

Seminario sobre ENERGIA SOLAR

20-21 de Febrero 2006

Consejo Social, Universidad Politécnica de Madrid

2ª Jornada, día 21 de febrero, 2006

**2ª Sesión: Tecnología y aplicaciones especiales de la
energía solar**

**D. Luis E. Díez
SERLED**

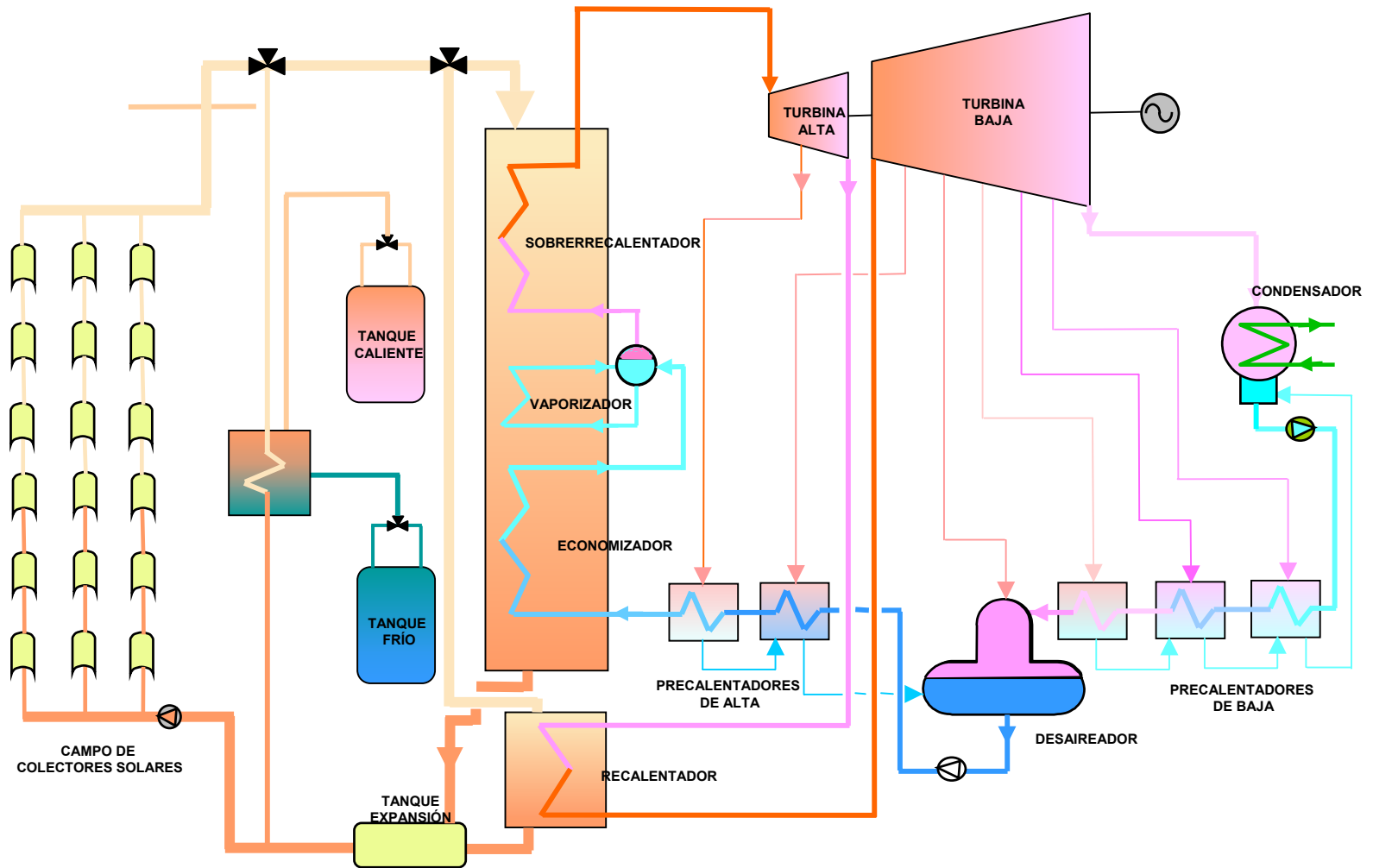
**“Desarrollos tecnológicos en energía solar
termoeléctrica”**

Desarrollos tecnológicos en energía solar termoelectrónica

Luis E. Díez
Serled Consultores

Seminario sobre Energía Solar
Universidad Politécnica de Madrid
20-21 de Febrero 2006

Análisis optimización Tecnologías Probadas



Desarrollos tecnológicos

Desarrollo *SOL-GAS*

Desarrollo *SOL-BIO*

Desarrollo *SOLAIR*

Desarrollo *SOLAUT*

Desarrollo *SOL-SMR*

1992

Desarrollo SOL-GAS

Aplicación analizada inicialmente:

Cogeneración industrial

Objetivos básicos hibridación en ciclo combinado:

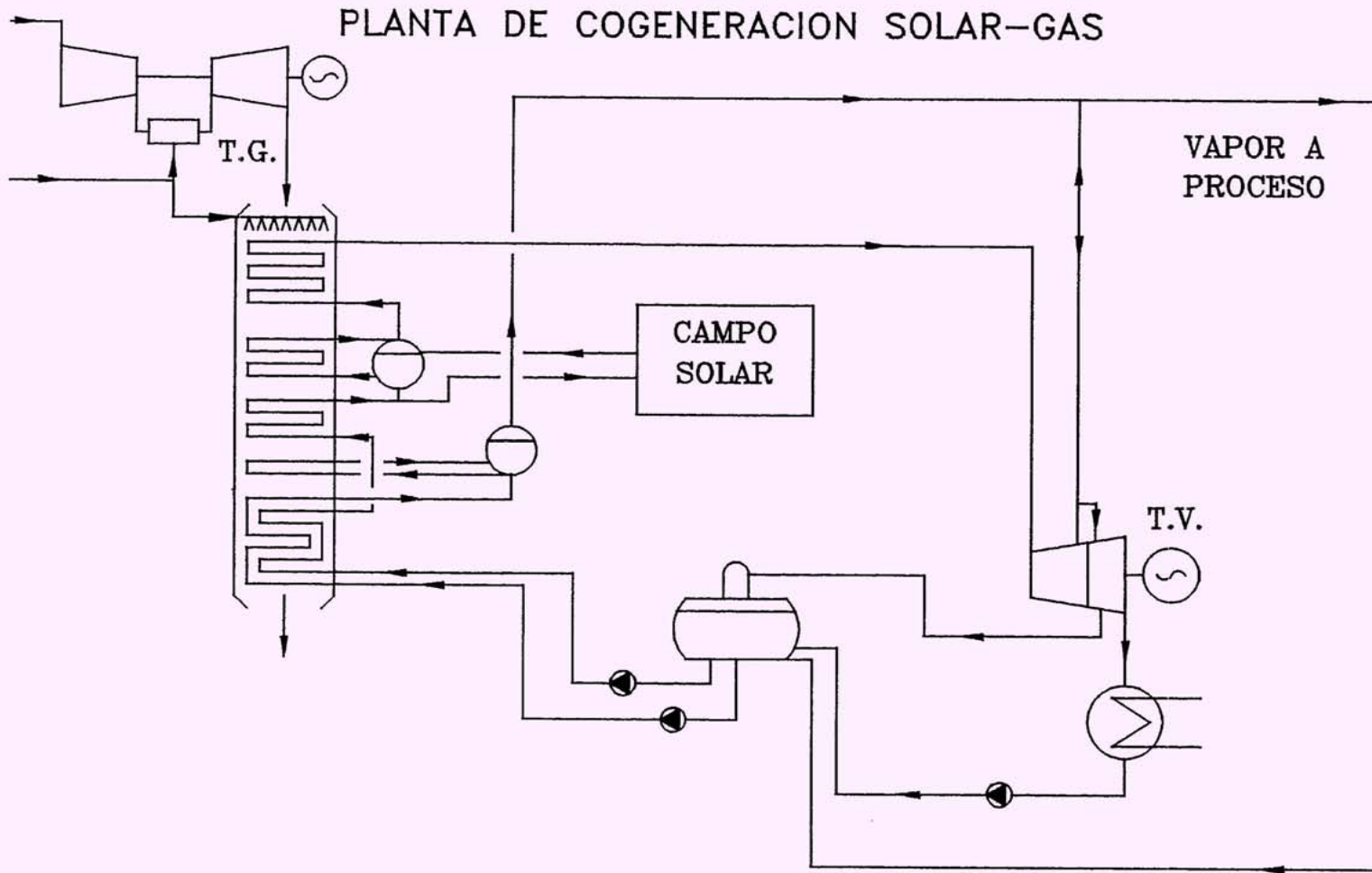
- Garantizar aporte térmico a proceso
- Reducir coste generación solar
- Incrementar rendimiento de transformación

Desarrollo SOL-GAS

Alternativas analizadas y **preseleccionadas:**

- Aportación solar al ciclo de gas
 - Ciclo abierto o cerrado
 - Torre central, limitada a 10 bar, 800 °C
- Aportación solar al ciclo de vapor
 - Vapor saturado o sobrecalentado
 - Torre central o colectores distribuidos

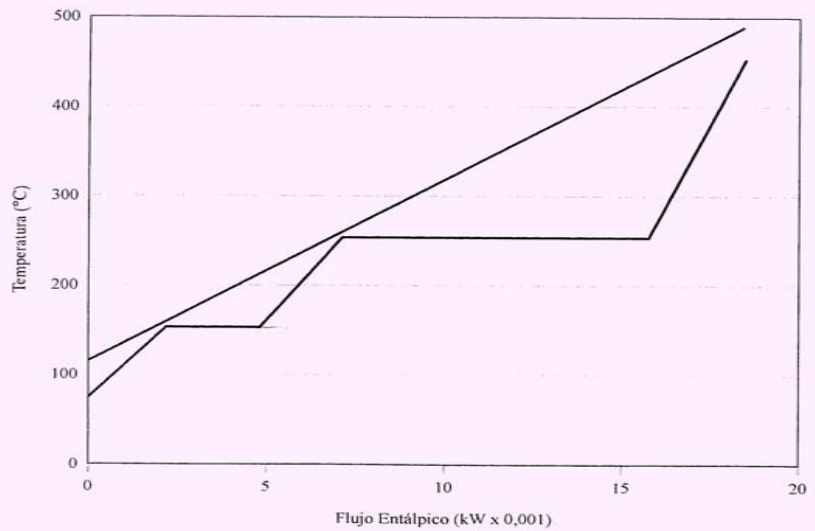
Desarrollo SOL-GAS



Desarrollo SOL-GAS

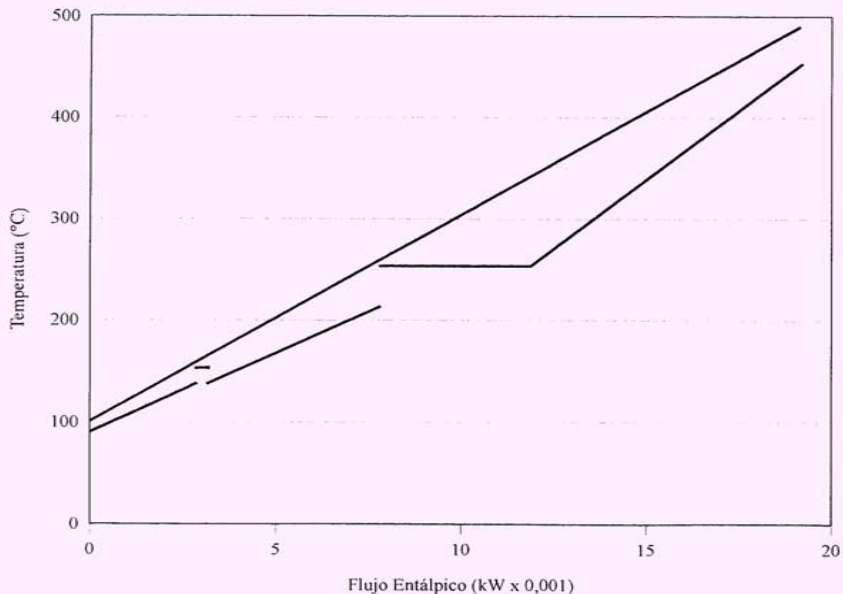
PLANTA COGENERACIÓN SOLAR-GAS

DIAGRAMA TEMPERATURA-FLUJO ENTÁLPICO EN CALDERA (CONDICIÓN 7:0% SOL)



