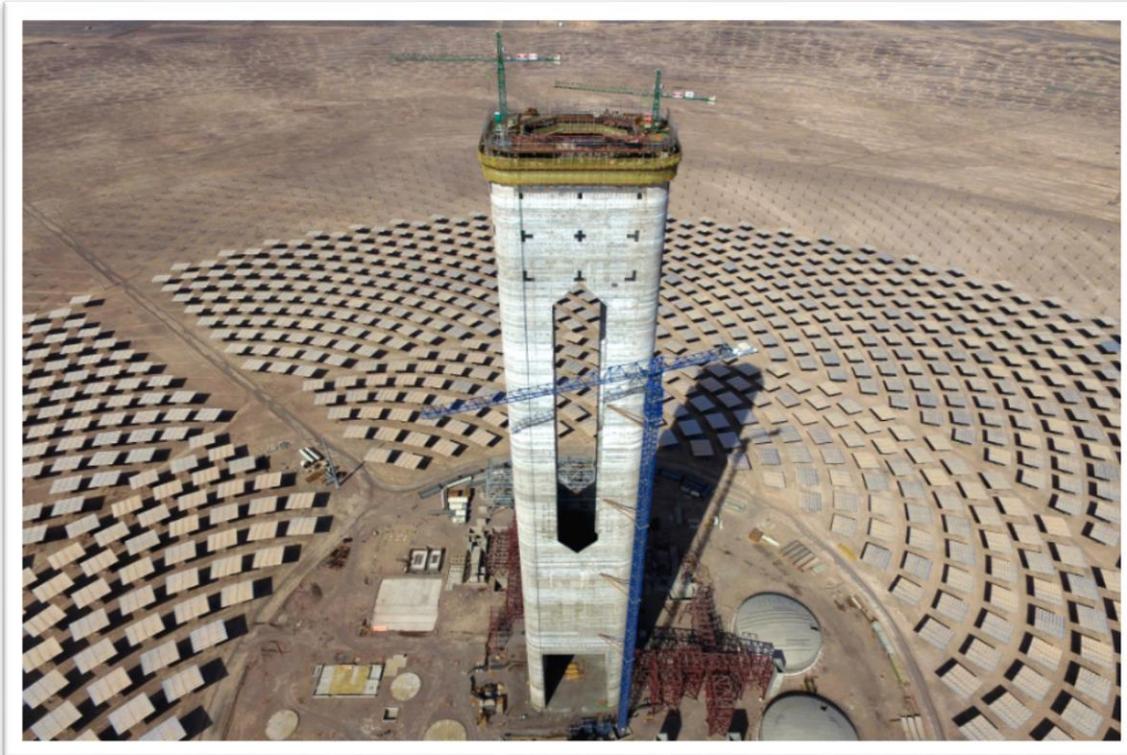


Concentración Solar de Potencia Tecnología de Torre



Reporte de relación y magnitud de costos de Inversión (Capex) y Operación & Mantenimiento (Opex)

Estudio elaborado por Comité Solar e Innovación Energética de Corfo

Diciembre 2019



COMITÉ SOLAR
E INNOVACIÓN ENERGÉTICA



Contenido

I.	Introducción.....	2
II.	Tecnología de Concentración Solar de Potencia (CSP).....	4
	Múltiplo Solar (SM).....	7
	Horas de Almacenamiento (Thermal Energy Storage, TES).	7
III.	Modelamiento de Concentración Solar de Potencia de Torre.....	8
	Sitio de Evaluación para Plantas CSP de Torre: Antofagasta, Calama.	9
	Ciclo Diario Anual de Irradiancia Normal Directa (DNI, W/m ²) en Sitio de Evaluación CSP.....	10
	Comparación de DNI y GHI en Sitio de Evaluación CSP.....	11
	Perfil Mensual Horario de Año Meteorológico Típico (TMY).....	11
	Curva de Duración Solar (DNI y GHI) en Sitio de Evaluación CSP.....	11
	Consideraciones y parámetros de planta CSP de referencia.....	12
	Diseño de Configuraciones de Plantas CSP de Torre	12
	Campo Solar de Planta CSP1 (5.655 helióstatos en 432,2 hectáreas).....	13
	Campo Solar de Planta CSP2 (6.798 helióstatos en 556,4 hectáreas).....	13
	Campo Solar de Planta CSP3 (8.631 helióstatos en 733,3 hectáreas).....	14
IV.	Costos de Inversión.....	14
	Costos Unitarios CSP de Torre.....	14
	Costos Directos de Configuraciones de CSP.....	15
	Costos Indirectos	16
	Costos Total Inversión	16
V.	Costos de Operación y Mantenimiento.	16
	Referencia de Costo O&M fijo – Planta CSP de Torre	16
	Costo O&M fijo Configuraciones CSP sin CUO.....	17
	Concesión de Uso Oneroso (CUO) de Configuraciones CSP	17
	Costo O&M fijo Config. CSP con CUO.....	18
VI.	Comentarios Finales.	18

I. Introducción.

La matriz de generación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) tiene actualmente una gran diversidad de tecnologías, lo cual permite la seguridad de un suministro estable con despacho económico, siempre que exista un adecuado acceso abierto a los sistemas de transmisión y distribución disponibles, sistemas que deben tener una planificación de mediano y largo plazo con el fin de implementar adecuadamente las obras respectivas. De esta forma, el Sistema Eléctrico Nacional podrá tener una red interconectada razonablemente acoplada.

Con el fin de mantener la seguridad de suministro y despacho económico antes señalado, es esencial diferenciar los atributos y prestaciones que proporciona cada una de las tecnologías de generación que participan del sistema eléctrico. Así, podrán ser adecuadamente planificadas las necesidades de infraestructura de generación, transmisión y distribución, dependiendo de las particularidades de las tecnologías en cuanto a atributos y prestaciones.

En el año 2009 comenzó en Chile la implementación de fuentes de energías renovables variables de mediana y gran escala, con la puesta en operación de las primeras plantas eólicas. Posteriormente, en el año 2014 comenzó la implementación de las primeras plantas fotovoltaicas de mediana y gran escala. Desde ese año 2014 estas tecnologías de generación variable y asíncrona comenzaron a aumentar sostenidamente su presencia en la matriz eléctrica, llegando actualmente a una participación conjunta equivalente al 18% del total de la potencia neta del SEN (11% fotovoltaico y 7% eólico). Cabe señalar que dicha participación continúa su incremento, considerando que el 51% de la capacidad actualmente en construcción es de energías renovables variables, con un 34% de proyectos fotovoltaicos y un 17% de eólicos.

Sin duda que la creciente implementación de energías renovables variables trae consigo bajos costos variables de generación al sistema eléctrico, con bajos costos de inversión asociados, además de reducciones en la emisión de gases de efecto invernadero y gases contaminantes (óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, material particulado), dado el desplazamiento de fuentes de generación fósil debido a la creciente presencia de generación fotovoltaica y eólica.

Sin embargo, con el incremento de generación variable y asíncrona, se hace necesaria la complementación de generación estable y síncrona, con el fin de mantener la seguridad en el suministro eléctrico del SEN. Esta necesidad de estabilidad y sincronismo en la matriz eléctrica se intensifica cada vez más, especialmente debido a:

- El plan de descarbonización actualmente en curso.
- La tendencia hacia hidrologías más secas.
- La frecuente volatilidad y consiguiente incertidumbre en el precio de los combustibles fósiles.

