¿3ª generación de CSP?

Avances y desafíos en ciclos de s-CO$_2$

©SolarReserve

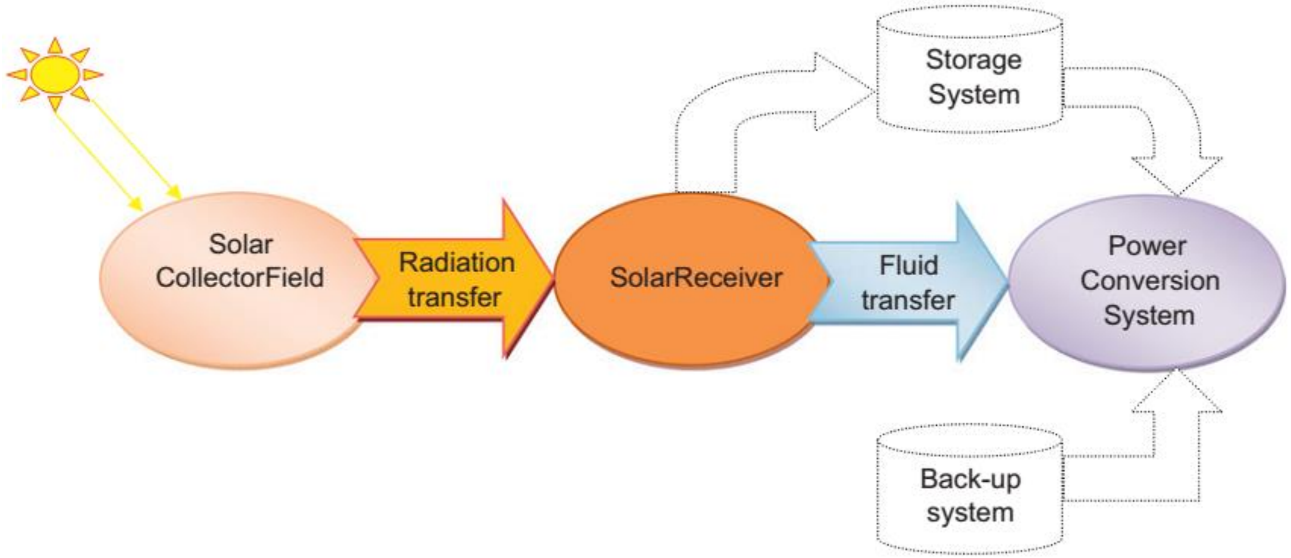
fcfm
Ingeniería Mecánica
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Santiago, 02/04/2018

José Miguel Cardemil

Agenda

- Tecnología CSP
- Desafíos
- s-CO_2
- Viabilidad Técnica
- Configuraciones
- Brechas Tecnológicas
- Otras alternativas



Solar CollectorField

Radiation transfer

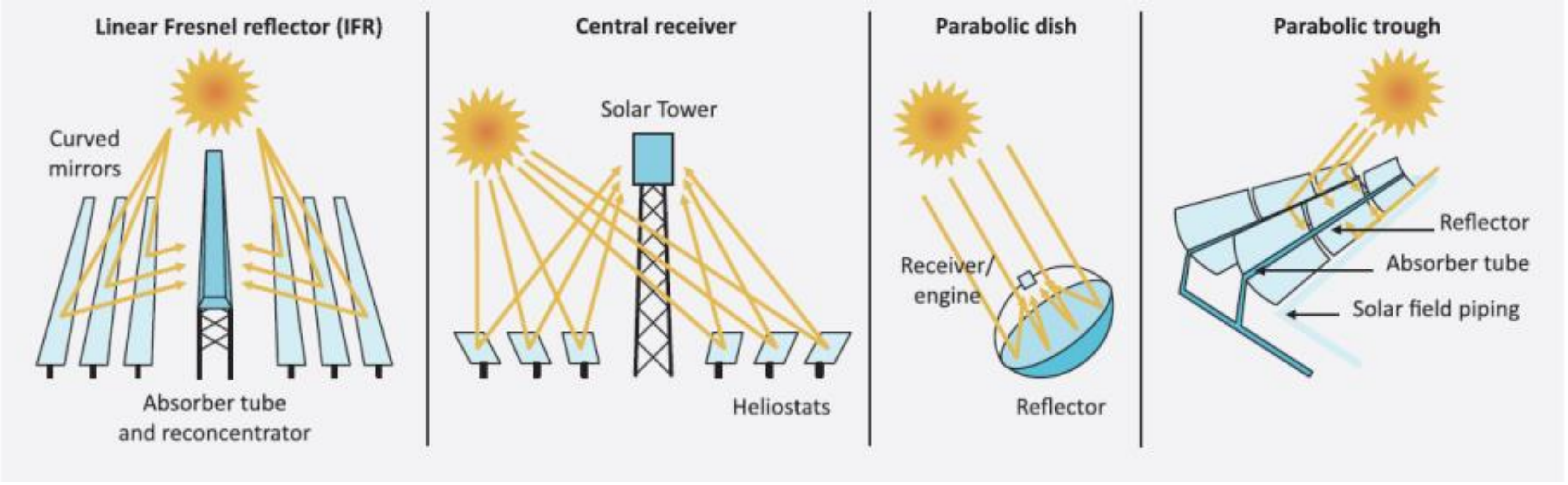
SolarReceiver

Fluid transfer

Power Conversion System

Storage System

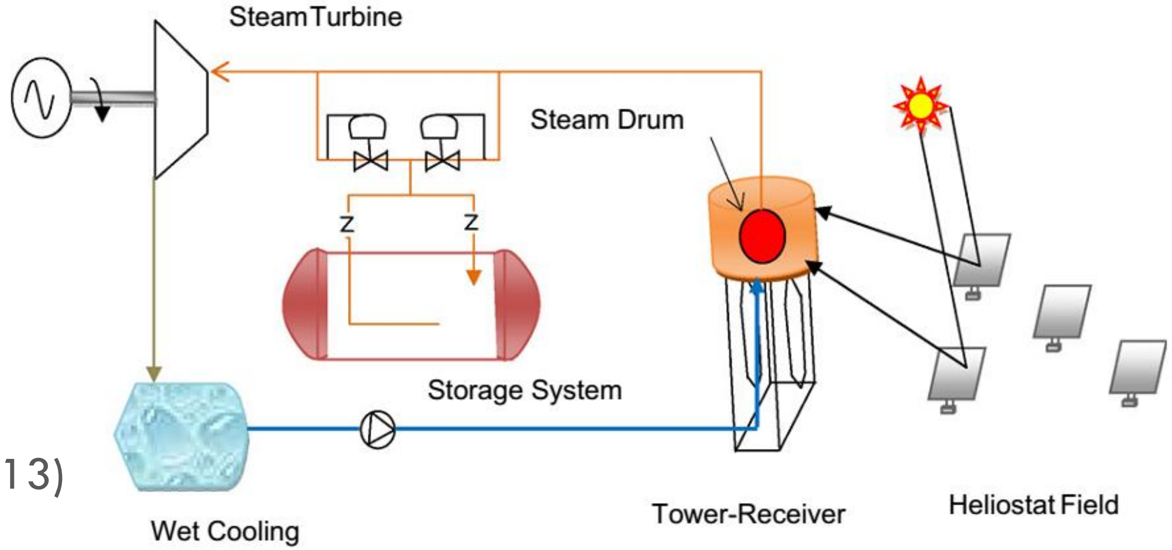
Back-up system



Ingeniería Mecánica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Tecnologías CSP - Torre