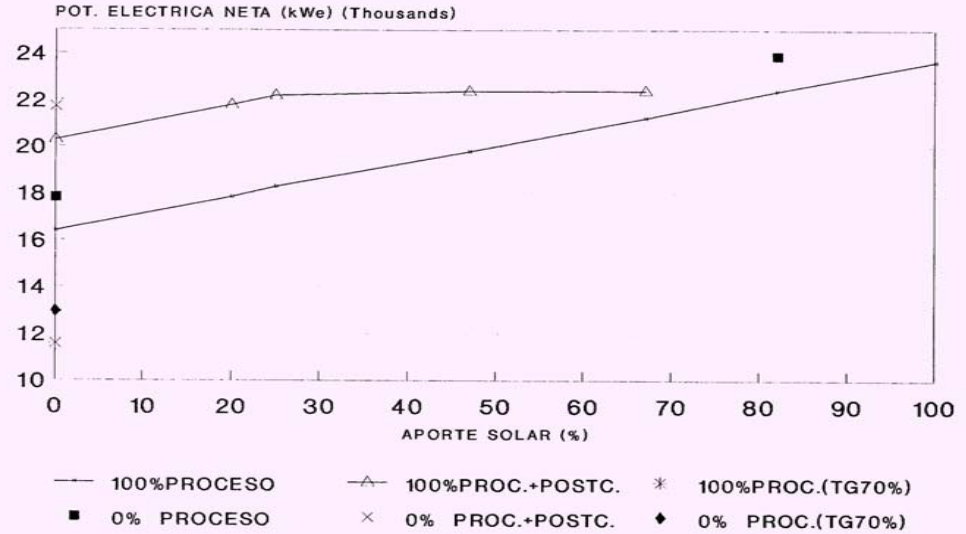
PLANTA COGENERACIÓN SOLAR-GAS

DIAGRAMA TEMPERATURA-FLUJO ENTÁLPICO EN CALDERA (CONDICIÓN 3:100% SOL)



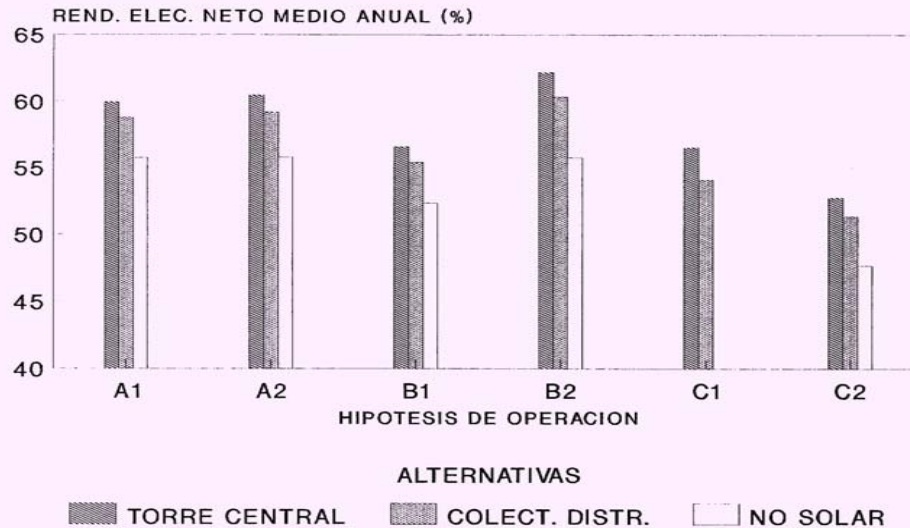
Desarroll O SOL- GAS

PLANTA COGENERACION SOLAR-GAS POTENCIA ELECTRICA NETA



Temperatura ambiente: 15°C

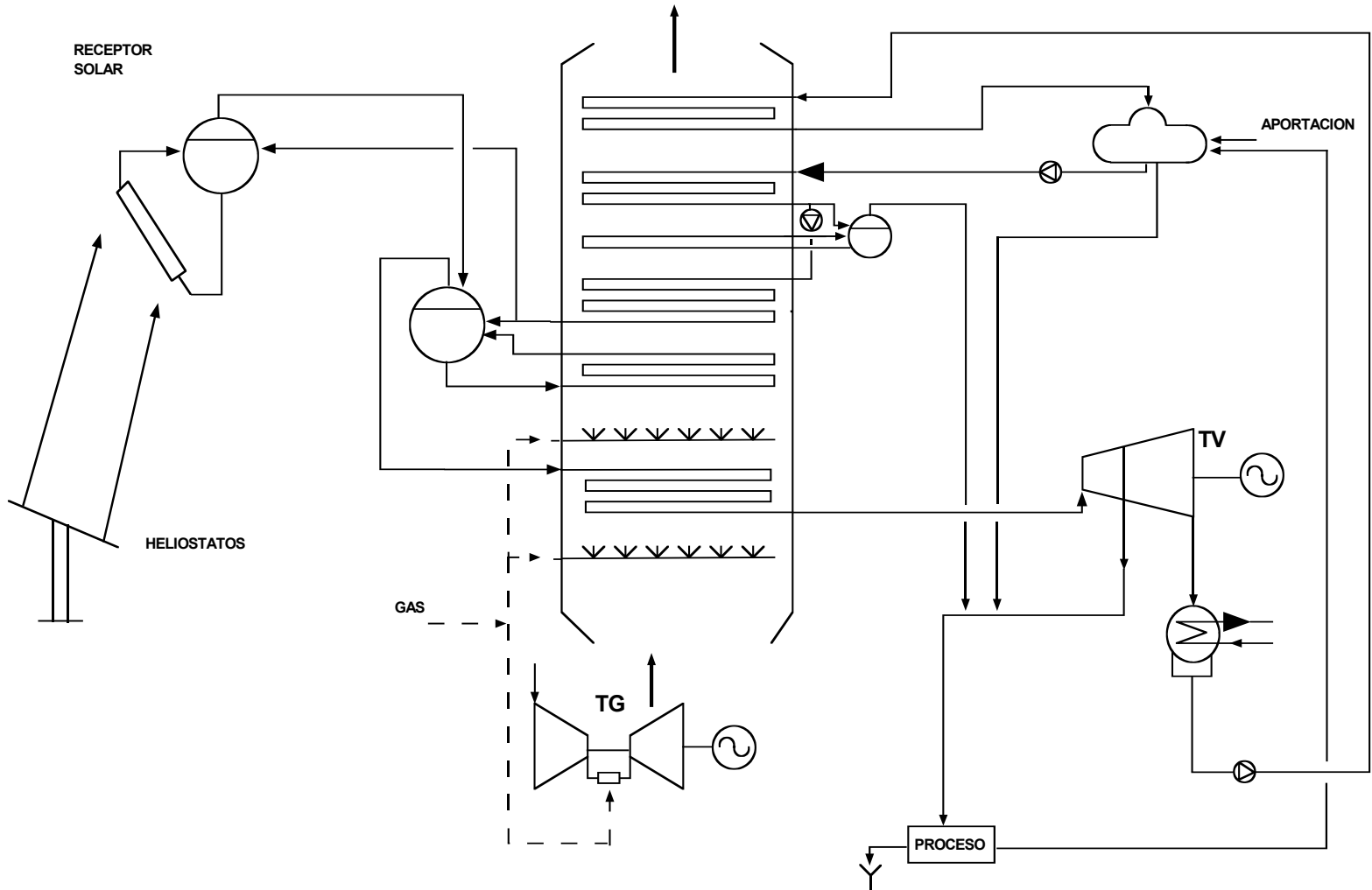
PLANTA COGENERACION SOLAR-GAS REND. ELECTR. NETO MEDIO ANUAL



Rendimiento sobre combustible adicional
en los casos con cogeneración

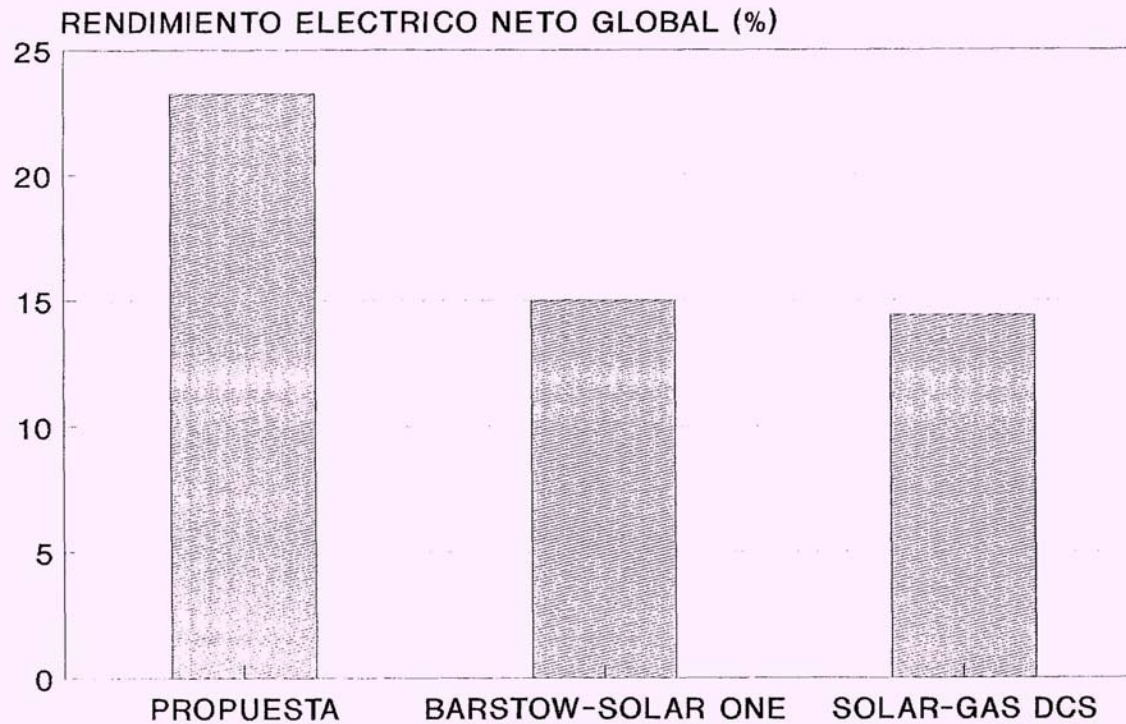
Desarrollo SOL-GAS

ESQUEMA PLANTA SOL-GAS



Desarrollo SOL-GAS

RENDIMIENTOS NETOS DE TRANSFORMACION DE ENERGIA SOLAR EN ENERGIA ELECTRICA



Nota: En las plantas con apoyo solar se ha considerado el incremento de potencia eléctrica al recibir el apoyo solar.

Desarrollo SOL-GAS

Cambio aplicación del concepto:

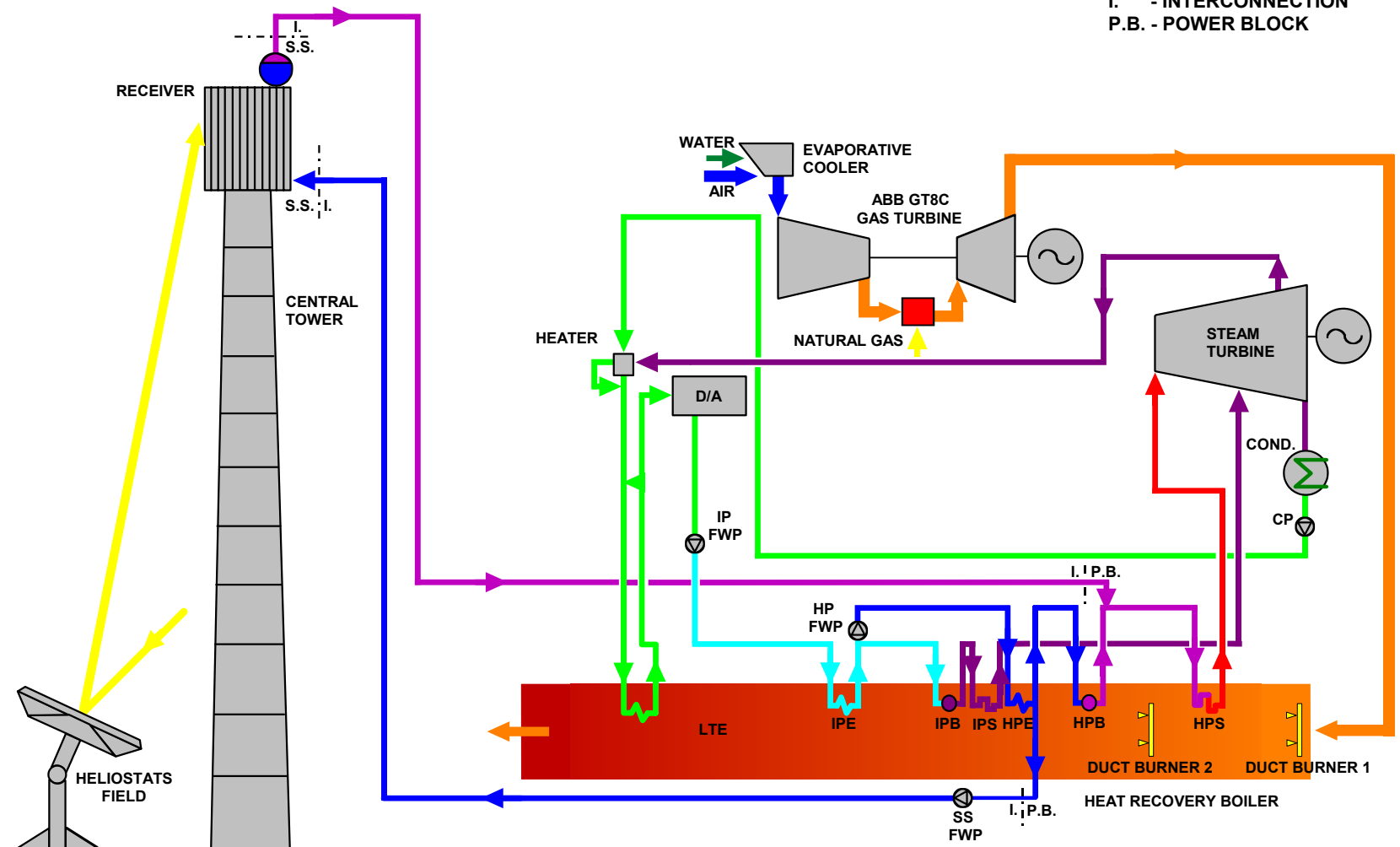
**Generación eléctrica plantas media potencia
(Proyecto Intersudmed)**