En virtud de todo lo antes señalado, la creciente participación de energías renovables variables hace esencial la incorporación de tecnologías de generación que proporcionen flexibilidad en el sistema eléctrico para mantener la estabilidad de suministro. Asimismo, se requieren tecnologías de generación que posean también el atributo de despacho económico, con el fin de lograr una estabilidad económica en el despacho eléctrico.

Considerando los aspectos mencionados precedentemente, las inversiones asociadas a la expansión y desarrollo del sistema eléctrico en el mediano y largo plazo, deben planificarse

teniendo en consideración todos los atributos y prestaciones necesarios en las tecnologías de generación, con el fin de disponer de una matriz que proporcione estabilidad económica y sustentable con el medio ambiente. Para este efecto, se debieran considerar atributos y prestaciones tales como:

- Disponibilidad de despacho durante el día.
- Disponibilidad de despacho durante las horas peak.
- Disponibilidad de despacho durante la noche.
- Despacho económico (bajo costo variable).
- Disponibilidad de almacenamiento energético.
- Tiempo de arranque a plena capacidad.
- Suficiencia y continuidad de suministro.
- Capacidad de aportar en la reducción de gases de efecto invernadero y contaminantes.
- Contribución de inercia.
- Contribución de reserva en giro.
- Contribución en el control de frecuencia.
- Contribución en el control de tensión.

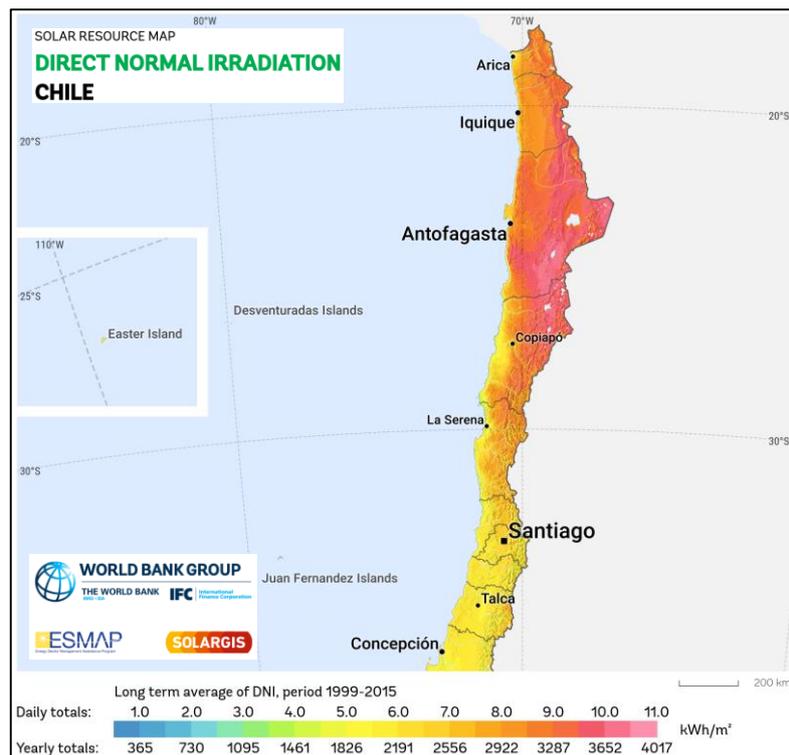
En la medida que la expansión conjunta del sistema eléctrico considere dichos atributos y prestaciones, será posible aunar los aspectos deseables de estabilidad de suministro, despacho económico, y generación sustentable. Esto conlleva a la necesidad de implementar tecnologías de generación y almacenamiento que proporcionen diversificación en la matriz, ya que usualmente cada tecnología tiene atributos parciales entre los antes mencionados.

Sin embargo, la Concentración Solar de Potencia (CSP) tiene la potencialidad de proporcionar todos estos atributos y prestaciones, ya que:

- Posee flexibilidad y continuidad en el despacho, teniendo la habilidad de hacer frente a la variabilidad e incertidumbre en el perfil de consumo, dado que las plantas CSP se pueden diseñar de acuerdo al perfil de demanda que deban suministrar.
- Dispone de almacenamiento energético, dependiendo de su diseño, desacoplado la variabilidad del recurso solar con respecto al perfil de generación.
- Proporciona estabilidad al sistema eléctrico, mediante:
 - Aporte de inercia.
 - Aporte de reserva en giro.
 - Contribución al control de frecuencia y voltaje.
- Posee bajo costo variable de generación.
- Posee tiempos de arranque a plena capacidad igual o inferior que las tecnologías termoeléctricas que usan combustibles fósiles, tal como las plantas de ciclo combinado.
- Aporta en la reducción de gases de efecto invernadero y contaminantes.

De esta manera, la tecnología CSP posee todos los atributos y prestaciones para reemplazar las centrales a carbón que serán gradualmente cerradas.

Además, cabe señalar que Chile cuenta con el mejor recurso solar del mundo para la implementación de plantas CSP, referido a la componente de Irradiancia Normal Directa (DNI), especialmente en las regiones de Antofagasta y Atacama, con niveles de DNI sobre 3.200 kWh/(m² año) y sobre 4.000 horas de sol anuales.



En virtud de los argumentos antes señalados, el presente documento describirá la tecnología CSP, poniendo especial énfasis en la determinación de costos de inversión y operación asociados a ciertas configuraciones de planta consideradas como representativas para suplir diferentes perfiles de demanda horaria.

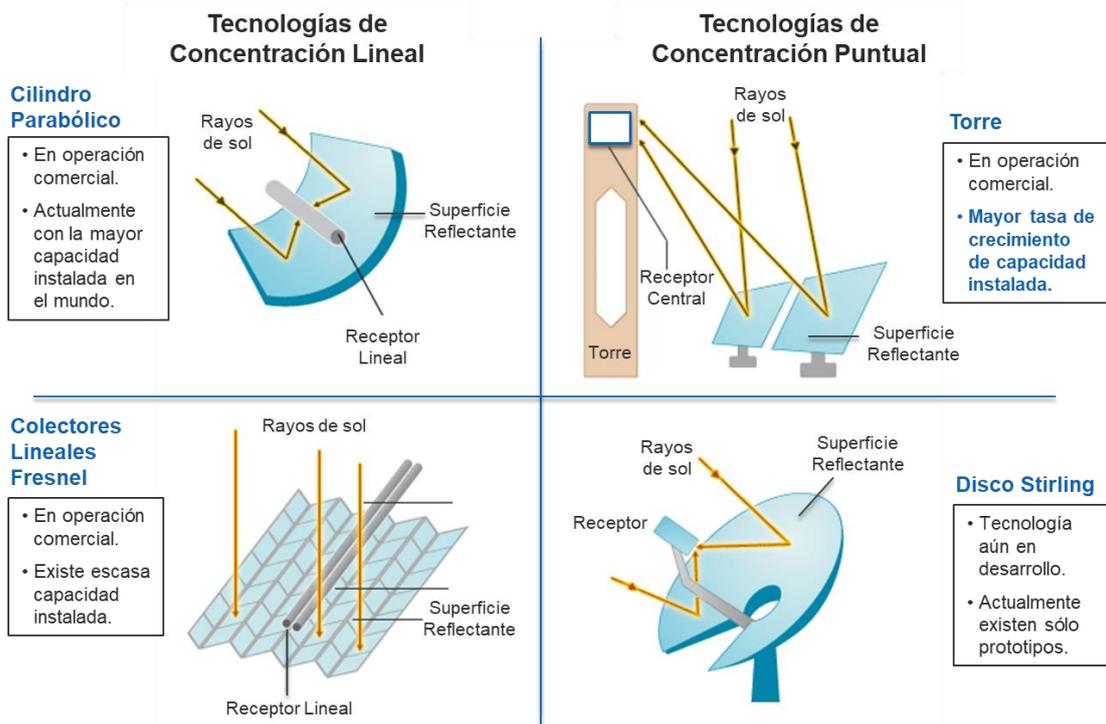
II. Tecnología de Concentración Solar de Potencia (CSP).