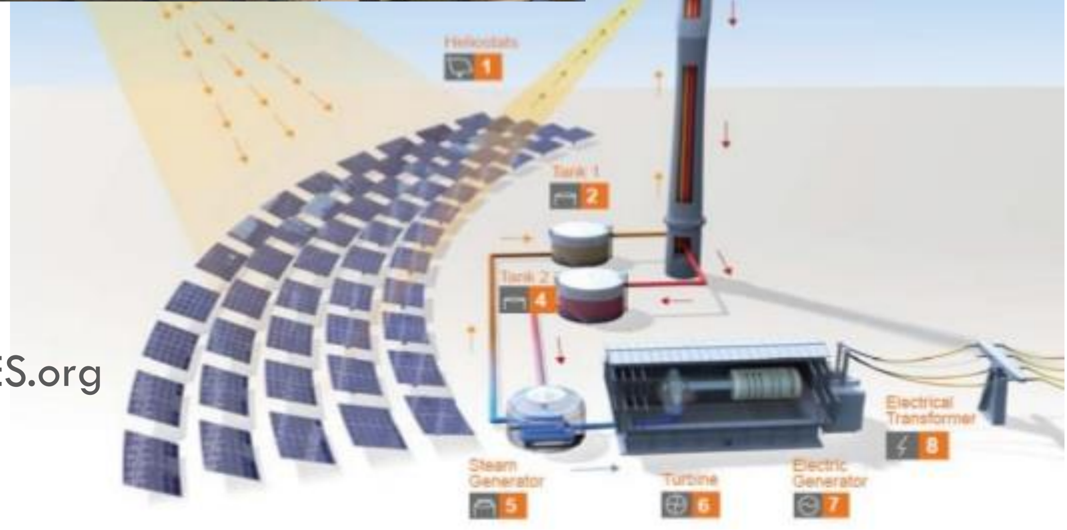
- Primera Generación
  - Receptor opera con vapor saturado
- Abengoa
  - PS10
    - Construcción 2004-2007
    - Puesta en Marcha 2007
  - PS20
    - Construcción 2006-2009
    - Puesta en Marcha 2009
- Alta confiabilidad, pero bajo el umbral de la eficiencia comercial



Fuente: Behar et. al. (2013)

Tecnologías CSP - Torre

- Segunda Generación
    - Receptor con sales fundidas
    - KNO_3 (40%) + $NaNO_3$ (60%)
  - Solar Two
    - Nevada
  - Gemasolar
    - Sevilla
- Facilidad de integración
  - Almacenamiento térmico
  - Back Up



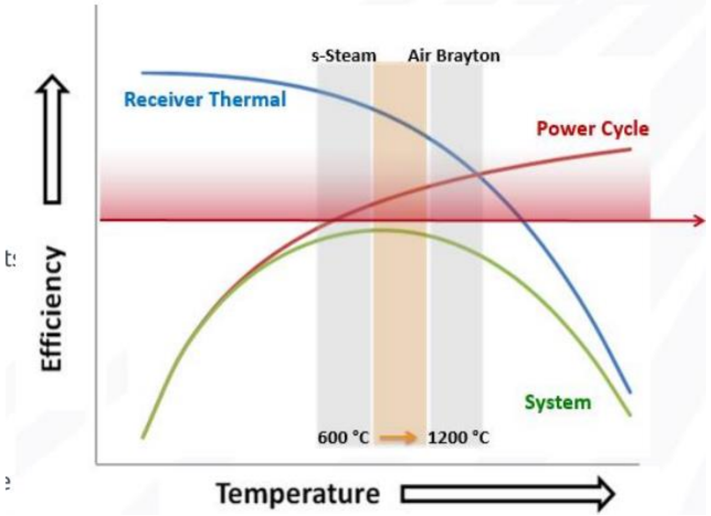
Fuente: SolarPACES.org

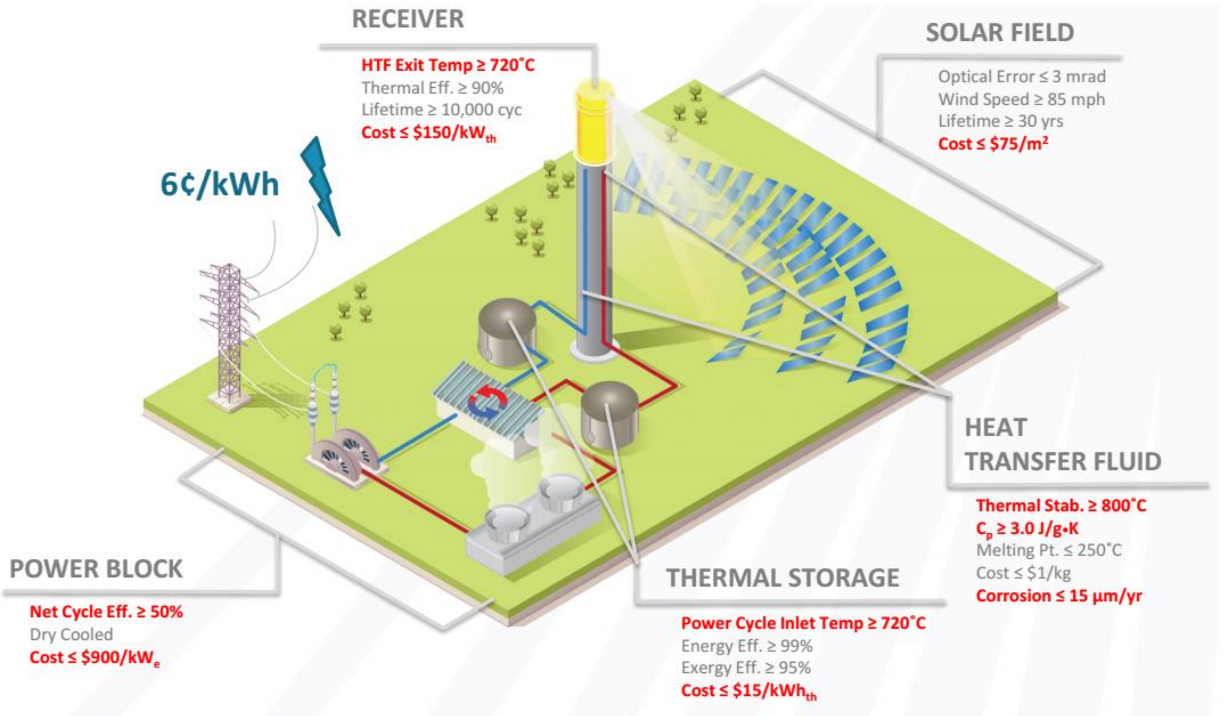
Desafíos

- Reducir costos
  - Hibridación CSP+PV
    - Escala
- Aumentar eficiencia de conversión