Ventajas nueva aplicación:

- Mayor potencia y rendimiento
- Estandarización del diseño
- Mayor garantía ingresos por producción

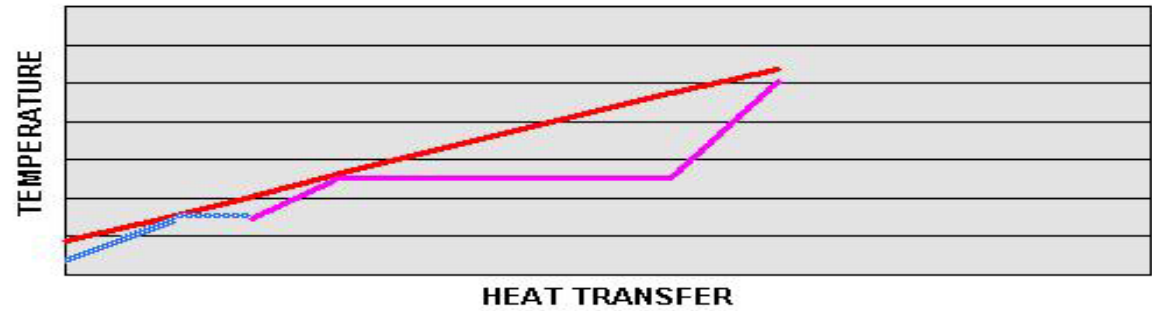
Desarrollo SOL-GAS

S.S. - SOLAR SYSTEM
 I. - INTERCONNECTION
 P.B. - POWER BLOCK

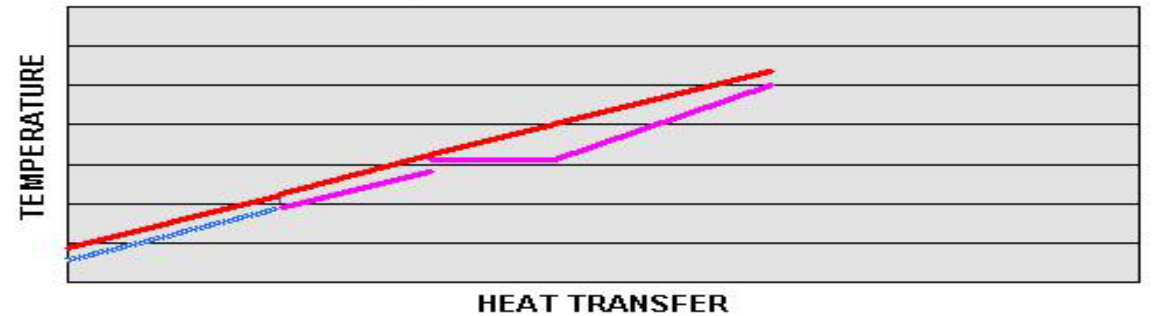


Desarrollo SOL-GAS

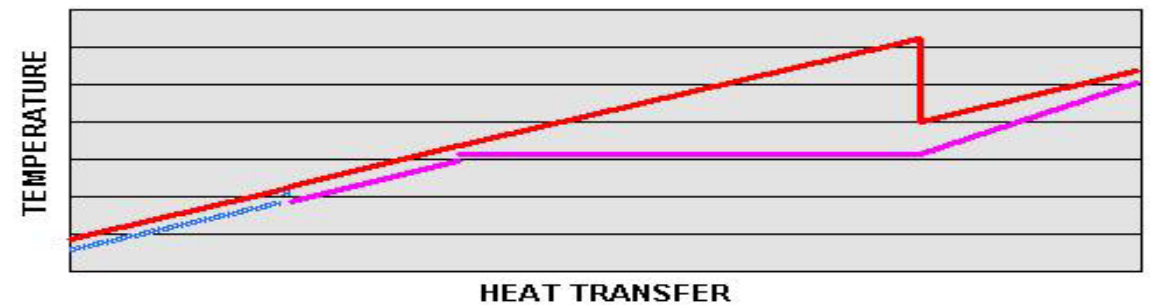
Operation without solar steam - Unfired



Operation with solar steam



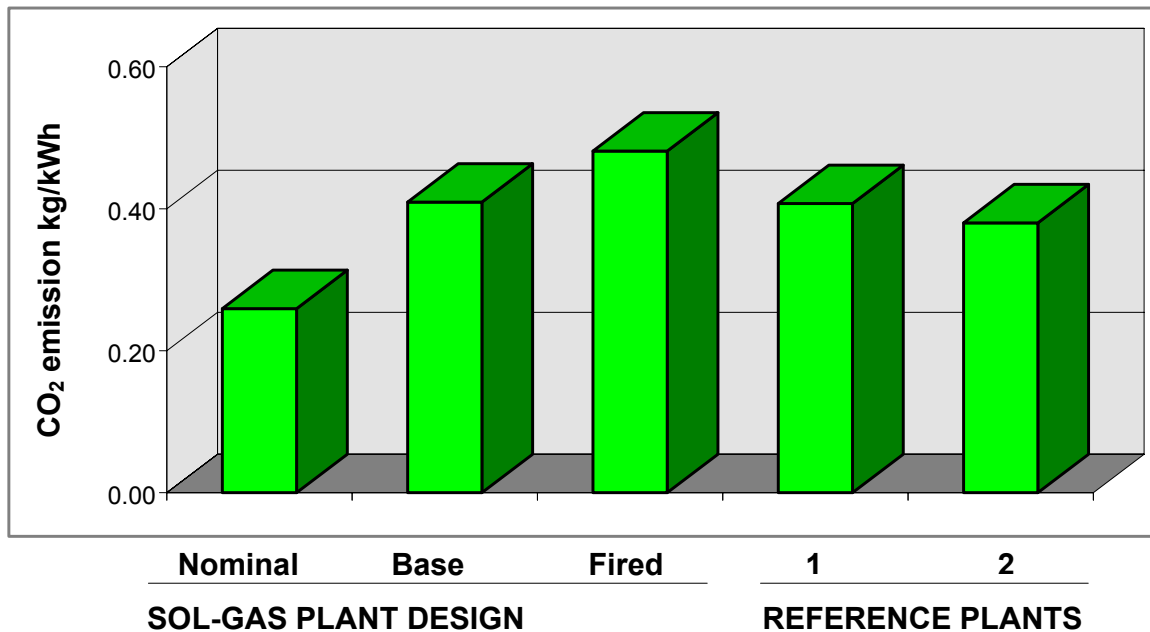
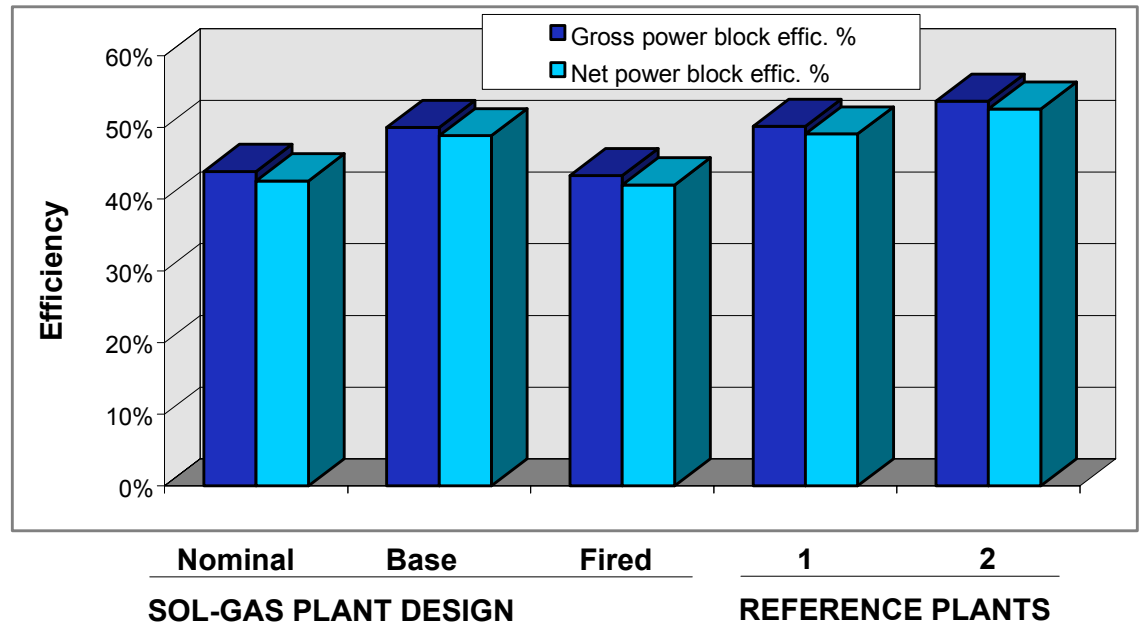
Operation without solar steam - Supplementary fired