A diferencia de la tecnología Solar Fotovoltaica que utiliza la componente de Irradiancia Global Horizontal (GHI) del recurso solar para un proceso fotoeléctrico, la tecnología CSP utiliza la componente DNI del recurso solar para un proceso de reflexión óptica tendiente a concentrar el calor del sol en un fluido de trabajo (fluido caloportador o HTF), siendo este calor concentrado la fuente para la posterior generación eléctrica.

Existen dos tipos de procesos CSP, cada uno de los cuales tiene dos tecnologías:

- Tecnologías de concentración lineal: Cilindro Parabólico y Colectores Lineales Fresnel.
- Tecnologías de concentración puntual: Torre y Disco Stirling.

Las primeras plantas CSP en operación comercial fueron de tecnología de concentración lineal, pero las posteriores tecnologías de concentración puntual han logrado mejores eficiencias de conversión energética. Sin embargo, existen aspectos adicionales que influyen en la selección apropiada de la tecnología CSP a implementar, tal como la atenuación atmosférica en la ubicación del proyecto, que se refiere a la atenuación debido a componentes atmosféricos tales como aerosoles, gases presentes en el aire, cristales, entre otros.

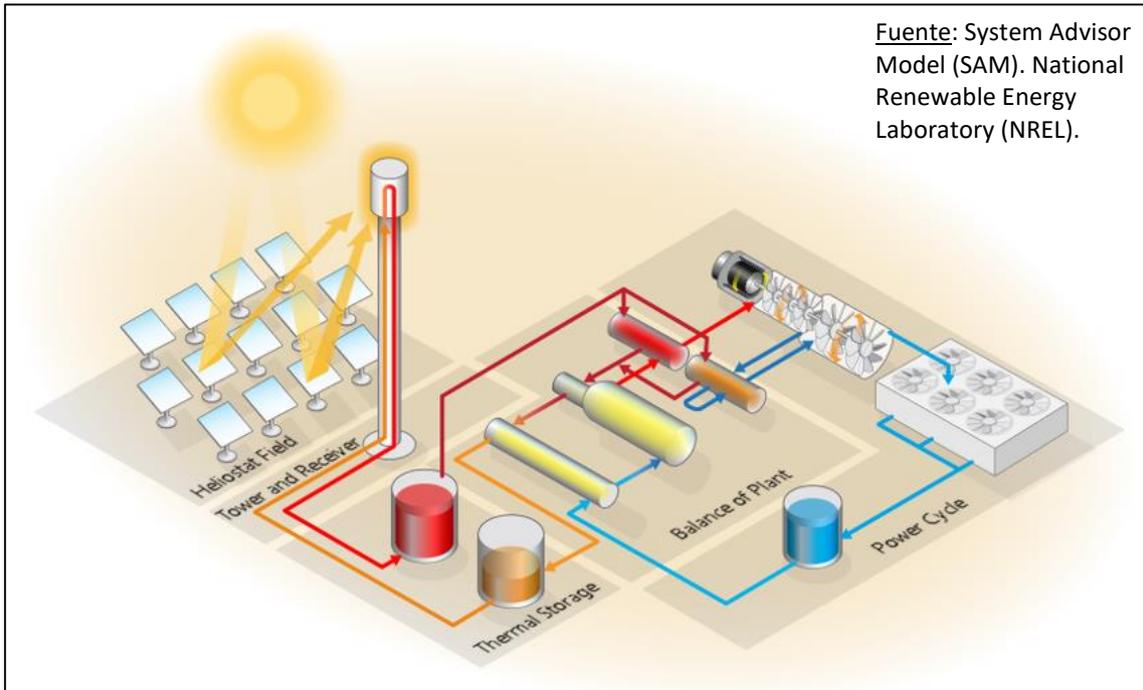


Si bien la concentración puntual es más eficiente como proceso que la concentración lineal, particularmente la tecnología de Torre requiere una favorable condición de atenuación atmosférica en la zona de emplazamiento, ya que gran parte de la superficie reflectante (espejos llamados heliostatos) estará a gran distancia del receptor de la torre (hasta aproximadamente 1.600 metros), lo cual requiere que la zona del proyecto presente pocos elementos que distorsionen o absorban el haz de radiación solar (emitancia luminosa) desde el heliostato hasta el receptor.

Sin embargo, en el Desierto de Atacama se cuenta usualmente con una favorable atenuación atmosférica, razón por la cual el presente documento se focalizará en desarrollar el caso de la tecnología CSP de Torre, la cual tiene actualmente la mayor tasa de incremento de capacidad instalada en el mundo.

La tecnología de Torre posee los siguientes componentes principales:

- **Campo Solar & Torre & Receptor:** Provee un flujo de energía térmica (a partir de la emitancia luminosa), dependiente del recurso solar (DNI) y del tamaño del campo heliostático. La energía térmica es capturada en sales fundidas (Fluido Caloportador).
- **Fluido Caloportador (Heat Transfer Fluid):** Es direccionado a un estanque de sales calientes (Thermal Storage), permitiendo un suministro energético estable para el Bloque de Vapor & Potencia, conformado por intercambiadores de calor (Balance of Plant) y el turbogenerador con el sistema de enfriamiento (Power Cycle).
- **Bloque de Vapor & Potencia:** Es suministrado desde el estanque de sales calientes para la generación eléctrica mediante un Ciclo Rankine, dependiendo de la señal de despacho y del tamaño del almacenamiento térmico (Thermal Energy Storage, TES).



La capacidad de captura de Potencia Térmica estará determinada por:

- Tamaño del campo solar (superficie reflectante de helióstatos).
- Receptor.

A su vez, la Potencia Térmica capturada en el fluido caloportador puede utilizarse para:

- Almacenamiento, con el fin de generar electricidad posteriormente.
- Generar electricidad directamente.

La generación eléctrica puede producirse:

- Sólo durante las horas peak.
- Sólo durante la noche.
- Durante las horas peak y horas de noche.
- Durante las 24 horas.
- Durante cualquier combinación horaria.

Esta flexibilidad y versatilidad en la generación horaria dependerá de la configuración de la planta CSP en cuestión, lo cual estará determinado fundamentalmente por los siguientes parámetros de diseño:

- Múltiplo Solar.
- Horas de Almacenamiento.

A continuación, se explican estos dos parámetros.



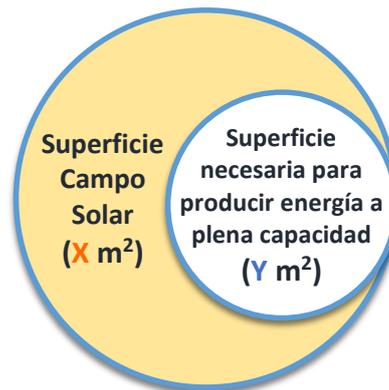
Múltiplo Solar (SM).