→ Aumentar temperaturas de operación

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



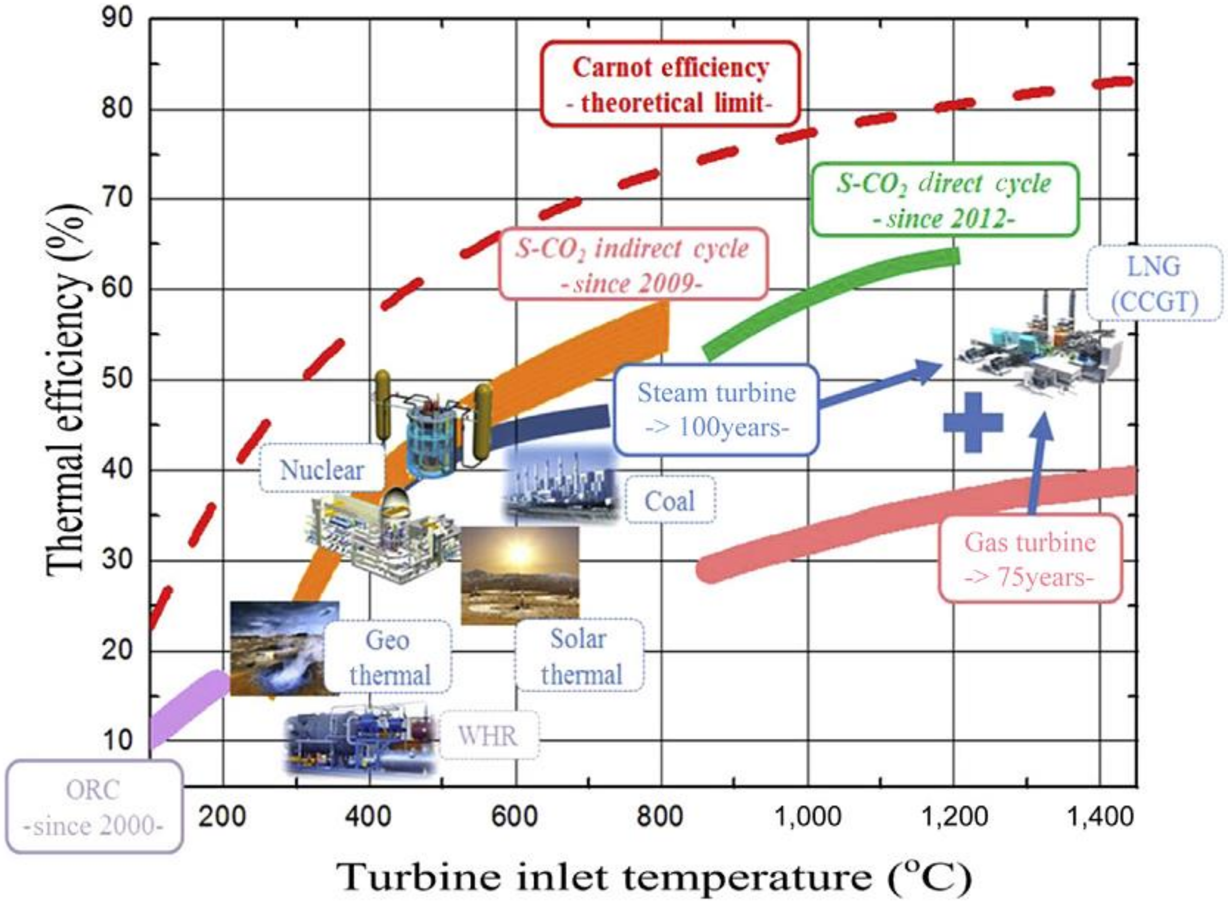


Fuente: energy.gov/sunshot

CO_2 como Fluido de Trabajo

- Fluidos de trabajo comúnmente usados en ciclos térmicos
  - Butane, R11, Ammonia, pentane, Isopentane, Isobutene, Toluene, Hydrocarbon mixtures, other fluids.
  - Desventajas
    - Inflamables, altamente tóxicos, elevado GWP, afectan la capa de ozono y elevado costo.

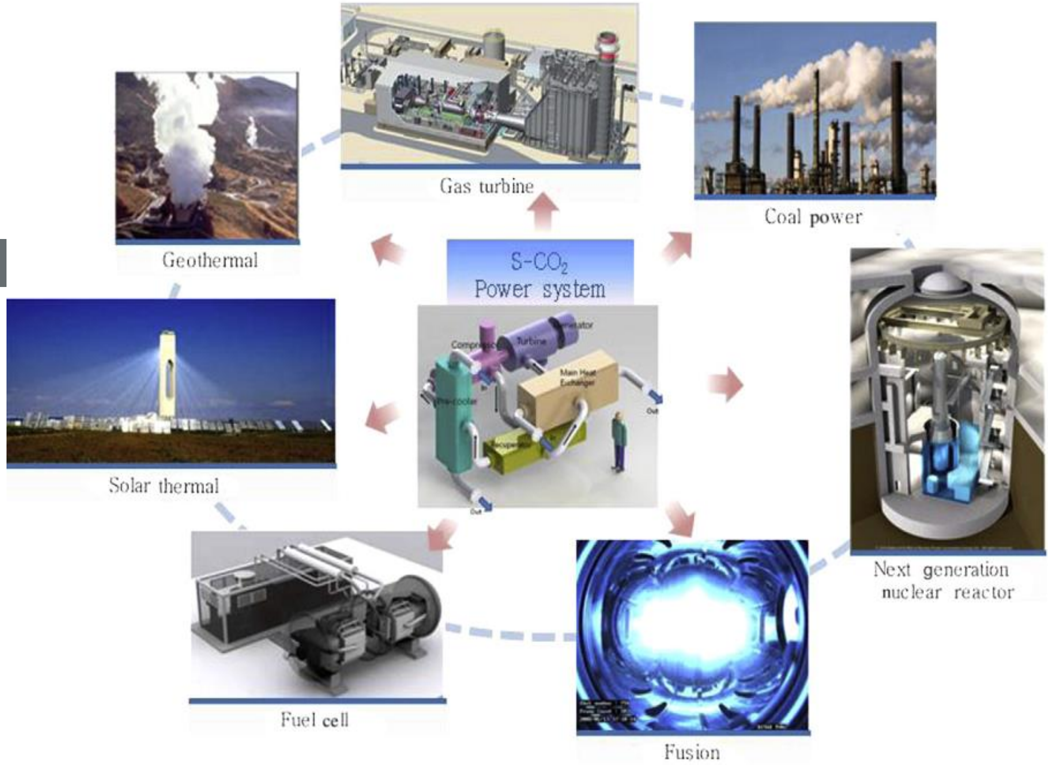
- CO_2 no presenta las desventajas mencionadas, pero…
  - Propiedades altamente variables
  - Altas presiones de operación



Fuente: Ahn et. al. (2015)

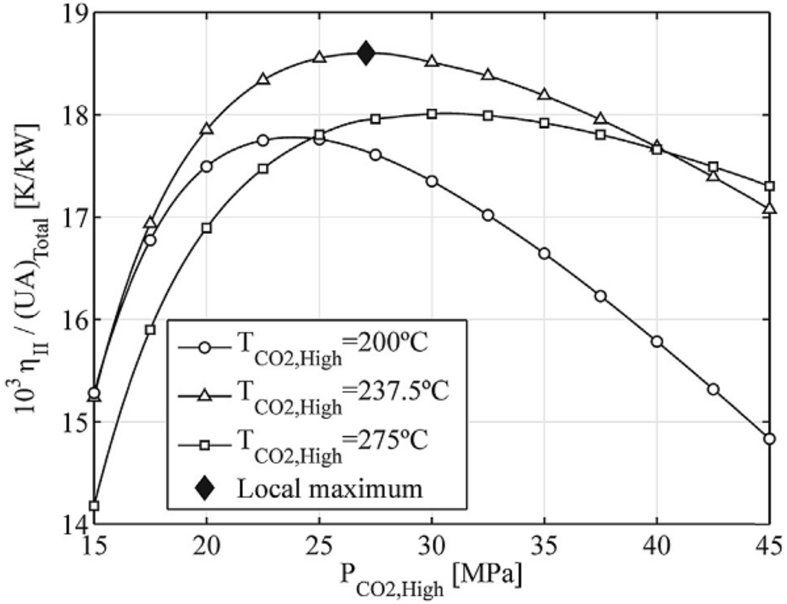
Ingeniería Mecánica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

CO_2 como Fluido de Trabajo

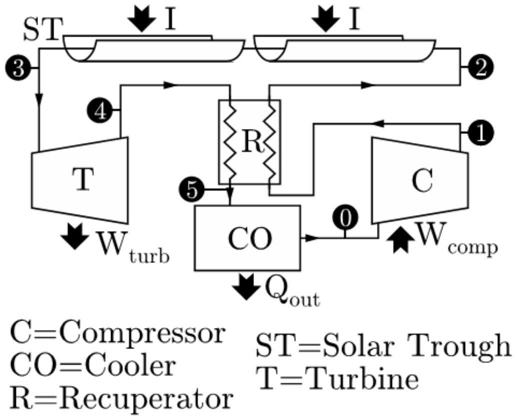


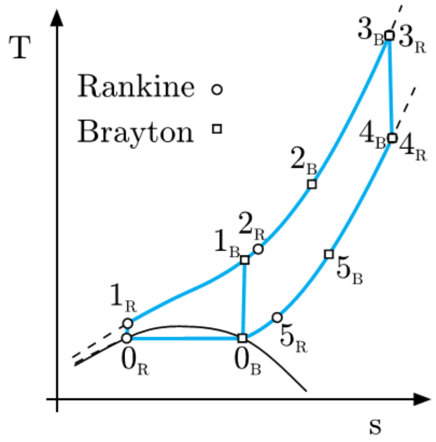
- Inicialmente investigado para ser utilizado en centrales nucleares
  - Angelino et al. (1968)

- Varios autores han demostrado las ventajas del uso de CO_2 y optimizado sus condiciones de operación
  - Battisti, F. G., Cardemil, J. M., & Da Silva, A. K. (2016). A multivariable optimization of a Brayton power cycle operating with CO2 as working fluid. *Energy*, *112*, 908–916.
  - Cardemil, J. M., & da Silva, A. K. (2016). Parametrized overview of CO2 power cycles for different operation conditions and configurations – An absolute and relative performance analysis. *Applied Thermal Engineering*, *100*, 146–154.