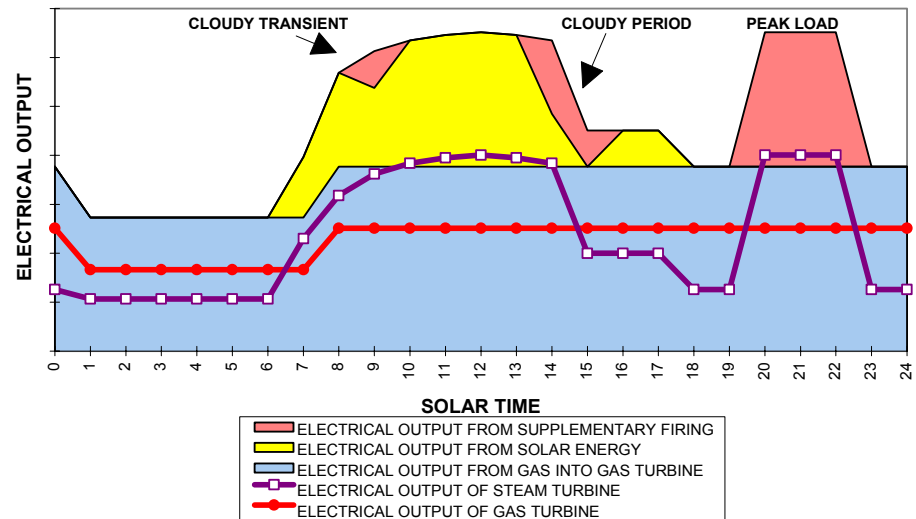
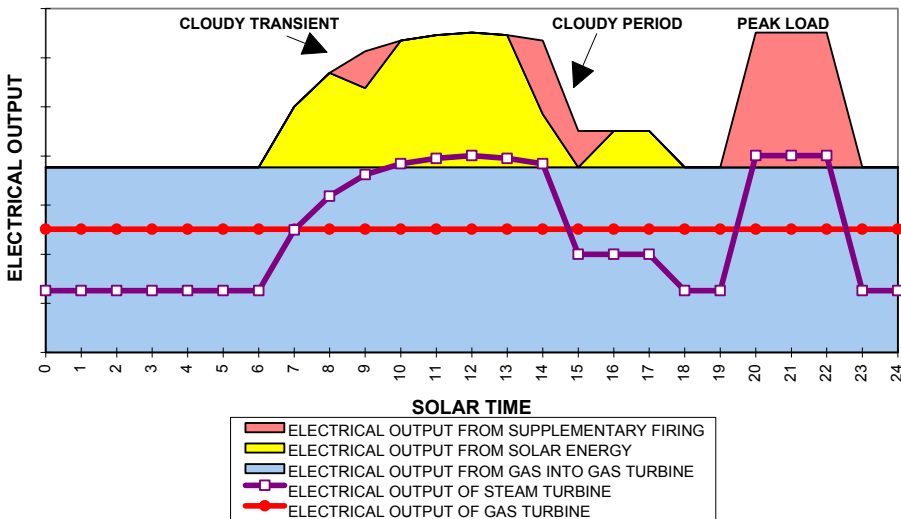
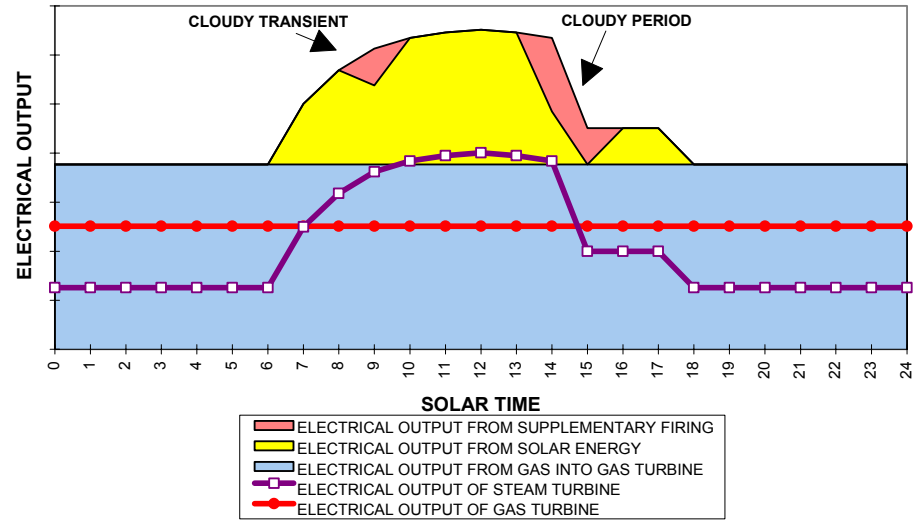
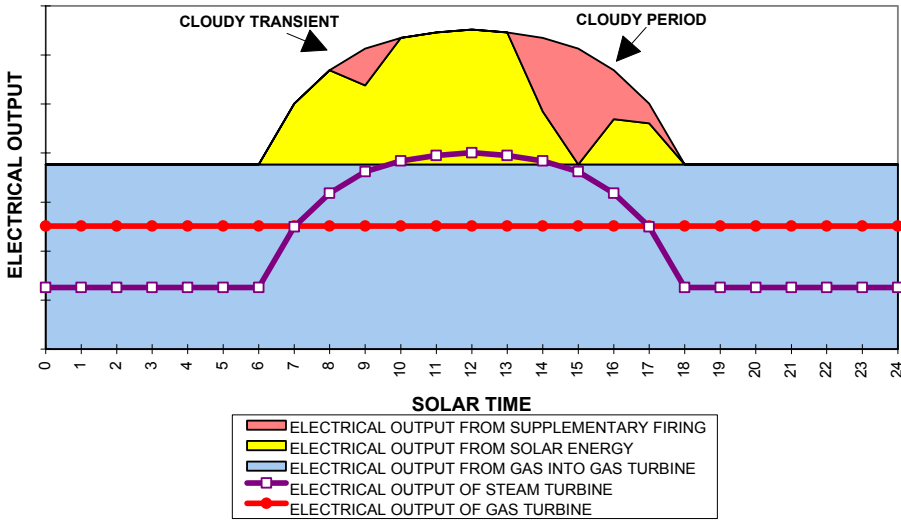
Desarrollo SOL-GAS

Parameters	Units	SOL-GAS PLANT			REFERENCE PLANTS	
		Nominal	Base	Fired	1	2
Nat. gas thermal power (LHV)	kW _{th}	161983	150735	300531	150737	185570
Solar thermal power to PB	kW _{th}	135131	0	0	0	0
Gas turbine output	kW	50195	50207	50009	50209	65889
Steam turbine output	kW	80116	25178	80114	25425	33705
Gross output	kW	130311	75385	130123	75635	99594
Net output	kW	126423	73657	126229	73990	97580
Gross power block effic.	%	43.86%	50.01%	43.30%	50.18%	53.67%
Net power block effic.	%	42.55%	48.87%	42.00%	49.09%	52.58%

Desarrollo SOL- GAS



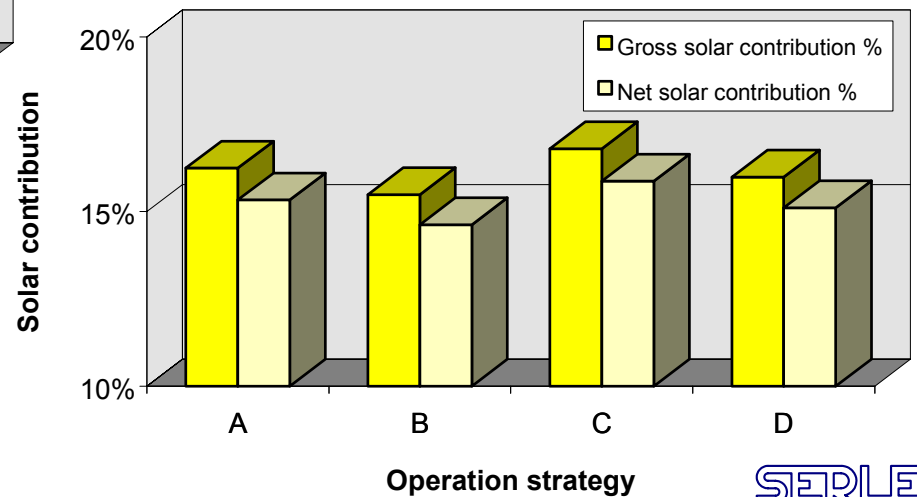
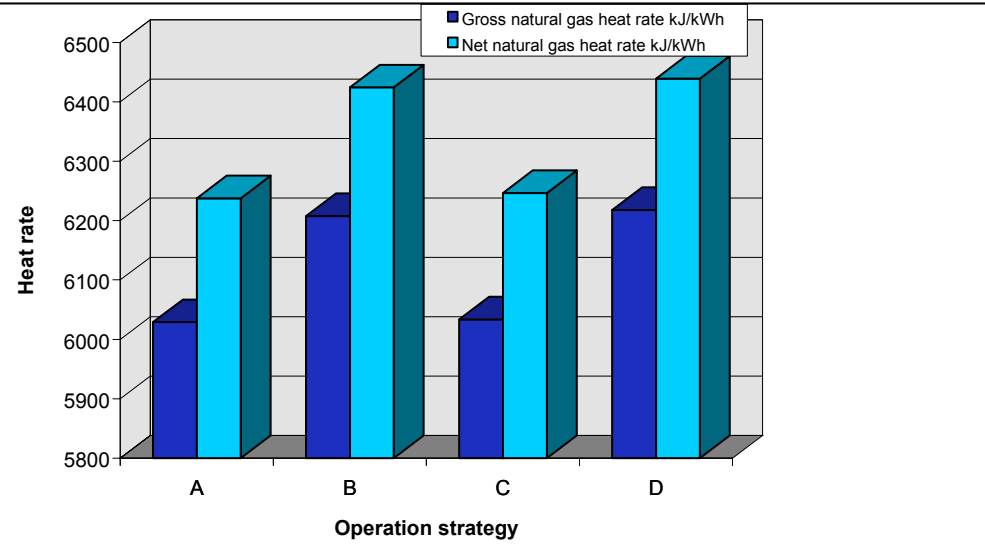
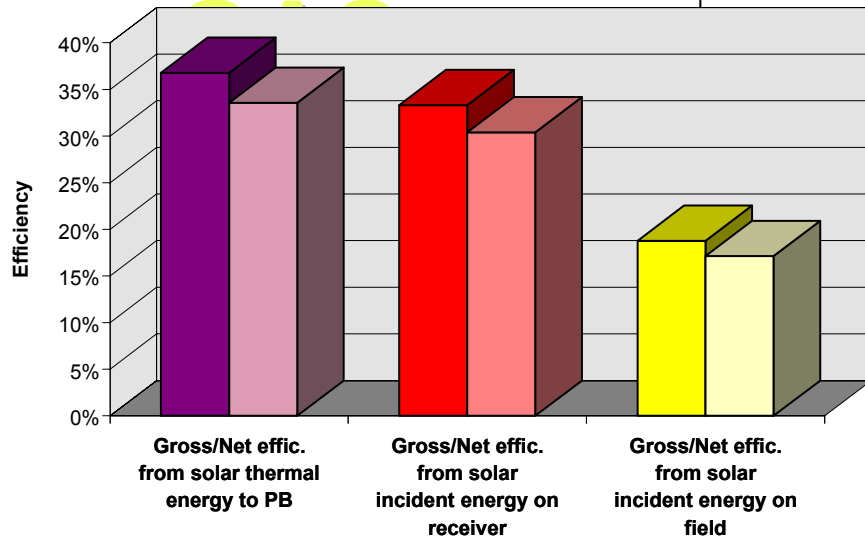
Desarrollo SOL-GAS



Desarroll

O

SOL-



Desarrollo SOL-GAS

Conclusiones técnicas:

- Excelentes características de regulación de carga, entre el 45% y el 100%
- Alto rendimiento neto solar a electricidad: 19.8% Nominal, 17.1% Anual
- Participación solar anual hasta del 15.9%
- Consumo específico de gas anual

Desarrollo SOL-GAS

Conclusiones económicas:

- Gran incremento del coste de inversión: más del doble que la planta convencional

Varias plantas de este tipo (ISCCS) están actualmente en fase de proyecto en el mundo con apoyo del Banco Mundial, basadas en campos solares de cilindroparábolas, por tratarse de una tecnología de captación más probada

En España los proyectos de plantas híbridas fueron abandonados al no poder acogerse a las primas del régimen especial de generación

Desarrollo SOL-BIO

Los desarrollos de plantas mixtas sol-biomasa se iniciaron en 1999 al incluir el régimen especial 2818/1998 las centrales mixtas de energías renovables

Objetivos básicos hibridación con biomasa:

- Garantizar potencia
- Evitar paradas nocturnas
- Reducir el coste medio de generación

Desarrollo SOL-BIO

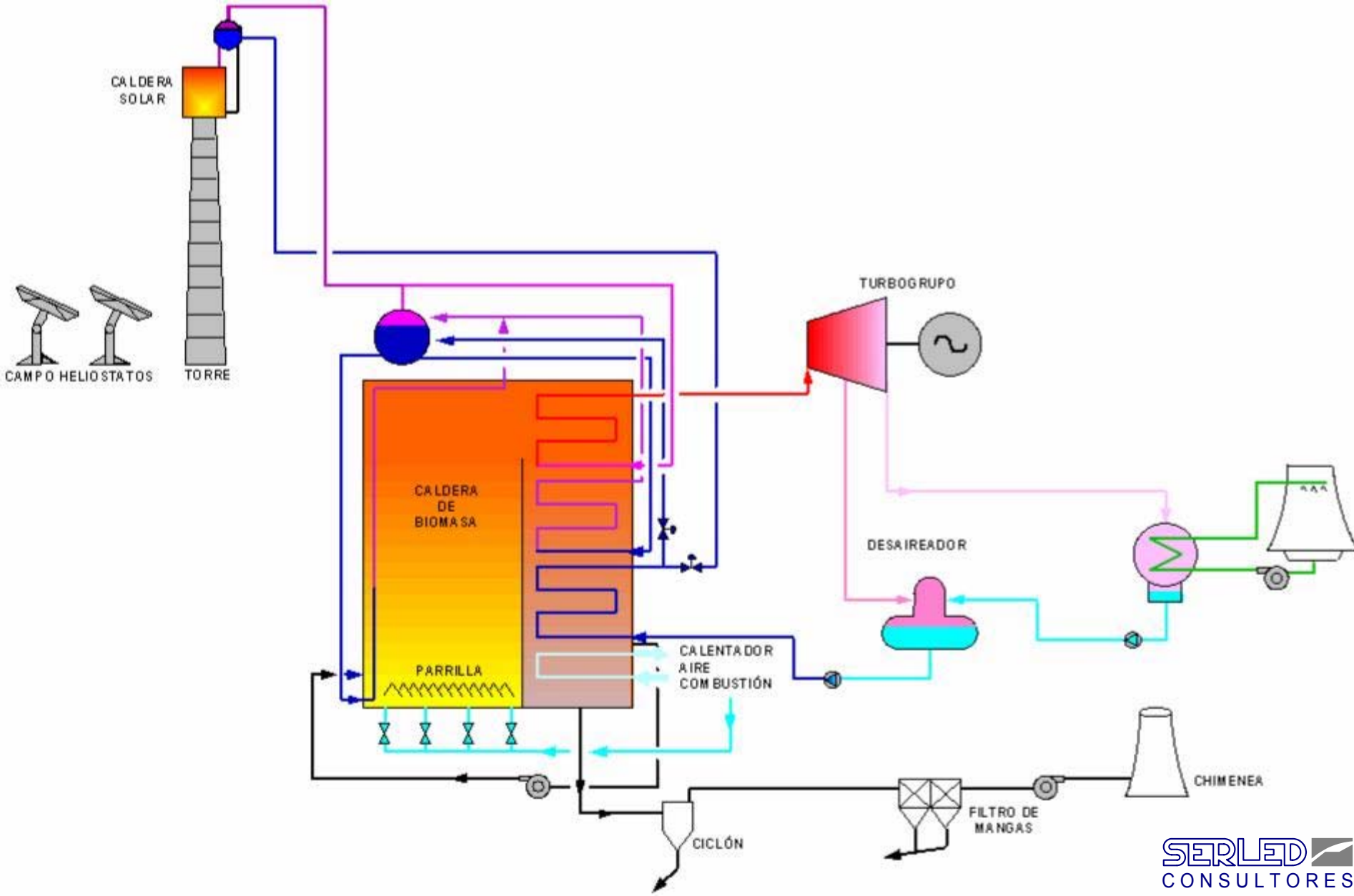
Aplicación analizada inicialmente:

**Planta de 12 MWe en Andalucía con sistema solar de torre central
(Programa Atyca)**

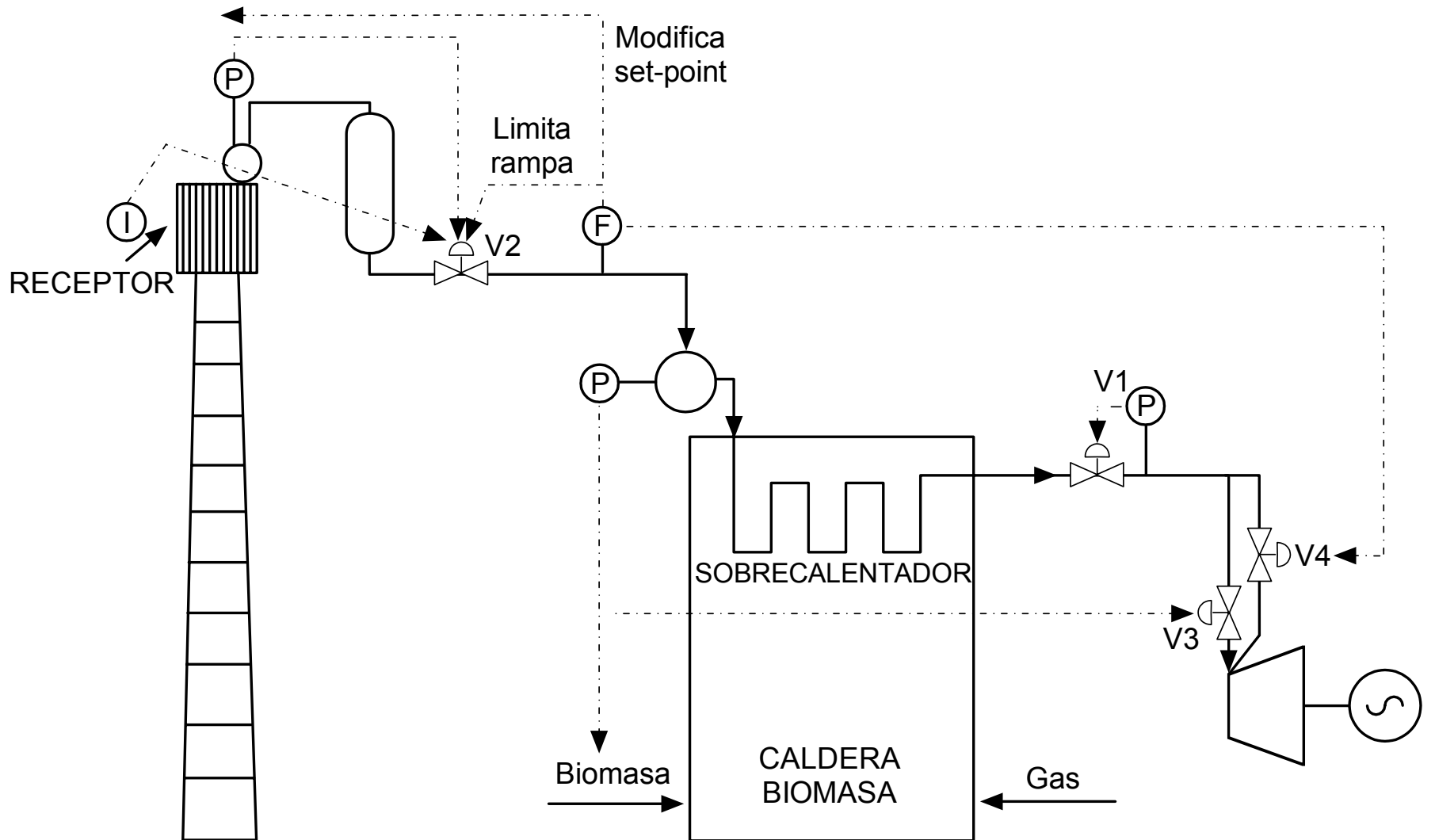
Alternativas analizadas:

- Receptor de vapor saturado
- Receptor volumétrico de aire

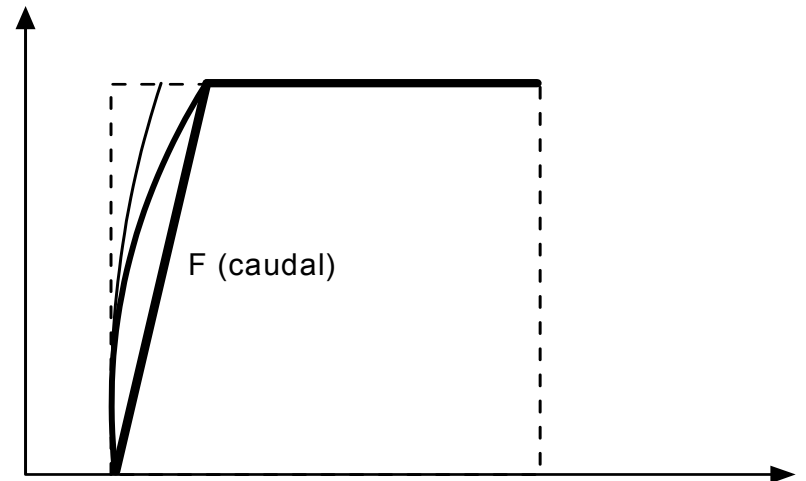
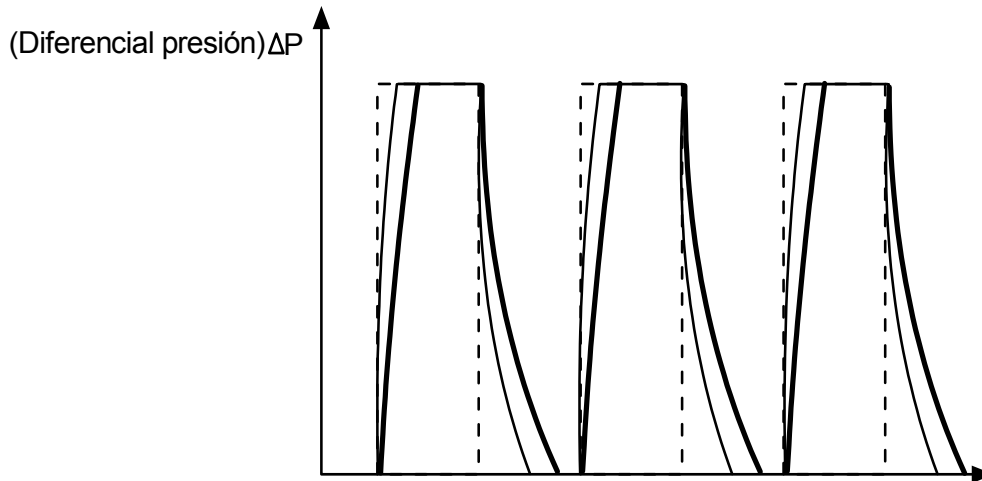
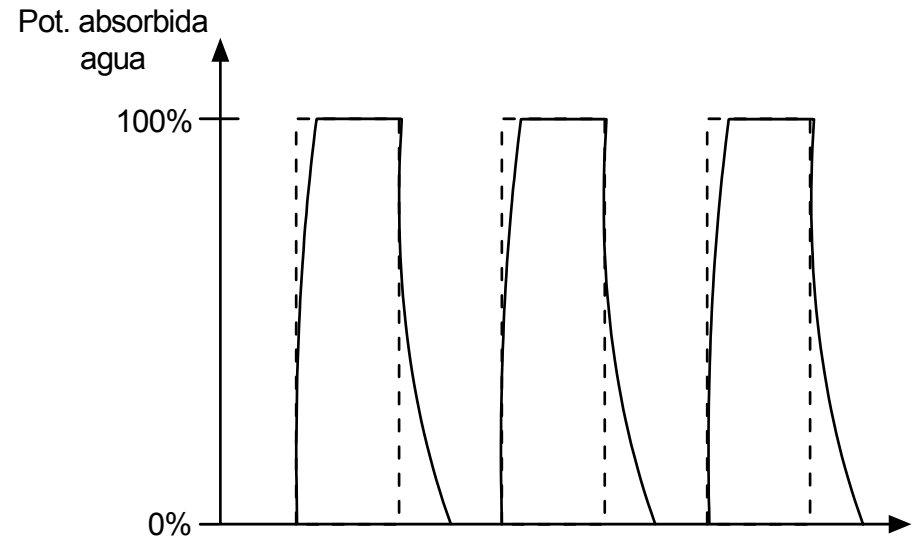
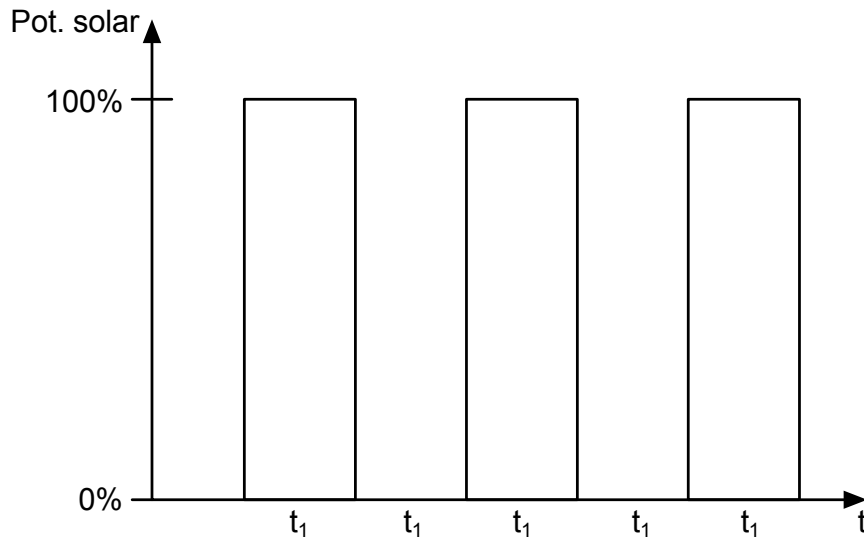
Desarrollo SOL-BIO