Define la relación entre la capacidad de captura térmica del Campo Solar (MW térmicos), y la potencia térmica de la turbina (MW térmicos) en el Bloque de Potencia. De esta forma, el **Múltiplo Solar** es la cantidad de veces en que es mayor en capacidad la potencia térmica del campo solar con respecto a la potencia térmica de la turbina.

$$\text{Múltiplo Solar (SM)} = \frac{\text{Capacidad de Captura Térmica de Campo Solar (MWt)}}{\text{Potencia Térmica de Turbina (MWt)}}$$

Dicho de otra manera, si las potencias térmicas (MWt) antes señaladas se representan como superficies (m²), el **Múltiplo Solar** queda expresado de la siguiente forma, de acuerdo a la figura:

$$\text{Múltiplo Solar (SM)} = \frac{X \text{ m}^2}{Y \text{ m}^2}$$

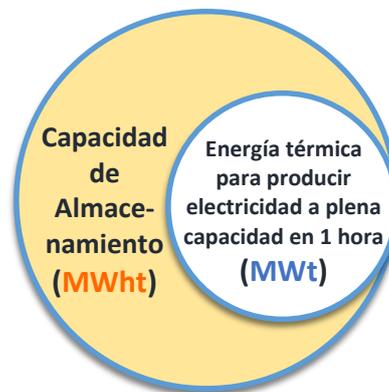


Horas de Almacenamiento (Thermal Energy Storage, TES).

La capacidad de almacenamiento térmico en una planta CSP está representada por la capacidad del(los) estanque(s) para sales fundidas calientes (usualmente 1 estanque).

Esta capacidad de almacenamiento energético determinará la cantidad de horas en que el Bloque de Potencia puede producir electricidad a plena capacidad de manera estable, independientemente de la variabilidad del recurso solar (DNI) captado por el Campo Solar durante las horas de sol.

De esta forma, y de acuerdo a la figura, las **Horas de Almacenamiento (TES)** se expresan de la siguiente manera:



$$\text{TES} = \frac{\text{Capacidad de Almacenamiento Térmico (MWht)}}{\text{Energía térmica para producir electricidad a plena capac. en 1 hora (MWt)}}$$

La planta CSP será diseñada dependiendo fundamentalmente del criterio de despacho y del perfil de demanda a suministrar. Para este efecto, las combinaciones de Múltiplo Solar y Horas de Almacenamiento (TES) se relacionan empíricamente de la siguiente manera:

TES (horas)	Múltiplo Solar (SM)						
	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	2,5	3,0
6	■	■	■	■	■		
9				■	■	■	
12						■	
15						■	■
18							■

Elaboración propia, basada en “Comparing the Net Cost of CSP-TES to PV Deployed with Battery Storage” (Jennie Jorgenson, Mark Mehos, and Paul Denholm, NREL).

III. Modelamiento de Concentración Solar de Potencia de Torre.

Con el fin de representar diferentes escenarios de demanda horaria, a partir de la relación anterior de “Múltiplo Solar – Horas Almacenamiento”, se establecieron las siguientes configuraciones de plantas CSP de Torre (TES: horas de almacenamiento):

Configuraciones de CSP	Demanda Horaria Objetivo	SM	TES (horas)
Planta CSP1	Peak	1,7	6,0
Planta CSP2	Peak + parte de noche	2,0	9,0
Planta CSP3	Peak + toda la noche	2,5	13,0

Para evaluar estas configuraciones de planta en igualdad de condiciones meteorológicas, se estableció una ubicación de referencia en el Desierto de Atacama. La ubicación seleccionada es la siguiente:

Datos en Sitio de Evaluación CSP	
Región	Antofagasta
Comuna	Calama
Latitud	-22,7481
Longitud	-68,5821
Altura	2890 msnm
Irradiancia Normal Directa (DNI)	10,73 kWh/(m ² día)
Irradiancia Global Horizontal (GHI)	7,24 kWh/(m ² día)
Irradiancia Global Inclinada 22°	7,76 kWh/(m ² día)
Irradiancia Difusa Horizontal (DHI)	0,55 kWh/(m ² día)
Frecuencia de nubes	4%
Temperatura ambiental	10,8 °C
Velocidad del viento	4,9 m/s

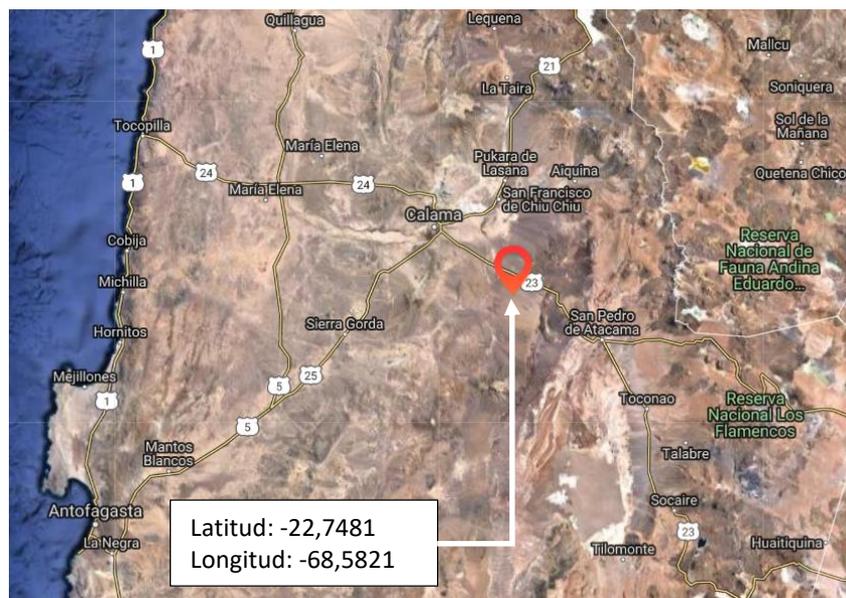


En las siguientes imágenes se visualiza y caracteriza el sitio seleccionado para la evaluación de las tres configuraciones de planta CSP de Torre antes definidas.

Sitio de Evaluación para Plantas CSP de Torre: Antofagasta, Calama.



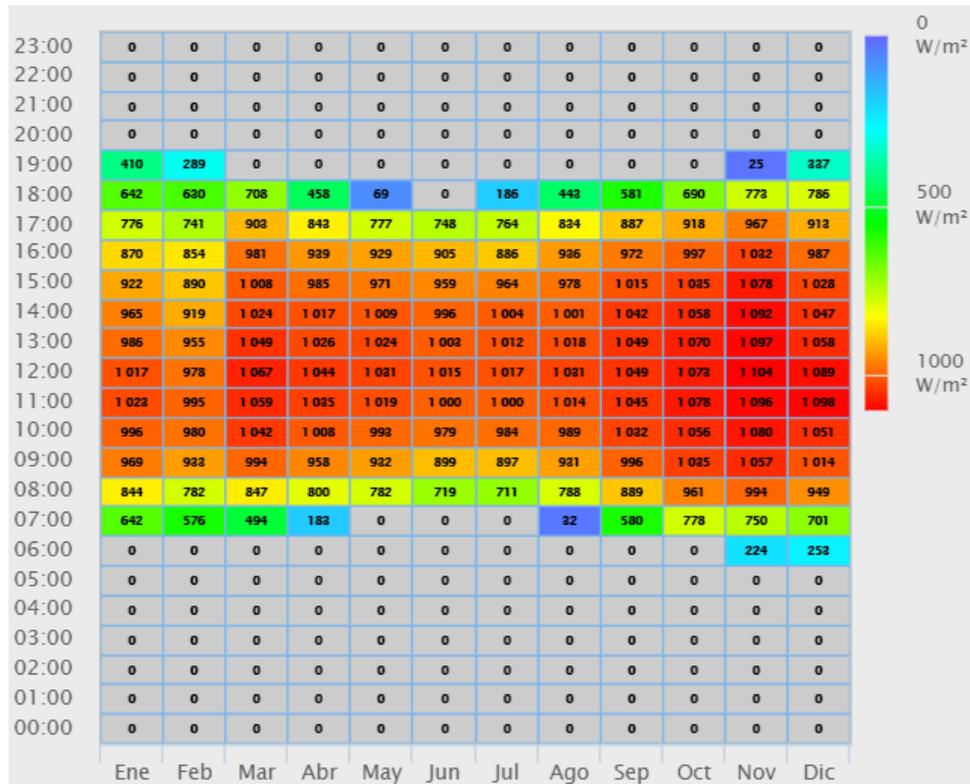
Sitio de Evaluación para Plantas CSP de Torre: Antofagasta, Calama.