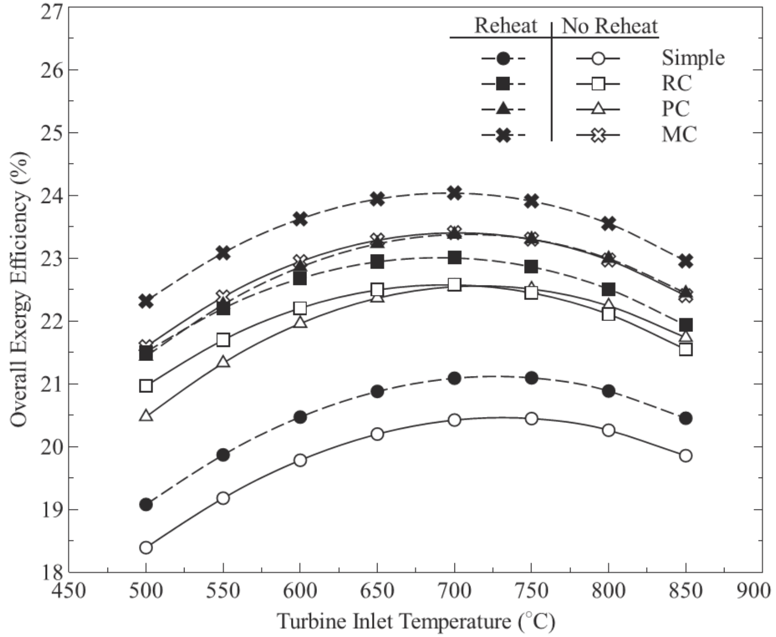
CO_2 como Fluido de Trabajo en CSP





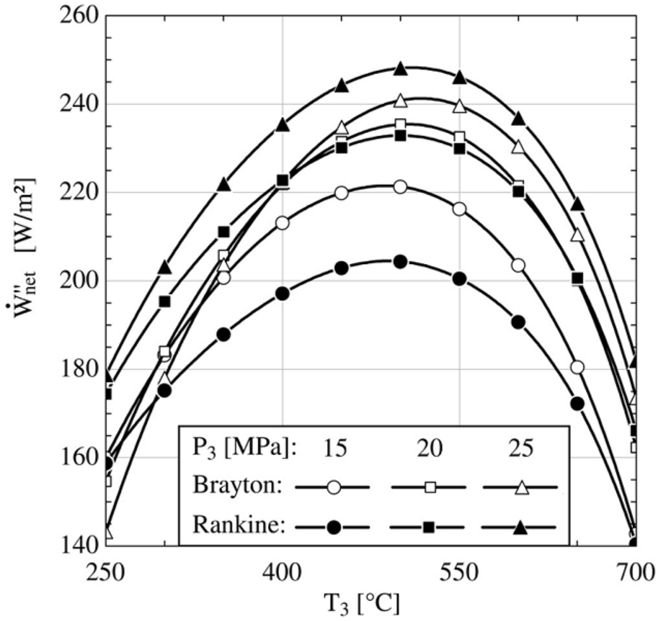
- Algunos autores han analizado su utilización en concentradores lineales

de Araujo Passos, L. A., de Abreu, S. L., & da Silva, A. K. (2017). Optimal scale of solar-trough powered plants operating with carbon dioxide. *Applied Thermal Engineering*, *124*, 1203–1212.



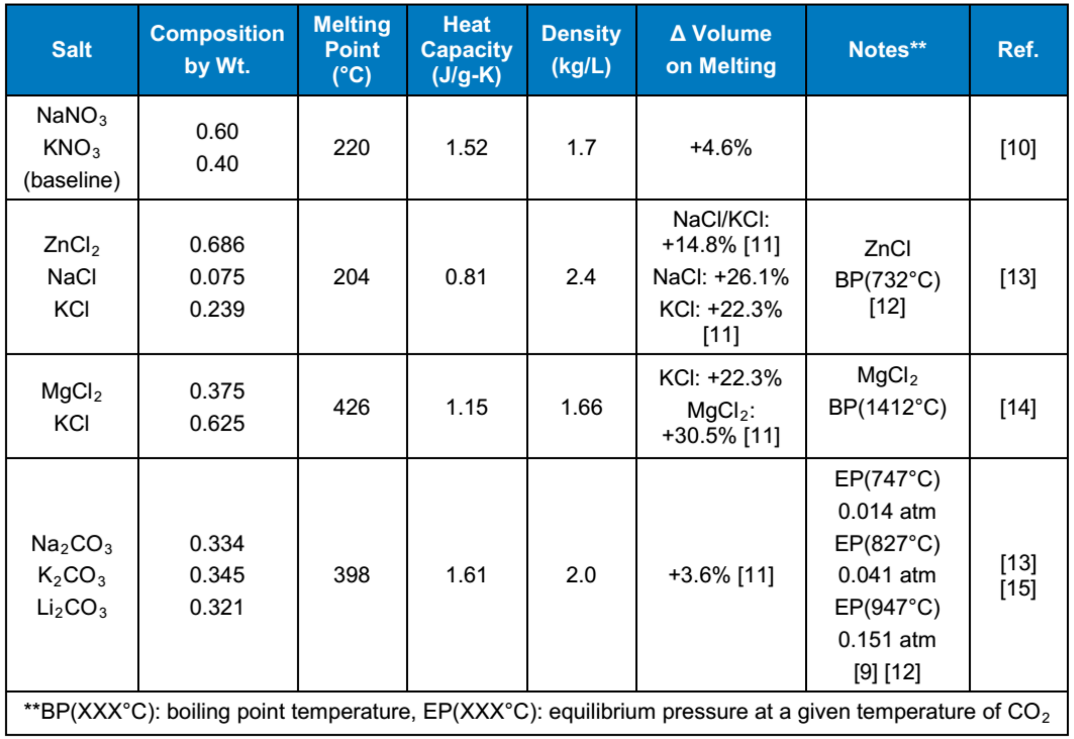
- Pero su mejor desempeño se observa en sistemas de torre

Padilla, R. V., Soo Too, Y. C., Benito, R., & Stein, W. (2015). Exergetic analysis of supercritical CO2 Brayton cycles integrated with solar central receivers. *Applied Energy*, *148*, 348–365.