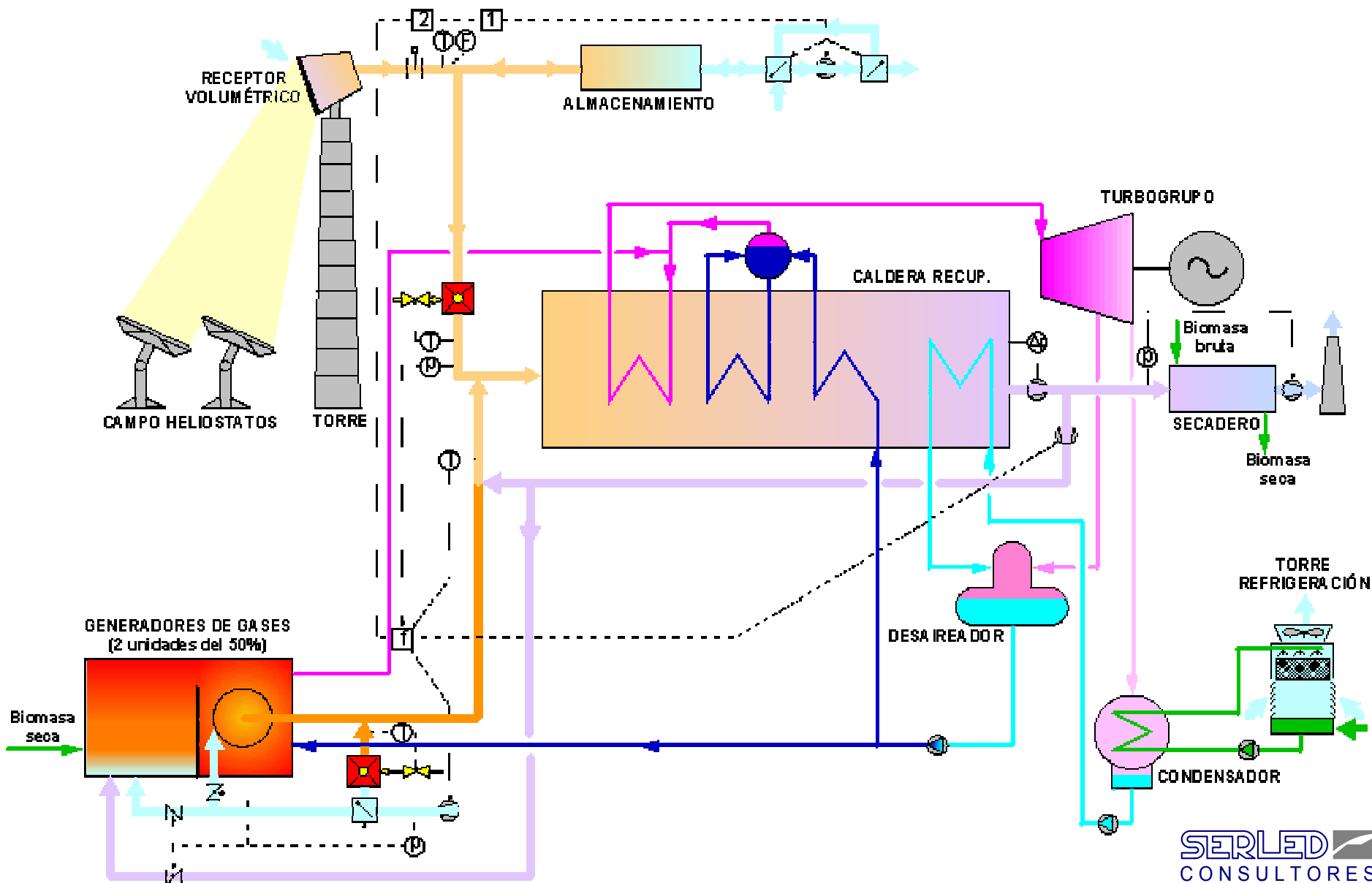
Desarrollo SOL-BIO



Desarrollo SOL-BIO



Desarrollo SOL-BIO



Desarrollo SOL-BIO

Planta solar-biomasa con receptor volumétrico

Resumen resultados balances térmicos en condiciones operativas básicas

Concepto	Planta solar-biomasa			Planta solar	Planta biomasa
	Sólo Biomasa	Solar-Biomasa	Sólo Sol		
Consumo biomasa seca	kg/h	9678	1935	0	8995
Consumo biomasa bruta equiv.	kg/h	10945	2189	0	8995
Potencia biomasa seca PCI	kWt	44457	8889	0	35814
Potencia biomasa bruta equiv. PCI	kWt	43577	8713	0	35814
Biomasa bruta a secadero	kg/h	4846	14925	11067	0
Biomasa seca de secadero	kg/h	4285	13197	9786	0
Potencia secado	kWt	457	1407	1043	0
Potencia solar incidente	kWt	0	76327	76327	76327
Potencia solar absorbida receptor	kWt	0	43980	43980	40910
Potencia solar a caldera	kWt	0	38640	38640	35580
Potencia solar a almacenamiento	kWt	0	5340	5340	5340
Potencia absorbida ciclo	kWt	41205	41389	33464	35580
Potencia eléctrica bruta	kWe	12855	12855	10393	11000
Potencia consumida en auxiliares	kWe	1157	1157	935	1000
Potencia eléctrica neta	kWe	11698	11698	9457	10000
Rendimiento bruto ciclo	%	31.2%	31.1%	31.1%	30.9%
Rendimiento neto ciclo	%	28.4%	28.3%	28.3%	28.1%
Rendimiento bruto planta ¹	%	29.2%	27.9%	27.6%	30.9%
Rendimiento neto planta ¹	%	26.6%	25.4%	25.2%	28.1%
Rendimiento bruto planta ²	%	29.2%	15.3%	13.8%	14.4%
Rendimiento neto planta ²	%	26.6%	14.0%	12.6%	13.1%
Potencia eléctrica bruta solar	kWe	0	10258	10393	11000
Participación solar	%	0.0%	79.8%	100.0%	100.0%

¹ Referido a potencia solar aportada a caldera más potencia térmica PCI biomasa seca menos potencia térmica secado

² Referido a potencia solar incidente más potencia térmica PCI biomasa seca menos potencia térmica secado

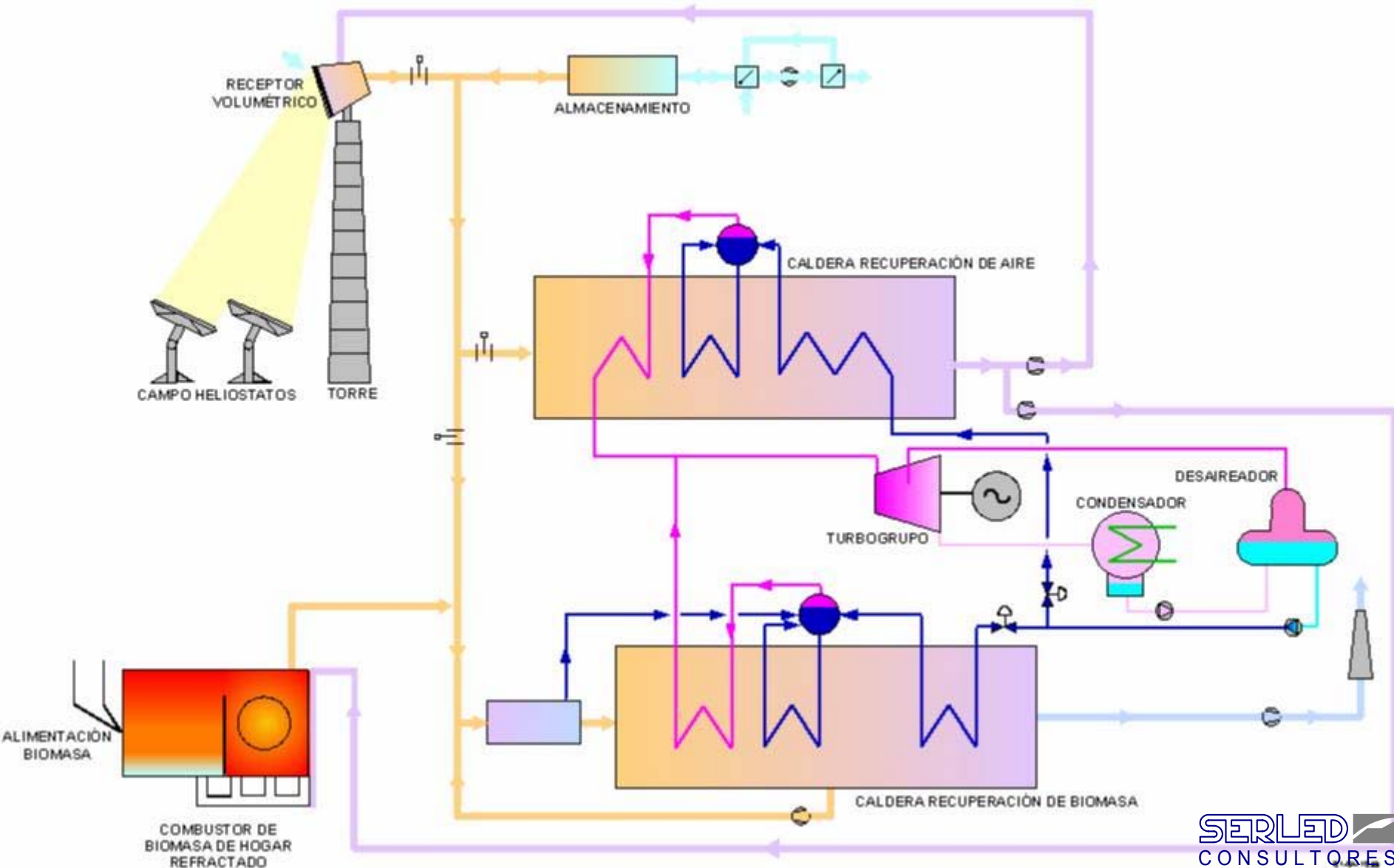
Desarrollo SOL-BIO

Conclusiones técnico-económicas:

- Alternativa de receptor volumétrico técnicamente más favorable, por mejor almacenamiento térmico y regulación de transitorios solares
- Participación solar, dependiendo del régimen de operación seleccionado, entre el 22% y el 33%
- Falta de viabilidad económica con las primas

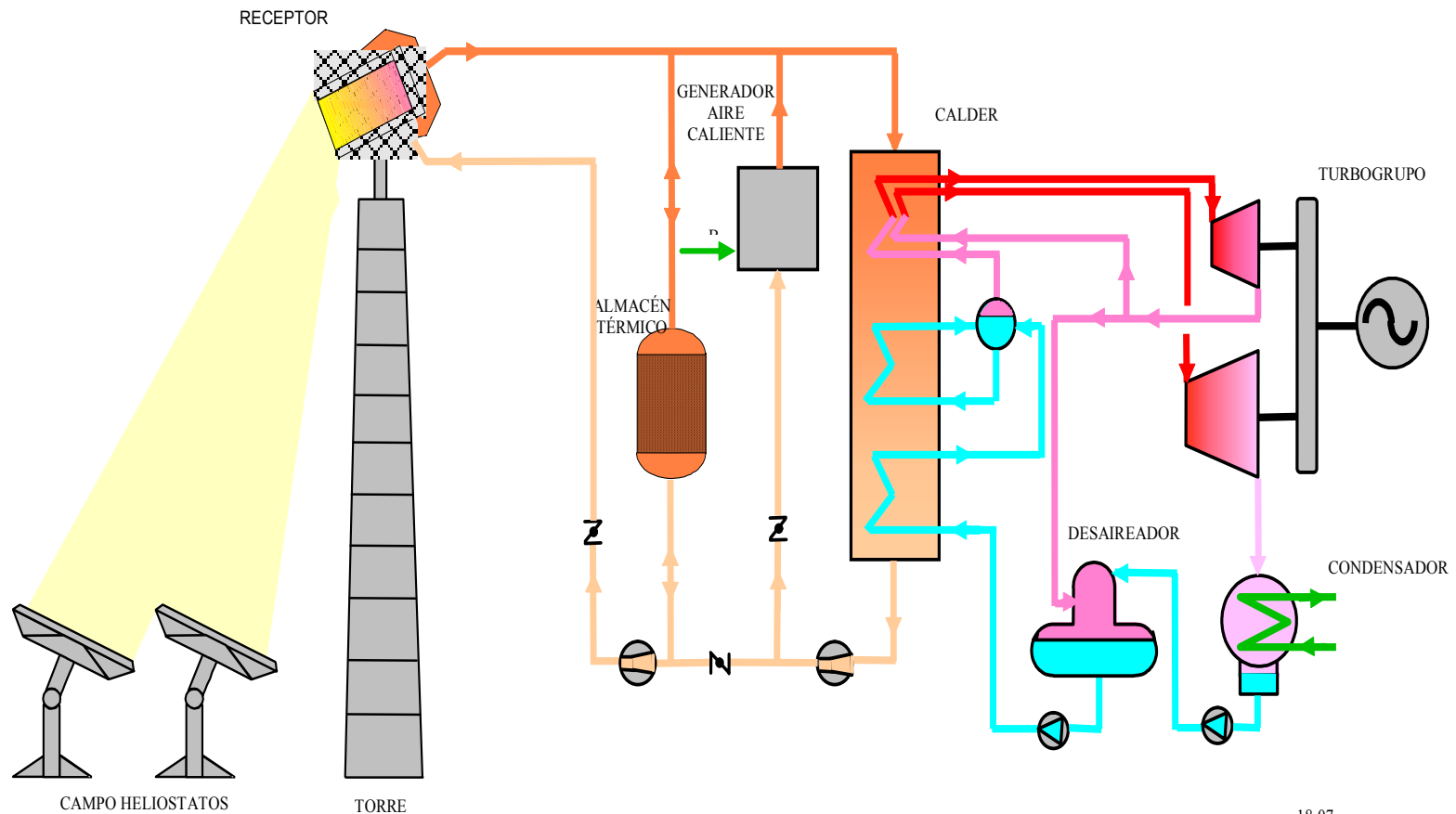
A la espera del previsto incremento de las primas para la energía solar termoeléctrica se siguieron acometiendo proyectos de desarrollo de este concepto de plantas mixtas