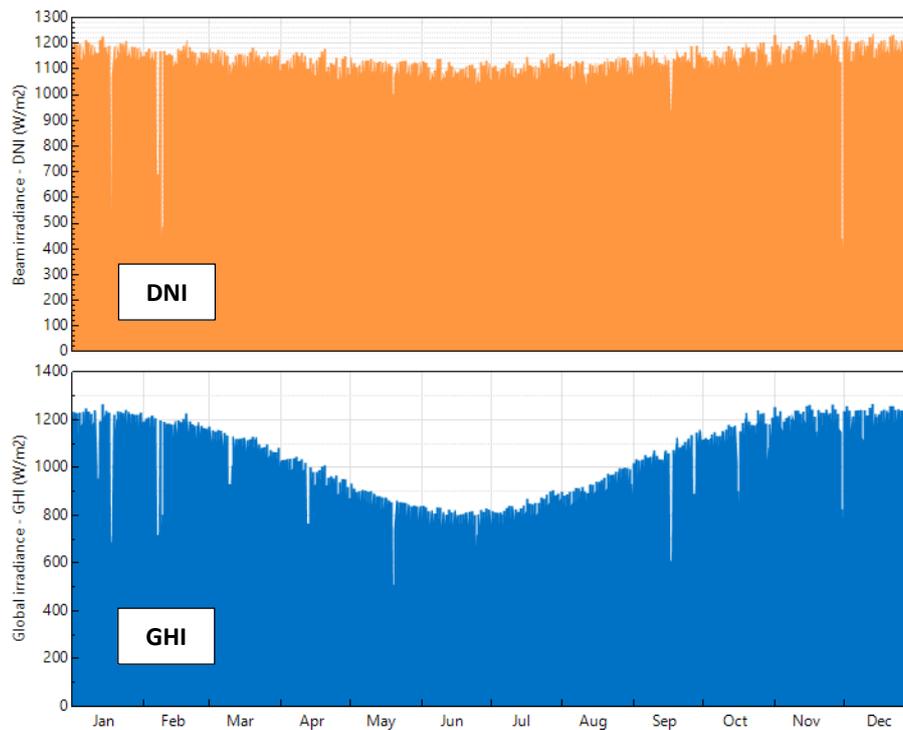


Ciclo Diario Anual de Irradiancia Normal Directa (DNI, W/m²) en Sitio de Evaluación CSP.

Fuente: Explorador Solar del Ministerio de Energía. Año Meteorológico Típico (TMY).

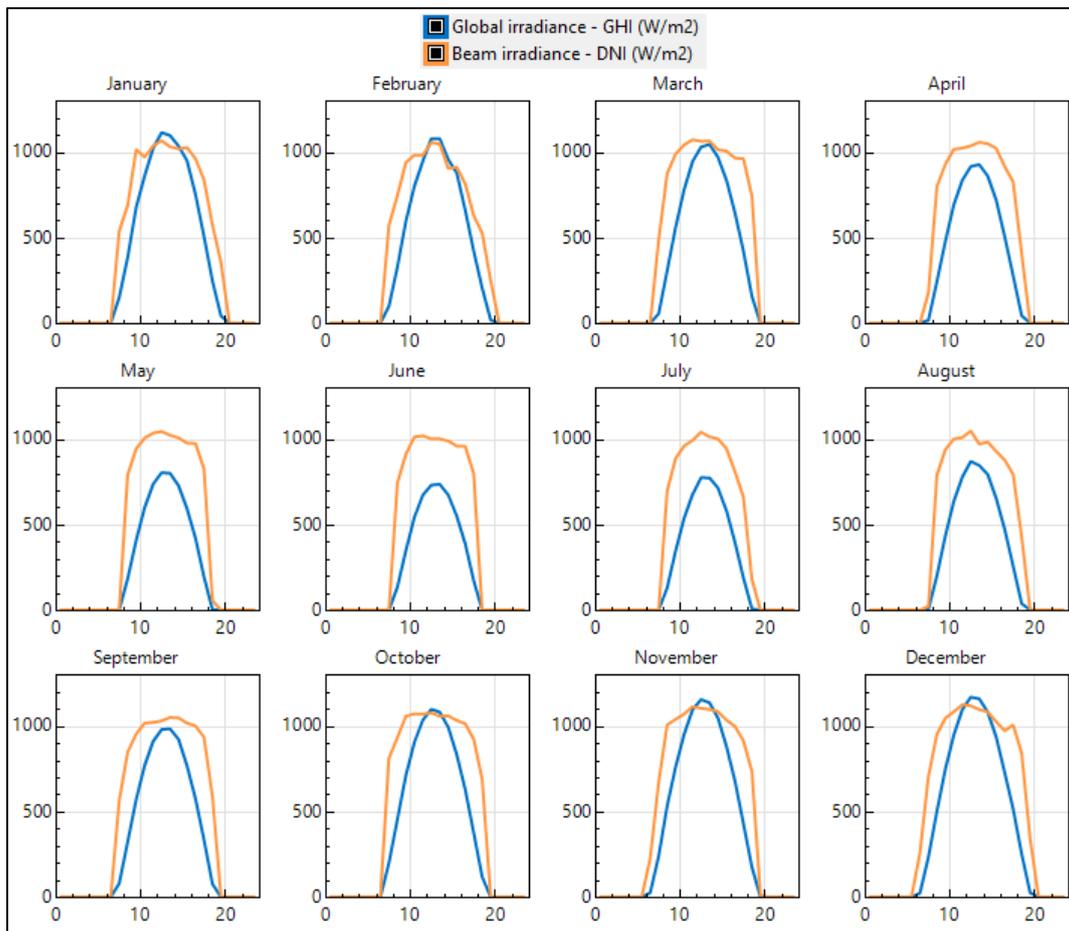


Comparación de DNI y GHI en Sitio de Evaluación CSP (TMY).

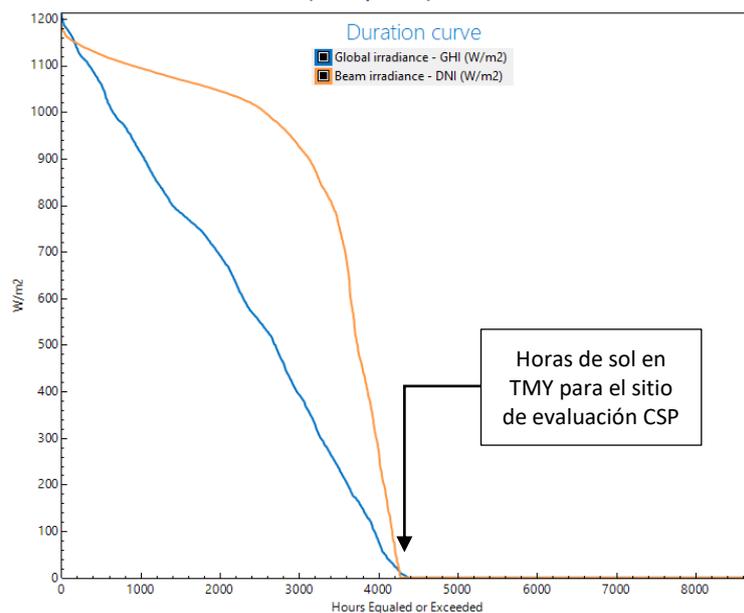




Comparación de DNI y GHI en Sitio de Evaluación CSP. Perfil Mensual Horario de Año Meteorológico Típico (TMY).