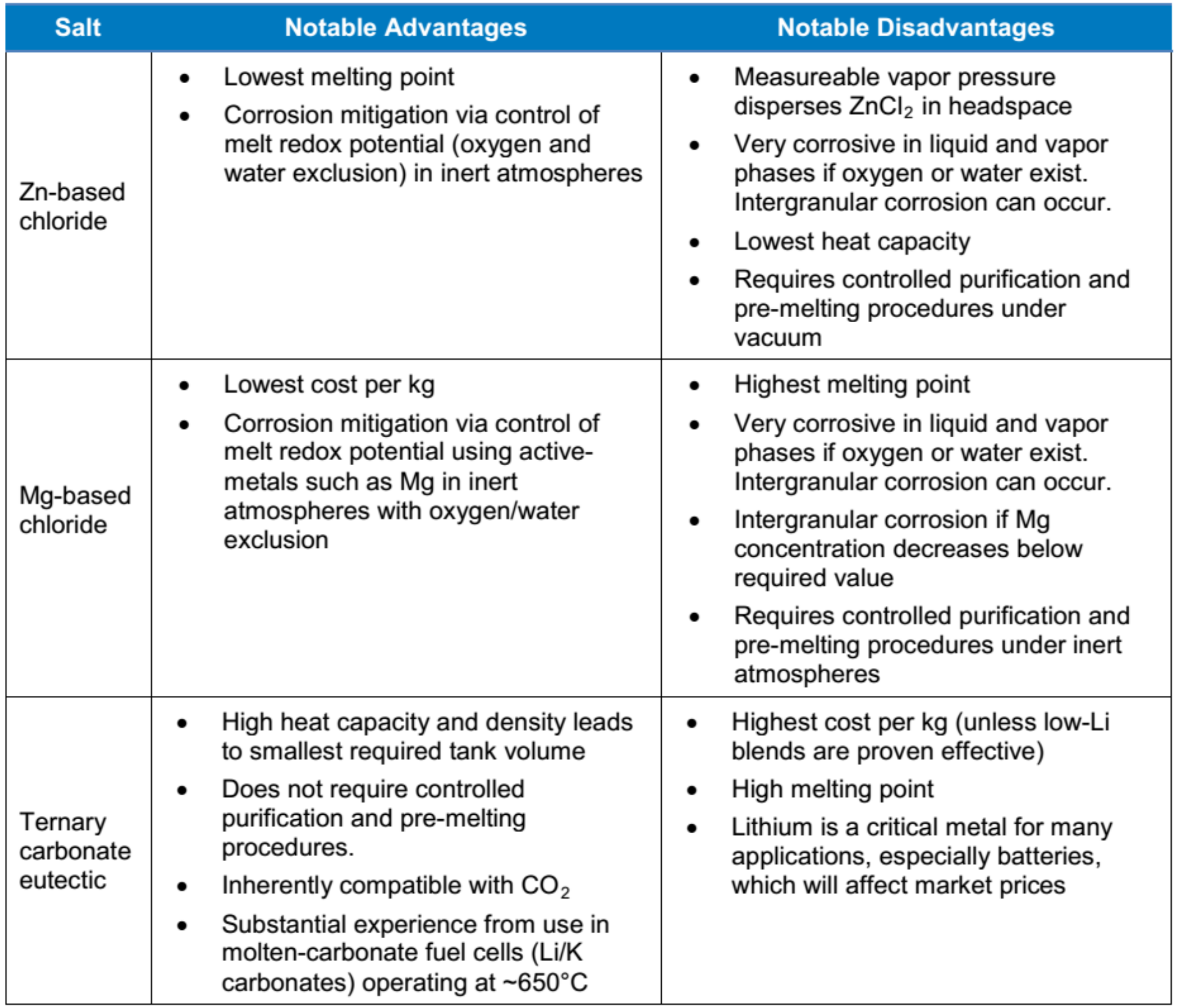
Pero Cuales son los desafíos pendientes

- ☐ Almacenamiento Térmico
  - Química de sales



Salt	Composition by Wt.	Melting Point (°C)	Heat Capacity (J/g-K)	Density (kg/L)	Δ Volume on Melting	Notes**	Ref.
$NaNO_3$ KNO_3 (baseline)	0.60 0.40	220	1.52	1.7	+4.6%		[10]
$ZnCl_2$ NaCl KCl	0.686 0.075 0.239	204	0.81	2.4	NaCl/KCl: +14.8% [11] NaCl: +26.1% KCl: +22.3% [11]	ZnCl BP(732°C) [12]	[13]
$MgCl_2$ KCl	0.375 0.625	426	1.15	1.66	KCl: +22.3% $MgCl_2$: +30.5% [11]	$MgCl_2$ BP(1412°C)	[14]
Na_2CO_3 K_2CO_3 Li_2CO_3	0.334 0.345 0.321	398	1.61	2.0	+3.6% [11]	EP(747°C) 0.014 atm EP(827°C) 0.041 atm EP(947°C) 0.151 atm [9] [12]	[13] [15]

**BP(XXX°C): boiling point temperature, EP(XXX°C): equilibrium pressure at a given temperature of CO_2



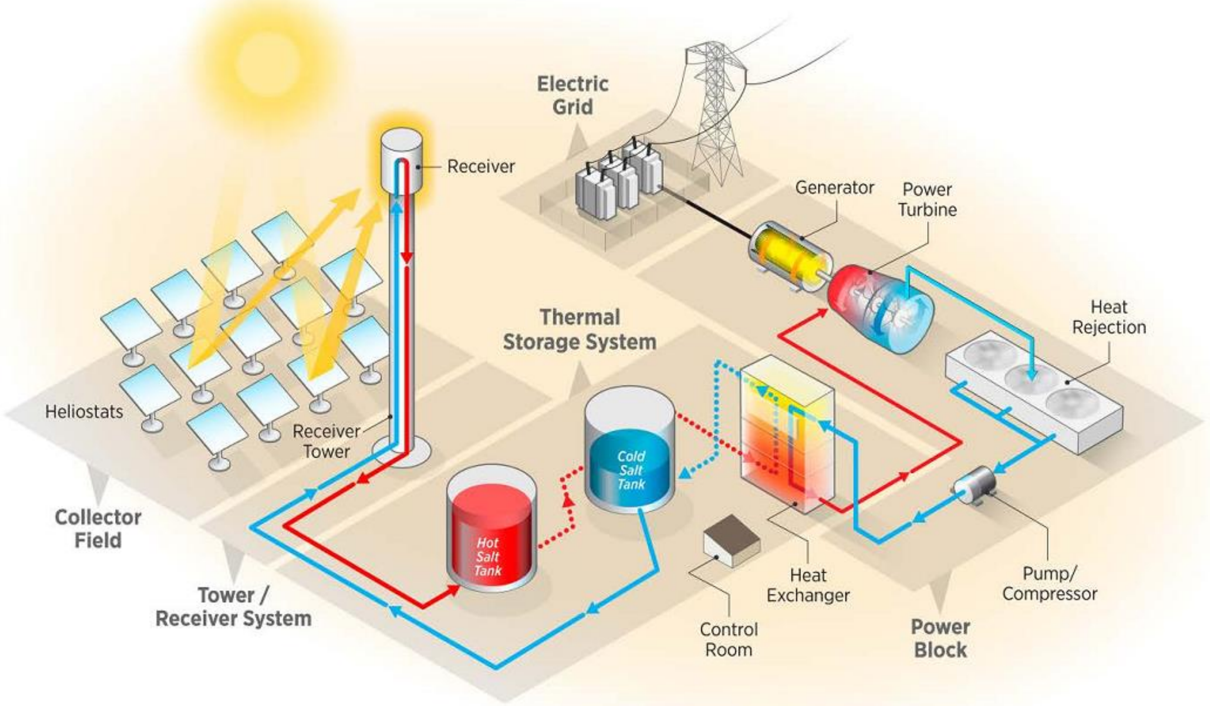
Salt	Notable Advantages	Notable Disadvantages
Zn-based chloride	• Lowest melting point • Corrosion mitigation via control of melt redox potential (oxygen and water exclusion) in inert atmospheres	• Measureable vapor pressure disperses $ZnCl_2$ in headspace • Very corrosive in liquid and vapor phases if oxygen or water exist. Intergranular corrosion can occur. • Lowest heat capacity • Requires controlled purification and pre-melting procedures under vacuum
Mg-based chloride	• Lowest cost per kg • Corrosion mitigation via control of melt redox potential using active-metals such as Mg in inert atmospheres with oxygen/water exclusion	• Highest melting point • Very corrosive in liquid and vapor phases if oxygen or water exist. Intergranular corrosion can occur. • Intergranular corrosion if Mg concentration decreases below required value • Requires controlled purification and pre-melting procedures under inert atmospheres
Ternary carbonate eutectic	• High heat capacity and density leads to smallest required tank volume • Does not require controlled purification and pre-melting procedures. • Inherently compatible with CO_2 • Substantial experience from use in molten-carbonate fuel cells (Li/K carbonates) operating at ~650°C	• Highest cost per kg (unless low-Li blends are proven effective) • High melting point • Lithium is a critical metal for many applications, especially batteries, which will affect market prices

Fuente: NREL 2017, Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap

Ingeniería Mecánica
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Desafíos pendientes: s-CO_2 + Sales