Desarrollo SOL-BIO



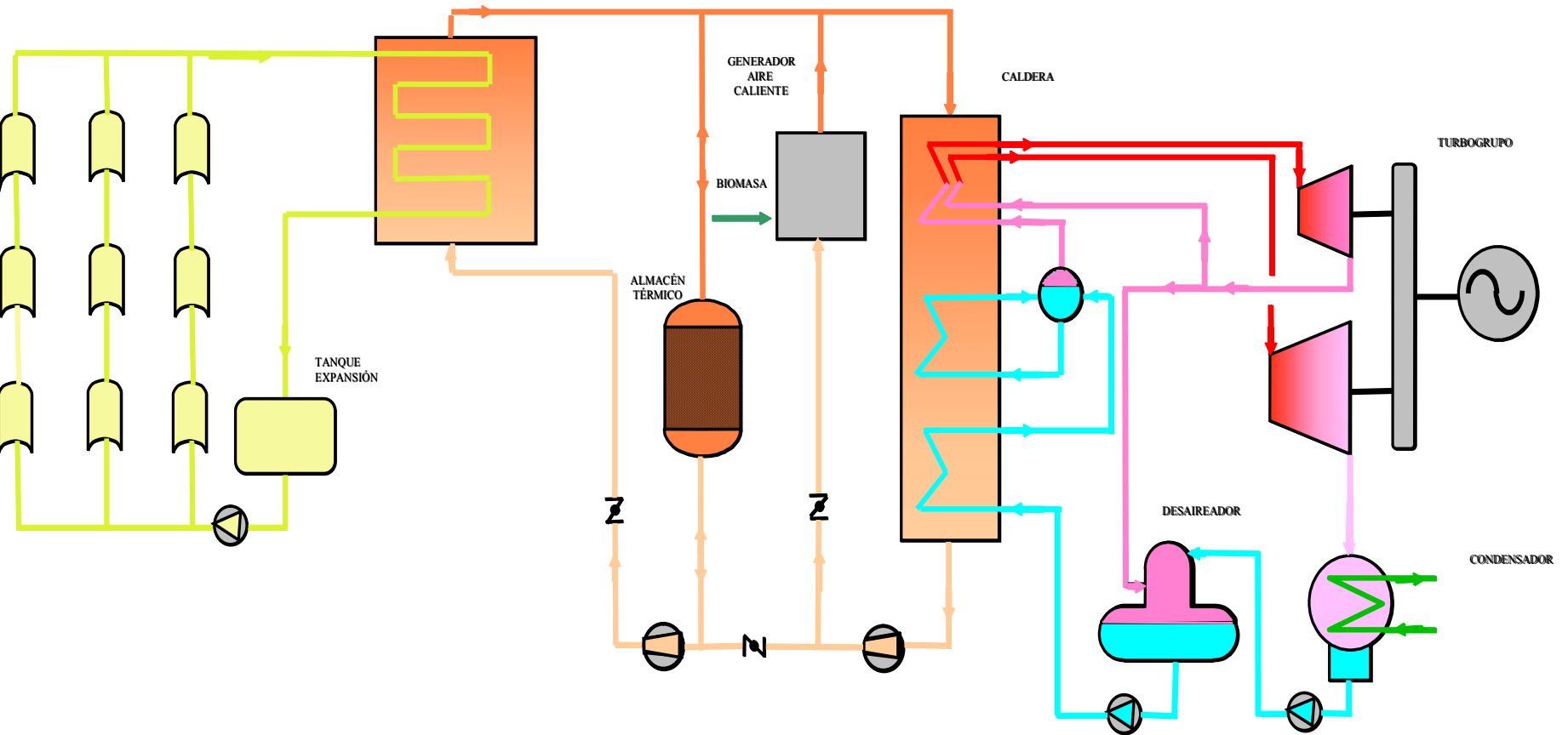
Desarrollo SOL-BIO

Concepto SOLPRO – Torre central

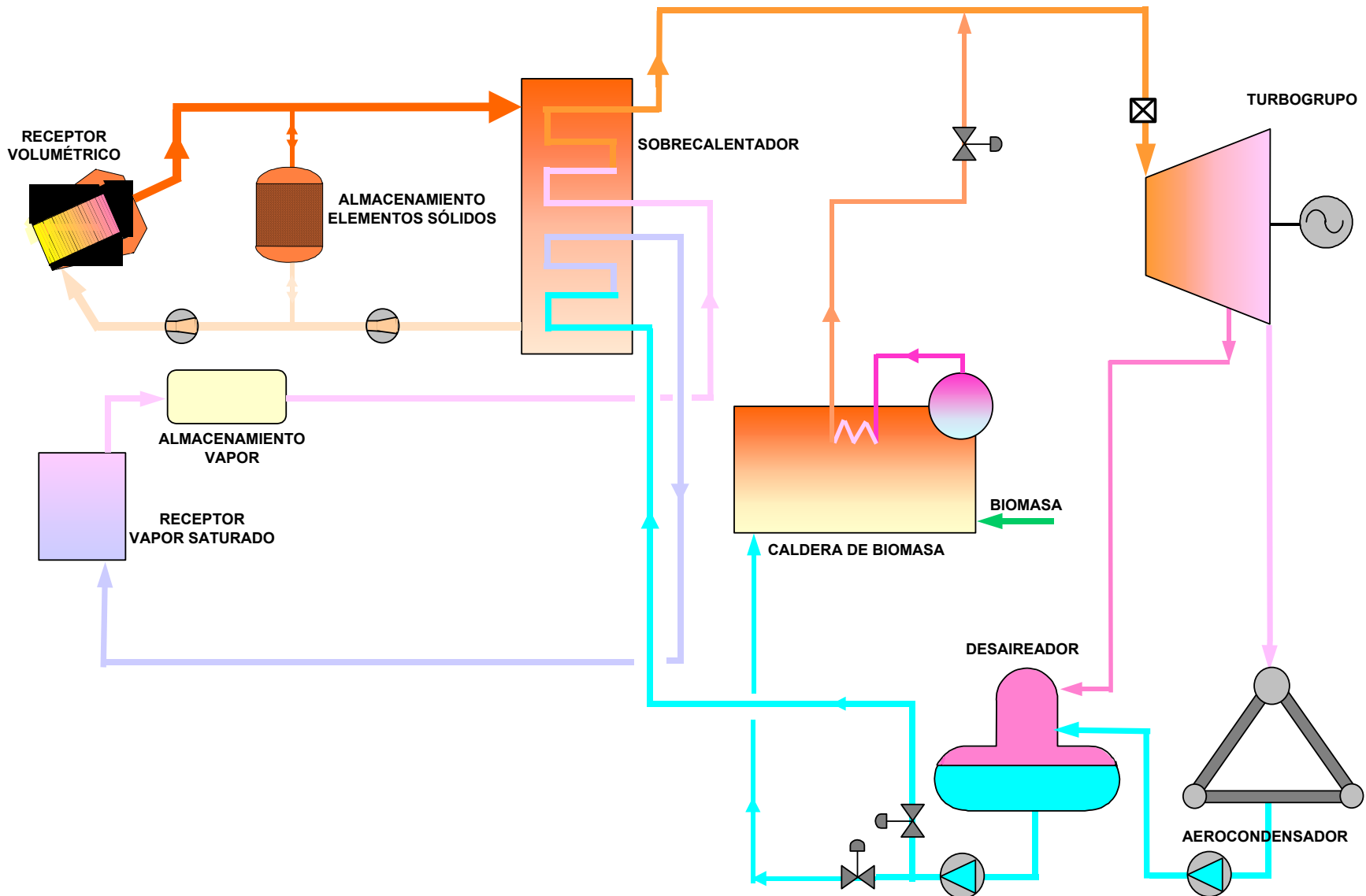


Desarrollo SOL-BIO

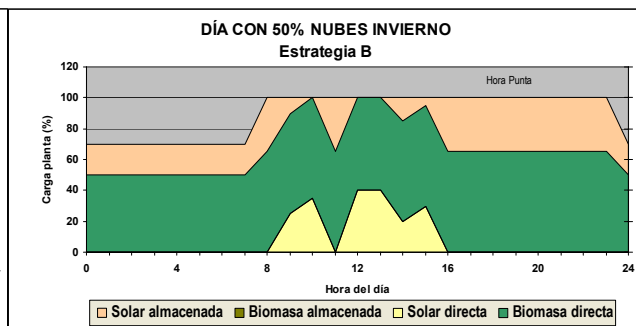
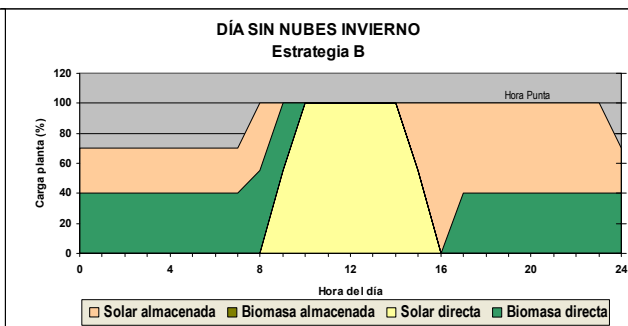
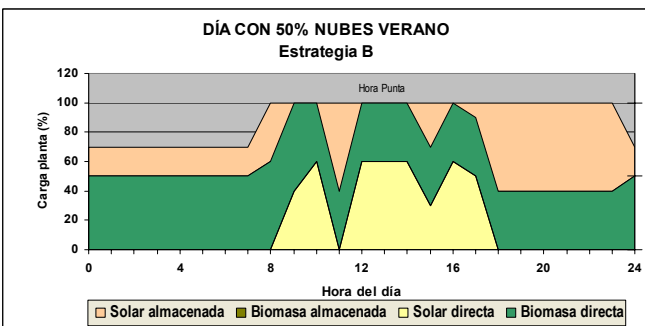
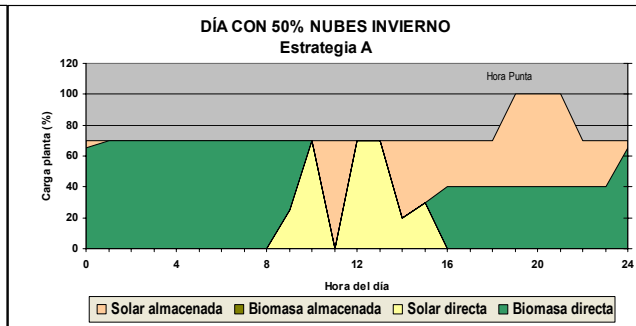
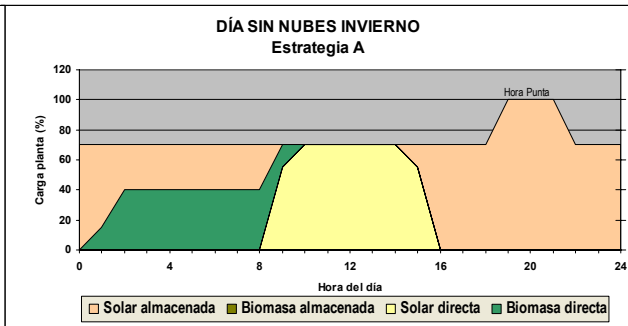
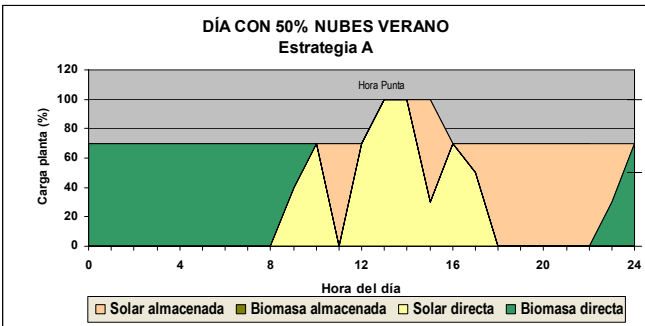
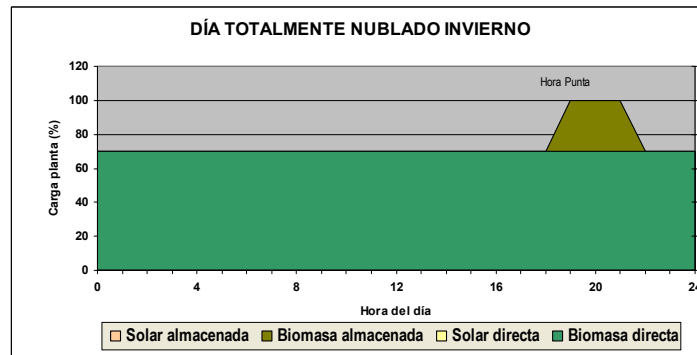
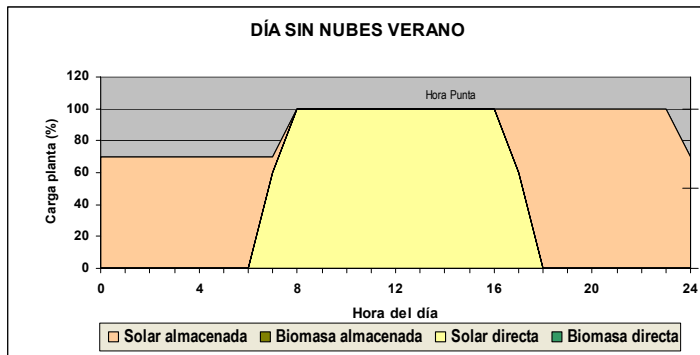
Concepto SOLPRO – Colectores distribuidos



Desarrollo SOL-BIO



Desarrollo SOL-BIO



Desarrollo SOL-BIO

Las plantas mixtas solar termoeléctrica–biomasa constituyen una excelente oportunidad para mejorar la despachabilidad de la generación solar sin perder su carácter totalmente renovable

El previsto incremento de las primas a la generación solar termoeléctrica vino acompañado de la inesperada eliminación de las centrales renovables mixtas del régimen especial (Decreto 436/2004) por lo que actualmente no pueden plantearse proyectos de este tipo.