Curva de Duración Solar (DNI y GHI) en Sitio de Evaluación CSP.



Una vez caracterizado el sitio seleccionado para la evaluación de las tres configuraciones de plantas CSP de Torre, se agregó el año meteorológico típico (TMY) de este sitio a la librería de SAM (System Advisor Model), que es un software para el diseño de plantas de energías renovables desarrollado por NREL (National Renewable Energy Laboratory) del Departamento de Energía de Estados Unidos. SAM proporciona antecedentes técnicos, operacionales y económicos asociados al diseño de centrales de energías renovables, teniendo especial cobertura para modelar y diseñar plantas CSP de todas las tecnologías.

A partir del TMY ingresado a SAM, se modelaron las configuraciones de plantas CSP con sus respectivas combinaciones “SM-TES”, considerando los siguientes parámetros de base para las tres configuraciones.

Consideraciones y parámetros de planta CSP de referencia	
Tecnología CSP	Torre con sales fundidas como HTF
Capacidad Bruta Turbina	111,2 MWe
Rendimiento Turbogenerador	42,5%
Superficie Helióstato	144,4 m ²
DNI de Diseño	950 W/m ²
Costo Variable	3,5 USD/MWh
Costo O&M Fijo	En función de la configuración SM-TES

HTF: Heat Transfer Fluid (fluido caloportador).

Costo O&M: Costo de operación y mantenimiento.

SM: Solar Multiple.

TES: Thermal Energy Storage (horas de almacenamiento).

Para cada una de las configuraciones de planta se ejecutó el algoritmo de SAM “SolarPILOT”, el cual optimiza el diseño técnico-económico de la planta para cada combinación “SM-TES”, entregando para cada caso:

- Altura de torre.
- Altura de receptor.
- Diámetro de receptor.
- Cantidad de helióstatos.
- Coordenada de ubicación de cada helióstato en el campo solar.

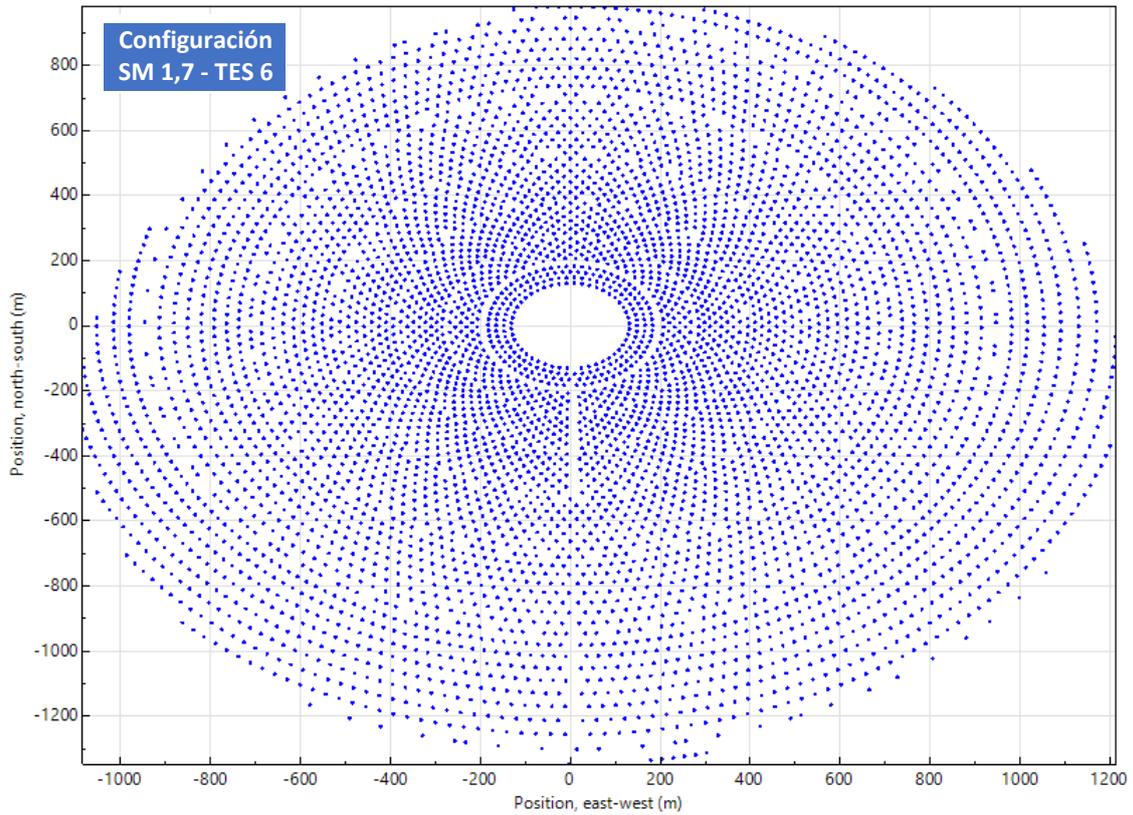
Los resultados del algoritmo de optimización son los siguientes:

Diseño de Configuraciones de Plantas CSP de Torre	Altura Torre [m] (a)	Altura Receptor [m] (a)	Diámetro Receptor [m] (a)	# Helióstatos (a)	Superficie Total (Has)
Planta CSP1	174,8	16,1	13,7	5.655	432,2
Planta CSP2	177,6	16,2	15,6	6.798	556,4
Planta CSP3	196,1	18,3	17,2	8.631	733,3

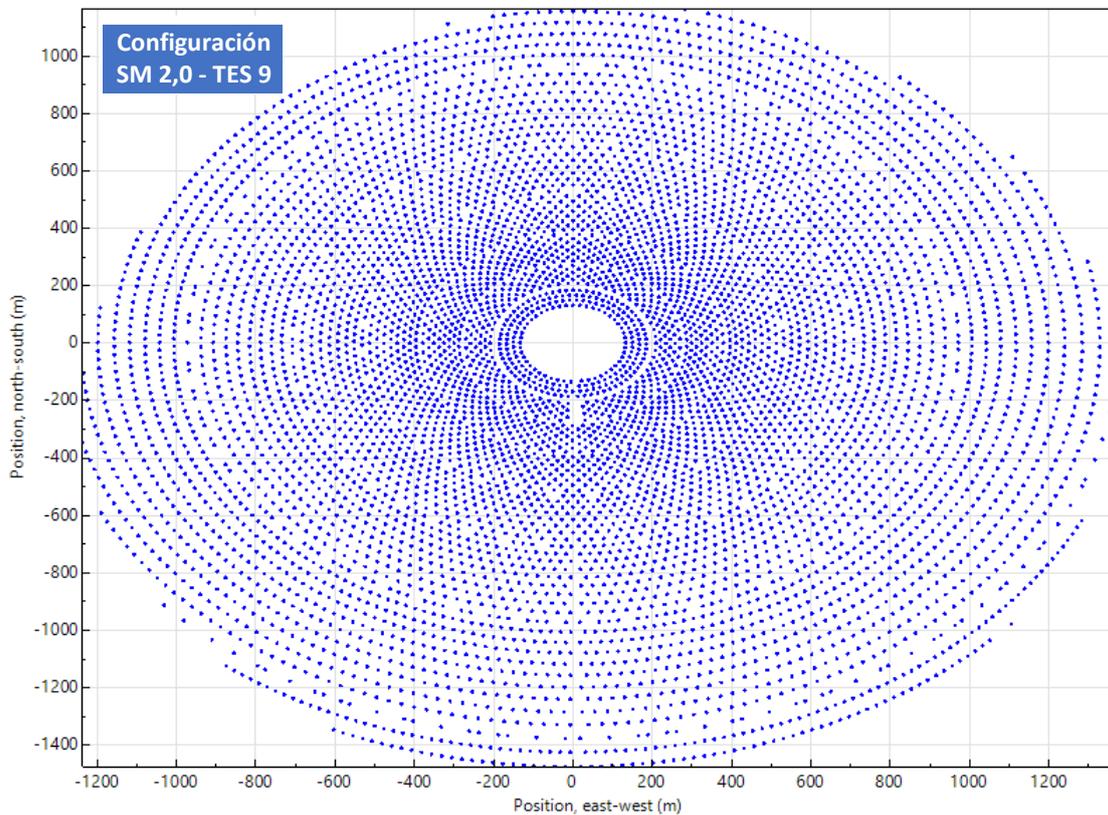
(a) Parámetros de diseño obtenidos de algoritmo de optimización de SAM para cada configuración “SM-TES”.