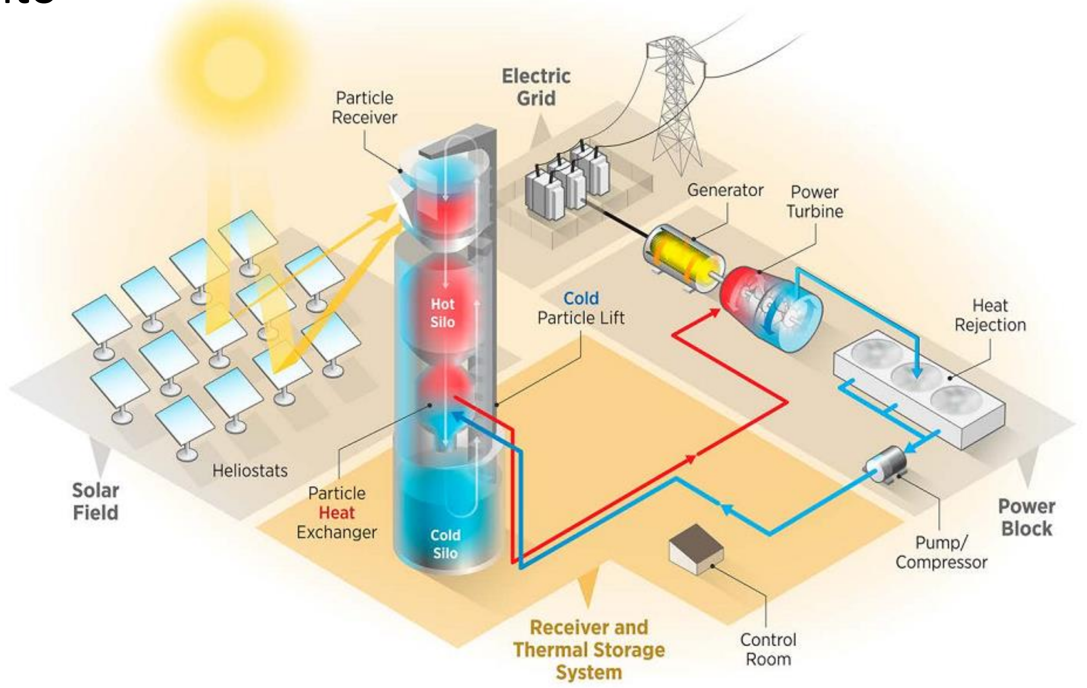
- Combatividad de materiales/sales
  - Corrosión
  - Bombas
  - Válvulas
  - Piping
  - Receptor
  - Intercambiadores de calor
    - Micro canales pre-impresos



Fuente: SAM (2017)

Otra alternativa: Falling Particles

- Partículas sólidas absorben la radiación: Directa o indirectamente
- Las propias partículas actúan como medio de almacenamiento
- Desafíos:
  - Resistencia de las partículas (pérdida)
  - Geometría del receptor
  - Almacenamiento de partículas
  - Intercambiador de calor

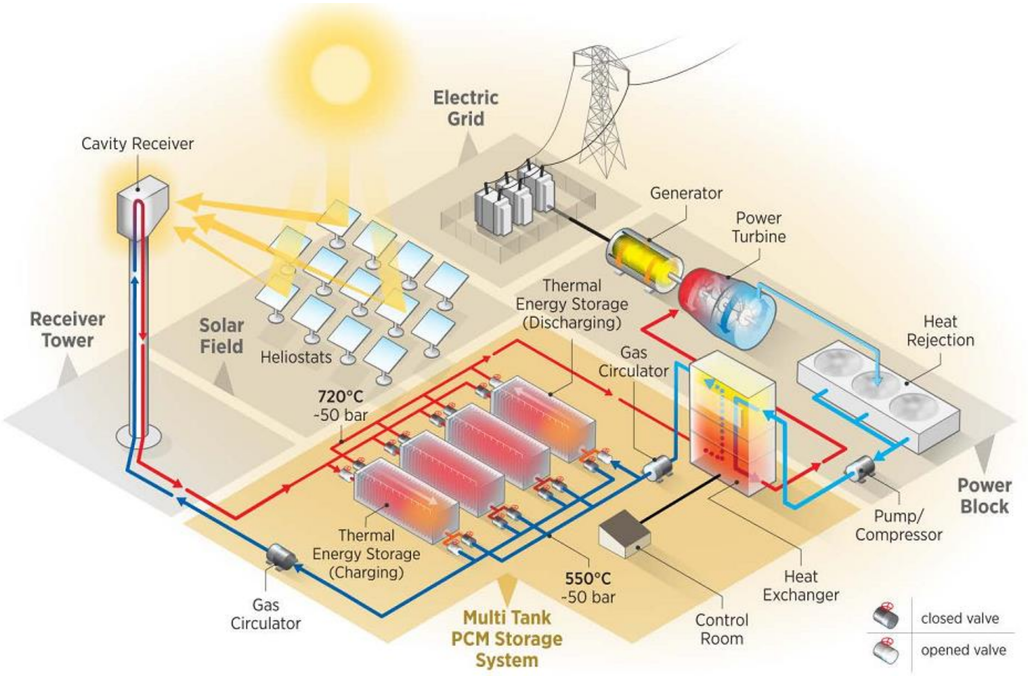


C. Ho et al., "Technology advancements for next generation falling particle receivers," in *Proceedings of the Solarpaces 2013 International Conference (Energy Procedia)*, 2014.

Material	Composition	Properties[a]		Advantage	Disadvantage
		Density(kg/m^3)	Specific Heat (J/kg-K)		
Silica sand	SiO_2	2,610	1,000	Stable, abundant, low cost	Low solar absorptivity and conductivity
Alumina	Al_2O_3	3,960	1,200	Stable	High cost
Coal ash	SiO_2, Al_2O_3, + minerals	2,100	720 at ambient temperature	Stable, abundant, No/low cost	Identify suitable ash
Calcined Flint Clay	SiO_2, Al_2O_3, TiO_2,Fe_2O_3	2,600	1,050	Mined, abundant, used as filler in FB boiler	Low absorptivity
Ceramic proppants	75% Al_2O_3, 11%SiO_2, 9%Fe_2O_3, 3%TiO_2	3,300	1,200 (at 700°C)	High solar absorptivity, stable	Synthesized, higher cost

Fase gaseosa: Receptor de cavidad

- El gas absorbe calor directamente en el absorbedor
  - Receptor volumétrico/cavidad
  - Absorberdor → Medio Poroso
  - Apto para CO2, Helio y Aire
  - Estabilidad y altas efectividad de absorción
  - Bajo costo e impacto ambiental



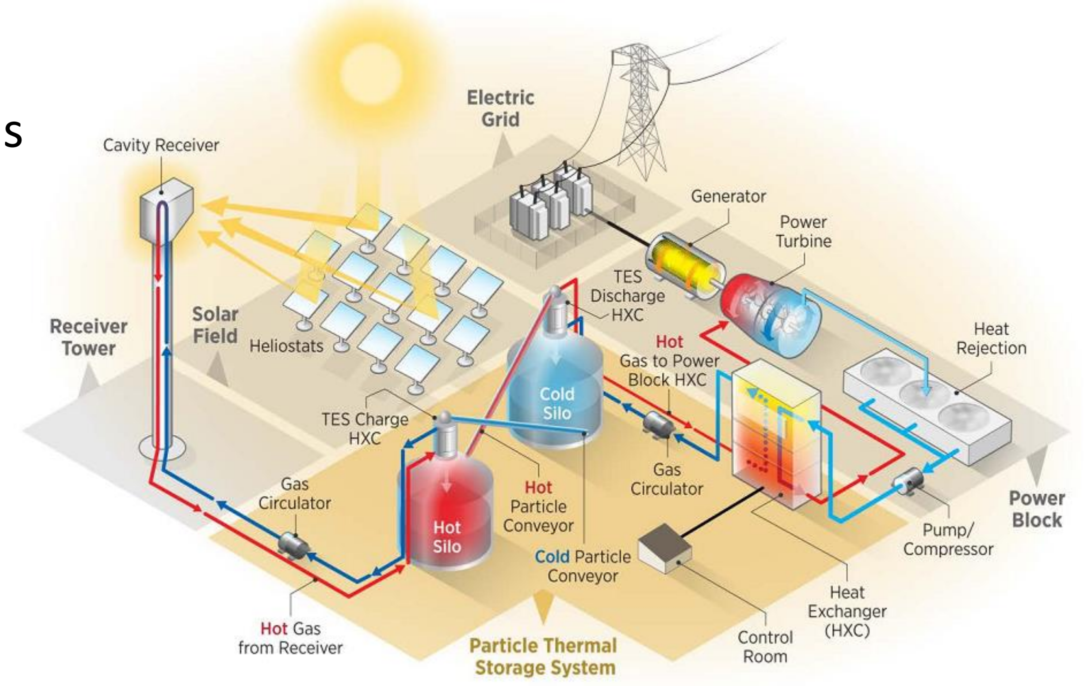
- Desafíos
  - Capacidad de transferencia de calor reducida
  - Integración a TES
  - Alta potencia en flujo de fluidos →Complejidad en el patrón de flujo

Fuente: NREL (2017)

Ingeniería Mecánica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

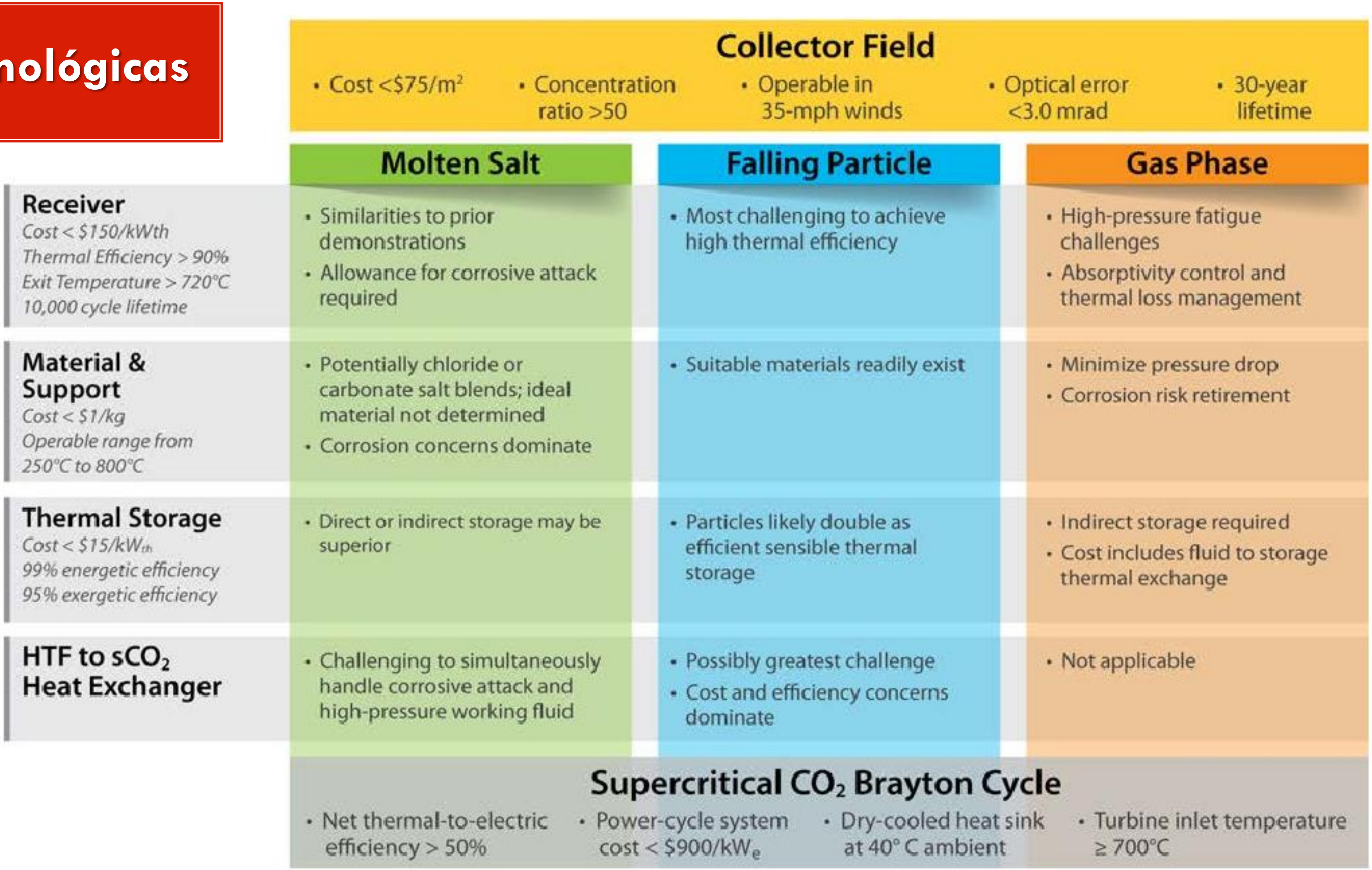
Una combinación de las alternativas anteriores?

- Substituir la configuración de convencional de dos tanques, por dos silos
- Receptor volumétrico + almacenamiento en partículas
- Aún en estudio, muchos desafíos en relación a la integración y al sistema de control



Fuente: NREL (2017)

Opciones Tecnológicas



Collector Field

- Cost <$75/m²
- Concentration ratio >50
- Operable in 35-mph winds
- Optical error <3.0 mrad
- 30-year lifetime

	Molten Salt	**Falling Particle**	**Gas Phase**
Receiver *Cost < $150/kWth* *Thermal Efficiency > 90%* *Exit Temperature > 720°C* *10,000 cycle lifetime*	• Similarities to prior demonstrations • Allowance for corrosive attack required	• Most challenging to achieve high thermal efficiency	• High-pressure fatigue challenges • Absorptivity control and thermal loss management
Material & Support *Cost < $1/kg* *Operable range from 250°C to 800°C*	• Potentially chloride or carbonate salt blends; ideal material not determined • Corrosion concerns dominate	• Suitable materials readily exist	• Minimize pressure drop • Corrosion risk retirement
Thermal Storage *Cost < $15/kW$_{th}$* *99% energetic efficiency* *95% exergetic efficiency*	• Direct or indirect storage may be superior	• Particles likely double as efficient sensible thermal storage	• Indirect storage required • Cost includes fluid to storage thermal exchange
HTF to sCO$_2$ Heat Exchanger	• Challenging to simultaneously handle corrosive attack and high-pressure working fluid	• Possibly greatest challenge • Cost and efficiency concerns dominate	• Not applicable

Supercritical CO$_2$ Brayton Cycle

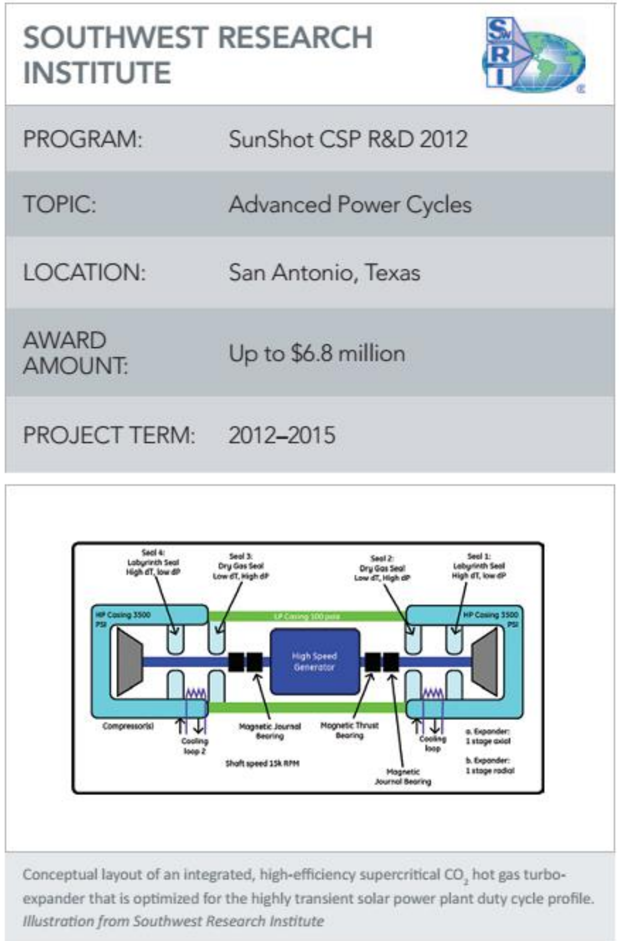
- Net thermal-to-electric efficiency > 50%
- Power-cycle system cost < $900/kW$_e$
- Dry-cooled heat sink at 40° C ambient
- Turbine inlet temperature ≥ 700°C