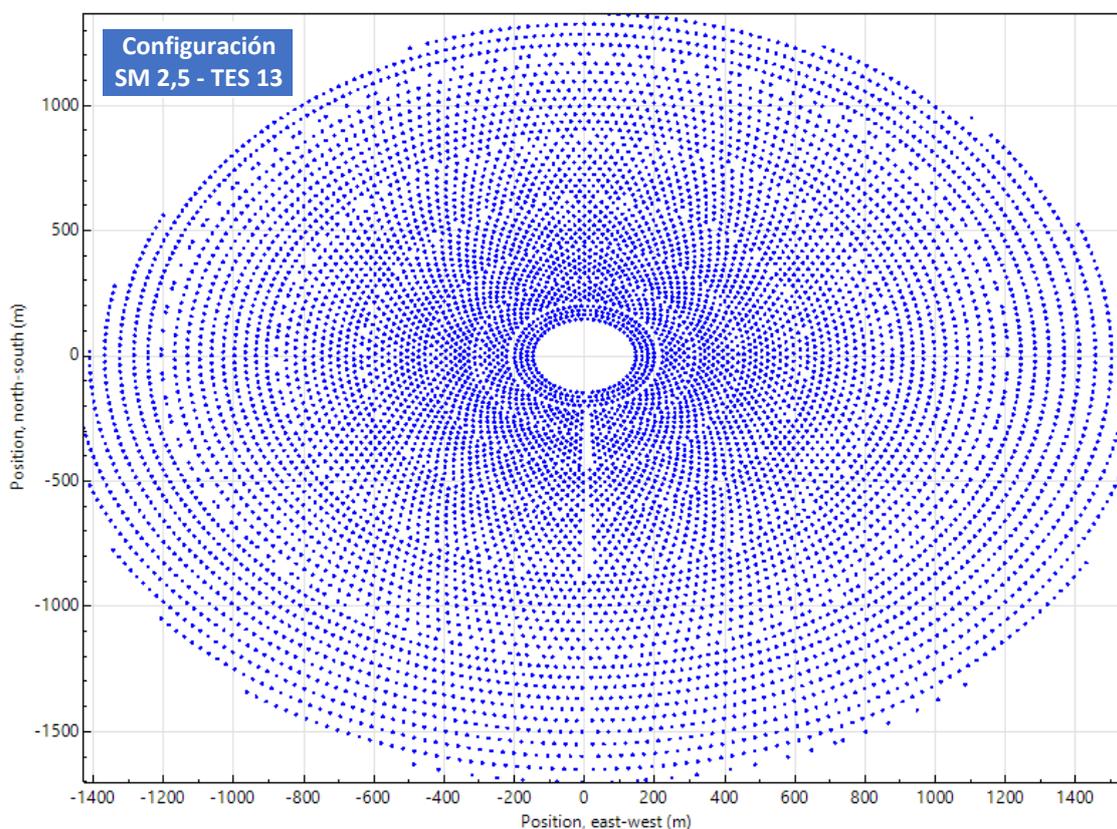
Campo Solar de Planta CSP1 (5.655 helióstatos en 432,2 hectáreas).



Campo Solar de Planta CSP2 (6.798 helióstatos en 556,4 hectáreas).



Campo Solar de Planta CSP3 (8.631 heliostatos en 733,3 hectáreas).



IV. Costos de Inversión.

Para la valoración económica de las tres configuraciones de planta, se utilizaron los siguientes costos unitarios para la tecnología CSP de Torre:

Costos Unitarios CSP de Torre	
Preparación terreno	16,0 USD/m ²
Campo heliostático	140,0 USD/m ²
Almacenamiento térmico (b)	22,0 USD/kWh
Sistema Generador de Vapor (c)	290 USD/kWe
Bloque de Potencia (d)	1.040 USD/kWe

Fuente: CSP Systems Analysis - Final Project Report (NREL, May 2019). Power Tower with Molten Salt.

(b) Cálculos basados en recientes estimaciones del costo de estanques de desarrolladores, y presupuesto de sales de SQM. Incluye 1 estanque para sales frías (290°C) de acero al carbono, 1 estanque para sales calientes (565°C) de acero inoxidable, y sales minerales.

(c) Intercambiadores de calor HTF/Vapor (Balance of Plant).

(d) Considera el turbogenerador, incluido el sistema de enfriamiento (aerocondensadores).

En relación al costo de la torre, si bien existe proporcionalidad entre su costo y la altura, esta relación no es lineal, sino que logarítmica. Análogamente, la relación no es lineal entre el costo y el área del receptor. Dado esto, SAM utiliza expresiones de cálculo que incorporan dicha

relación logarítmica en la obtención del costo de inversión de la torre y del receptor dependiendo de la escala de diseño de planta, dado parámetros técnico-económicos de referencia.

El resultado de los Costos Directos de inversión es el siguiente para cada una de las configuraciones de CSP seleccionadas.

Costos Directos de Configuraciones de CSP	Miles USD	Participación
Configuración CSP1 (SM 1,7 – TES 6 horas)		
Campo Heliostático	127.365	33%
Torre	21.160	5%
Receptor	58.232	15%
Almacenamiento	34.537	9%
Bloque Vapor & Potencia	147.896	38%
Costos Directos Planta CSP1	389.190	
Configuración CSP2 (SM 2,0 – TES 9 horas)		
Campo Heliostático	153.108	35%
Torre	21.823	5%
Receptor	63.836	15%
Almacenamiento	51.806	12%
Bloque Vapor & Potencia	147.896	34%
Costos Directos Planta CSP2	438.469	
Configuración CSP3 (SM 2,5 – TES 13 horas)		
Campo Heliostático	194.392	38%
Torre	26.578	5%
Receptor	74.432	14%
Almacenamiento	74.831	14%
Bloque Vapor & Potencia	147.896	29%
Costos Directos Planta CSP3	518.129	

Con el fin de representar las eventuales contingencias en la implementación de proyectos CSP, se adiciona un 5% a los anteriores Costos Directos.