Fuente:
NREL 2017, Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap

Un desafío adicional…

- Turbinas de CO_2 con elevadas eficiencias aun no están disponibles

- Programa SunShot ha investido significativos recursos en este tópico
  - 2020 Operación de pilotos
  - 2030 Escala comercial



SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE

PROGRAM:	SunShot CSP R&D 2012
TOPIC:	Advanced Power Cycles
LOCATION:	San Antonio, Texas
AWARD AMOUNT:	Up to $6.8 million
PROJECT TERM:	2012–2015

Conceptual layout of an integrated, high-efficiency supercritical CO_2 hot gas turbo-expander that is optimized for the highly transient solar power plant duty cycle profile. *Illustration from Southwest Research Institute*

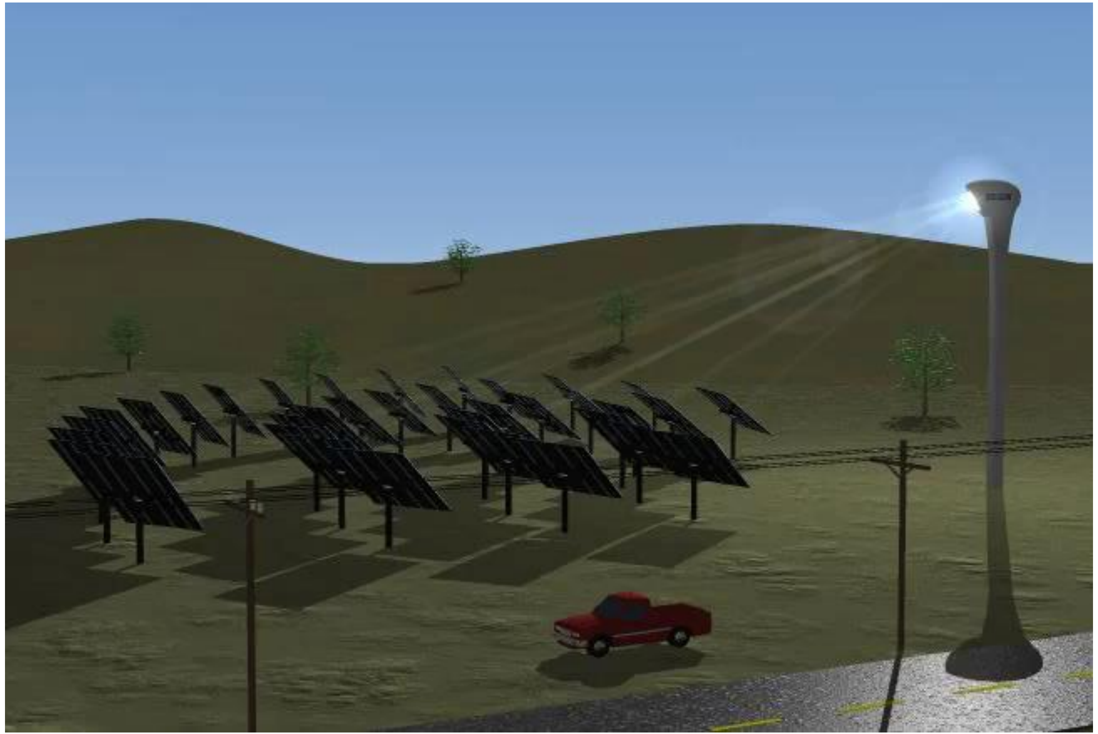
NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY

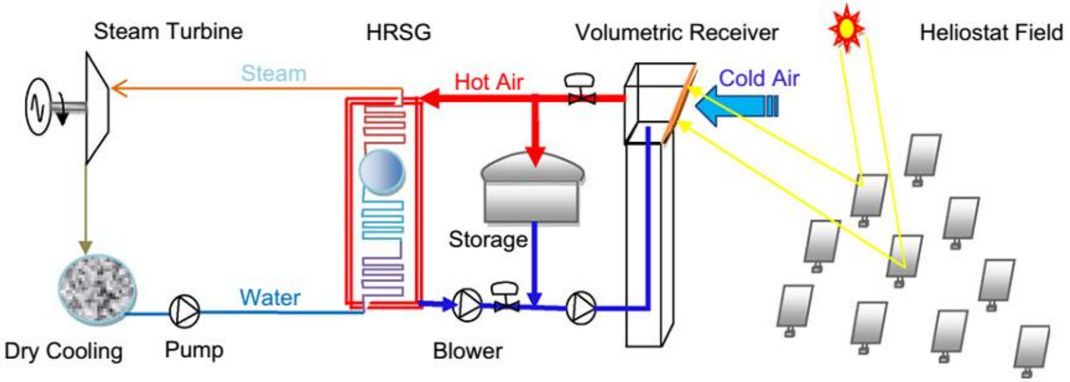
PROGRAM:	SunShot CSP R&D 2012
TOPIC:	Advanced Power Cycles
LOCATION:	Golden, Colorado
AWARD AMOUNT:	Up to $8 million
PROJECT TERM:	2012–2015

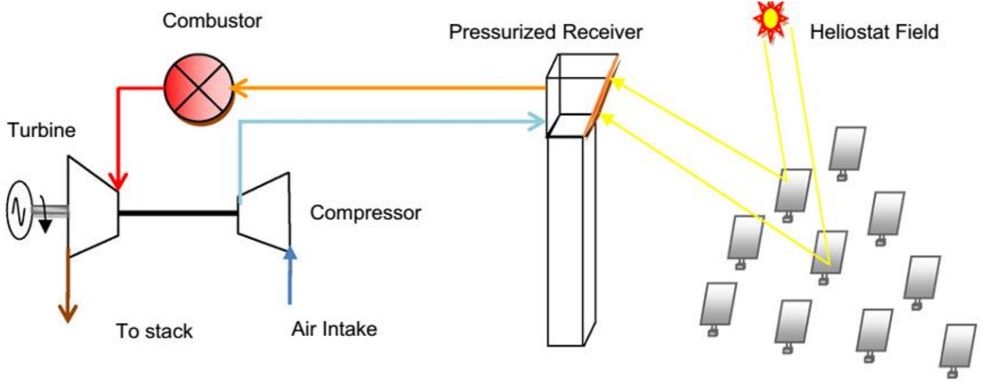
This project's team will build a prototype of the largest and highest-temperature s-CO_2 closed Brayton power cycle turbine ever constructed. The use of carbon dioxide instead of steam allows higher power-cycle efficiency and more compact cycle components. *Illustration from Dresser-Rand*

Pero es el CO_2 la única alternativa?

- Una alternativa:
  - Aire atmosférico como fluido de trabajo
    - Barato y estable
    - Fácil de integrar con ciclos de gas
- Desafíos:
  - Receptor volumétrico
  - Almacenamiento térmico costo efectivo
    - Rocas?
    - Concreto?
- Proyecto en evaluación







Fuente: CSP 247 (2018)

Santiago, 02/04/2018


Nuclear Energy
Nuclear source
sCO_2
Team Challenges
• Turbomachinery
• Advanced Recuperators
• Materials Development
• Sensors & Controls
• Systems integration and Modeling
Fossil Energy
Direct-fire
Renewable Power
Concentrating Solar

En resumen….

Muchas Gracias

fcfm
Ingeniería Mecánica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

SERC CHILE
SOLAR ENERGY RESEARCH CENTER

LEPTEN

CONICYT
Ministerio de Educación
Gobierno de Chile
FONDECYT
Fondo Nacional de Desarrollo
Científico y Tecnológico

José Miguel Cardemil, PhD jcardemil@ing.uchile.cl

Cristóbal Sarmiento, M.Sc.
DIMEC, UChile

Alexandre Kupka, PhD
LEPTEN, Universidade Federal de Santa Catarina