Configuración	Contingencias (% Costos Directos)	Costos Directos + Contingencias (Miles USD)
Planta CSP1	5%	408.649
Planta CSP2	5%	460.393
Planta CSP3	5%	544.035

Al valor resultante de “Costos Directos + Contingencias” se le deben incorporar los respectivos Costos Indirectos por concepto de EPC (Engineering, Procurement, Construction), lo cual se representa con un 10% adicional.

Configuración	EPC [% (Costos Directos + Contingencias)]	Costos Indirectos (Miles USD) (e)
Planta CSP1	10%	40.865
Planta CSP2	10%	46.039
Planta CSP3	10%	54.404

(e) Costos Indirectos = % EPC * (Costos Directos + Contingencias).

Finalmente, el **Costo Total de Inversión** es el siguiente para cada una de las configuraciones de CSP:

Configuración	SM	TES (horas)	Costos Total Inversión (USD/kWe) (f)
Planta CSP1	1,7	6,0	4.042
Planta CSP2	2,0	9,0	4.554
Planta CSP3	2,5	13,0	5.382

(f) Costo Total = Costos Directos + Contingencias + Costos Indirectos.

Cabe señalar que el "Costo Total Inversión" anterior representa el "Overnight Cost", que es el costo de un proyecto sin considerar los intereses e impuestos incurridos durante la construcción.

V. Costos de Operación y Mantenimiento.

En relación al Costo de Operación y Mantenimiento de las plantas CSP, si bien se expresa usualmente como un valor anual fijo por unidad de potencia instalada [USD/(kWe año)], este valor en rigor dependerá de la configuración de planta, es decir, estará en función de la relación "SM – TES" de la planta CSP en cuestión.

A raíz de esto, se consideró la siguiente información como referencia de base para el Costo O&M fijo de un caso de planta CSP de Torre.

Referencia de Costo O&M fijo – Planta CSP de Torre		
Costo O&M fijo (g)	60,0 USD/(kWe año)	USD
Labor Cost (h)	40%	24,0
Service Contracts (h)	10%	6,0
Materials and Maintenance (h)	50%	30,0
Configuración Planta CSP de Torre (i)		
Múltiplo Solar (SM)	2,3	
Almacenamiento (TES)	13 horas	

(g) Costo O&M fijo promedio (referencia proporcionada por la Asociación de Concentración Solar de Potencia, ACSP).

(h) Componentes de Costo O&M fijo sugerida por NREL para plantas CSP de Torre.

(i) Configuración Planta CSP de base para el Costo O&M fijo señalado en "g" (referencia proporcionada por ACSP).

A partir de la información anterior, se variaron las componentes del Costo O&M dependiendo de las configuraciones de las plantas CSP1, CSP2 y CSP3, de acuerdo al siguiente criterio:

- La componente “Labor Cost” se varió dependiendo de las horas de almacenamiento (TES) de la configuración en cuestión, ya que dichas horas impactan en el costo empresa de los turnos de operación.
- La componente “Materials and Maintenance” se varió dependiendo del Múltiplo Solar (SM) de la configuración en cuestión, debido a que este parámetro de diseño explica el nivel de infraestructura instalada del campo heliostático, lo cual impacta en el costo de los materiales necesarios para el mantenimiento de dicha infraestructura.
- La componente “Service Contracts” no se varió debido a que se consideró independiente de la configuración de planta CSP.

El resultado de aplicar el criterio anterior es el siguiente:

Costo O&M fijo Configuraciones CSP sin CUO	USD/(kWe año)		
Configuración de Planta CSP	CSP1	CSP2	CSP3
OPEX fijo Sin CUO	39,3	48,7	62,6
Labor Cost	11,1	16,6	24,0
Service Contracts	6,0	6,0	6,0
Materials and Maintenance	22,2	26,1	32,6
SM	1,7	2,0	2,5
TES horas	6,0	9,0	13,0

CUO: Concesión de Uso Oneroso.

Se asume que el terreno de emplazamiento de las plantas CSP será de propiedad fiscal, por lo cual se deberá pagar una Concesión de Uso Oneroso (CUO). Dado que los Costos O&M antes obtenidos no incluyen el costo asociado a la CUO, se consideró la siguiente referencia para este costo:

Concesión de Uso Oneroso (CUO)	8,5 UF/(Ha año)	Referencia
Valor UF	28.292,6 CLP/UF	12-Dic-2019
Valor USD	750,0 CLP/USD	Referencia
Paridad USD/UF	37,7 USD/UF	Calculado

Por lo tanto, considerando las hectáreas de la superficie total asociada a cada una de las tres configuraciones de planta CSP, el costo de CUO para cada caso resulta ser el siguiente:

Concesión de Uso Oneroso (CUO) de Configuraciones CSP	USD/año	USD/(kWe año)
Planta CSP1	138.586	1,25
Planta CSP2	178.423	1,60
Planta CSP3	235.129	2,11

Finalmente, el **Costo de Operación y Mantenimiento con CUO** es el siguiente para cada una de las configuraciones de CSP:

Costo O&M fijo Config. CSP con CUO [USD/(kWe año)]	
Planta CSP1	40,5
Planta CSP2	50,3
Planta CSP3	64,7

VI. Comentarios Finales.

En virtud de los resultados obtenidos, y dada las características intrínsecas de la tecnología CSP, se tienen los siguientes comentarios:

- Cada configuración “SM – TES” de las plantas CSP tienen diferentes costos de inversión, ya que tienen diferentes:
 - Tamaños de campo solar.
 - Alturas de torre.
 - Diámetros de receptor.
 - Tamaños de estanques de almacenamiento.
 - Volúmenes requeridos de fluido caloportador (HTF).
- La tecnología CSP representa “varias tecnologías”, ya que cada planta CSP puede tener diferente diseño, dada su configuración, con lo cual cada planta CSP tendrá, para una misma capacidad eléctrica instalada:
 - Diferente costo de inversión.
 - Diferente costo de operación y mantenimiento.
 - Diferente perfil de generación.
 - Diferente Costo Nivelado de la Energía (LCOE).
- De esta manera, para la tecnología CSP, el LCOE no es un número, sino que es una función, determinada principalmente por la configuración de planta, dado un costo financiero del capital invertido en la planta.

$$\text{LCOE CSP} = f(\text{SM}, \text{TES})$$

- Para planificar la expansión del Sistema Eléctrico en el mediano y largo plazo, no es suficiente con pensar solamente en incorporar más MW de capacidad instalada, ya que es fundamental diferenciar los atributos de cada una de las tecnologías de generación que participarán de la matriz, considerando que cada tecnología posee diferentes cualidades y prestaciones para aportar al Sistema Eléctrico, con el fin de lograr un suministro seguro, estable, económico y sustentable.
- Consecuentemente con lo señalado en el punto precedente, es esencial incorporar tecnologías de generación síncrona en la expansión del Sistema Eléctrico, con el fin de complementar la creciente implementación de Energías Renovables Variables.



- Las plantas CSP pueden proporcionar generación síncrona, flexible y renovable, con despacho económico y estabilidad de suministro, pudiendo adaptarse a cualquier perfil de demanda horaria.
- Sin los perjuicios medioambientales, sin la dependencia de los combustibles fósiles, sin la incertidumbre y volatilidad del precio de los combustibles fósiles, y sin la necesidad de infraestructura portuaria para recepción de combustibles, la tecnología CSP, con un despacho más económico, posee todos los atributos para reemplazar a las centrales a carbón que serán progresivamente cerradas, y asimismo, posee todas las cualidades que pueden aportar a la matriz las plantas de ciclo combinado, en un país que cuenta con el mejor recurso solar (DNI) del mundo para el desarrollo de proyectos CSP.