Se confía en la próxima reintroducción de este tipo de centrales mixtas totalmente renovables en el régimen especial de generación

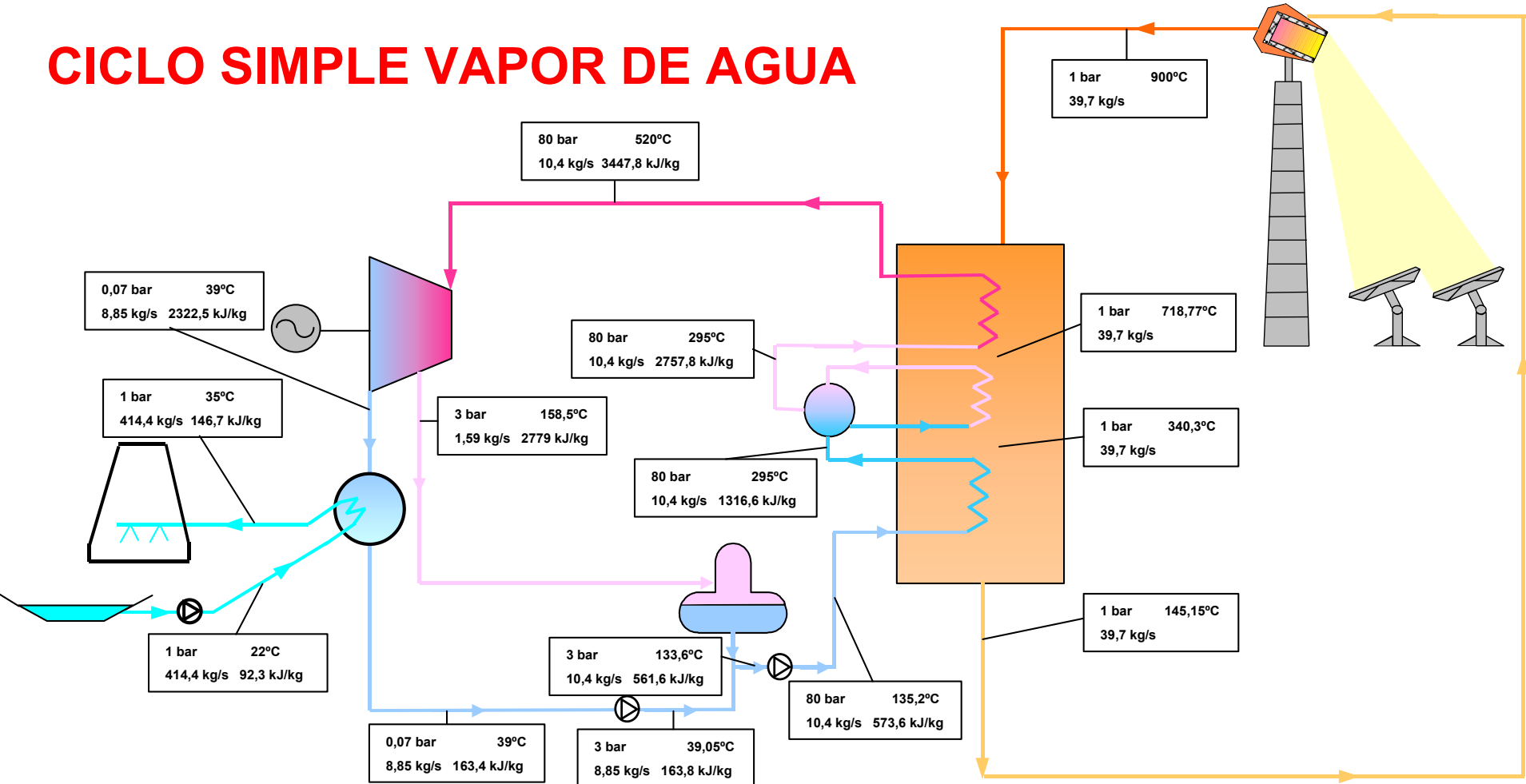
Desarrollo SOLAIR

**Proyecto de cooperación internacional apoyado por la UE
Receptor solar volumétrico de aire avanzado para
plantas solares comerciales de torre central**

- Generación de aire caliente atmosférico a temperaturas hasta de 900°C
- Participación Serled: Definición de los esquemas de ciclos térmicos de alta eficiencia más favorables

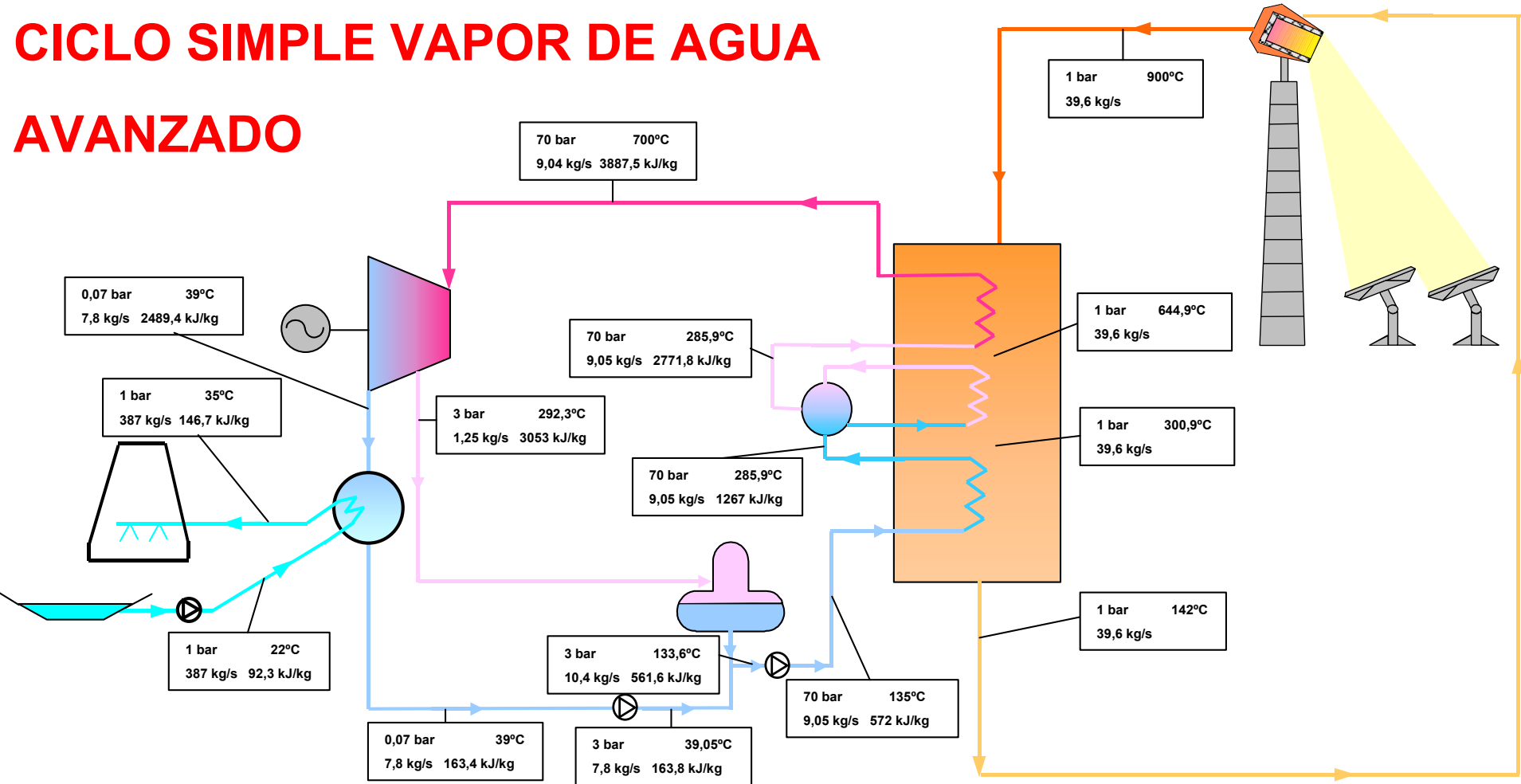
Desarrollo SOLAIR

CICLO SIMPLE VAPOR DE AGUA



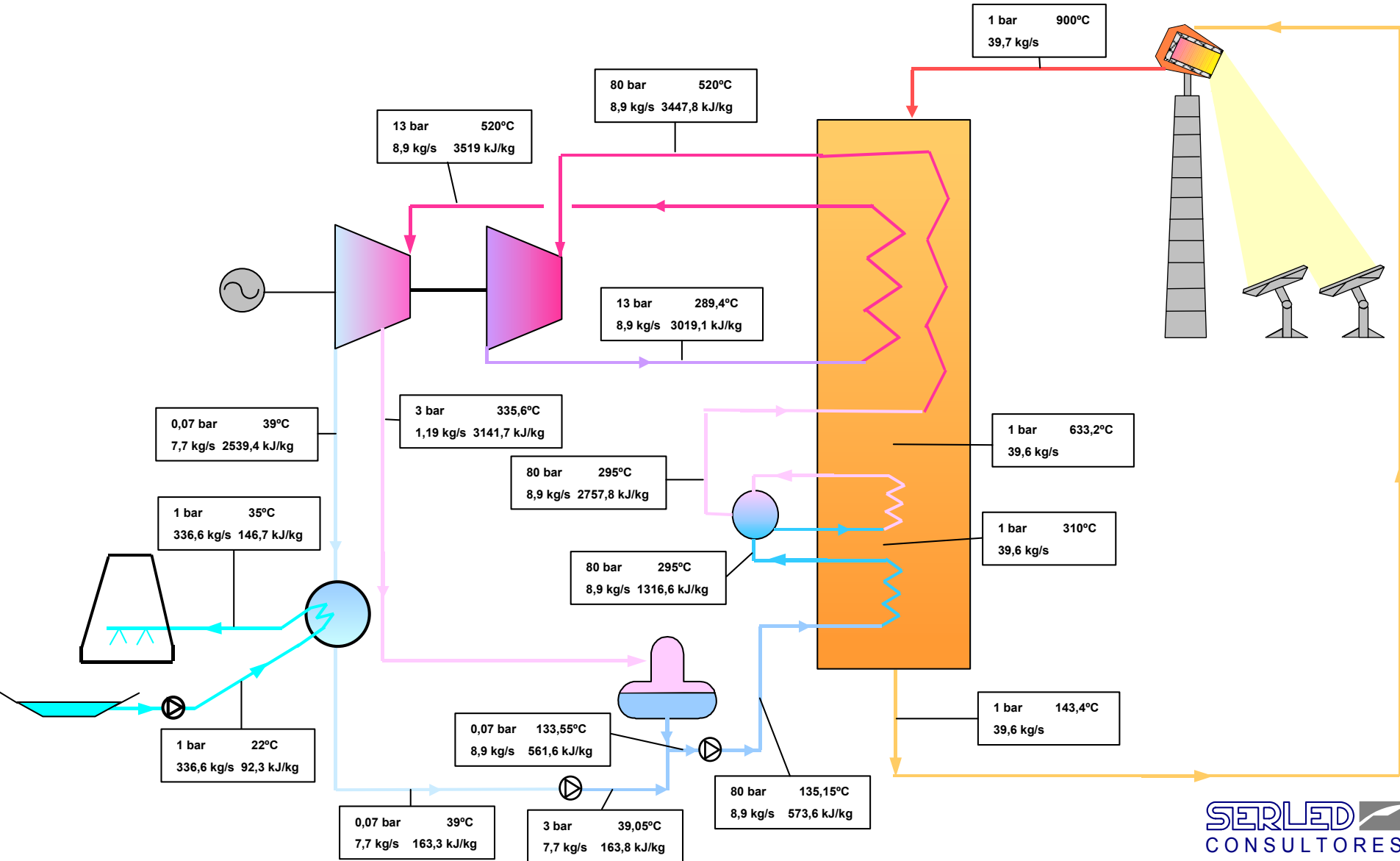
Desarrollo SOLAIR

CICLO SIMPLE VAPOR DE AGUA AVANZADO

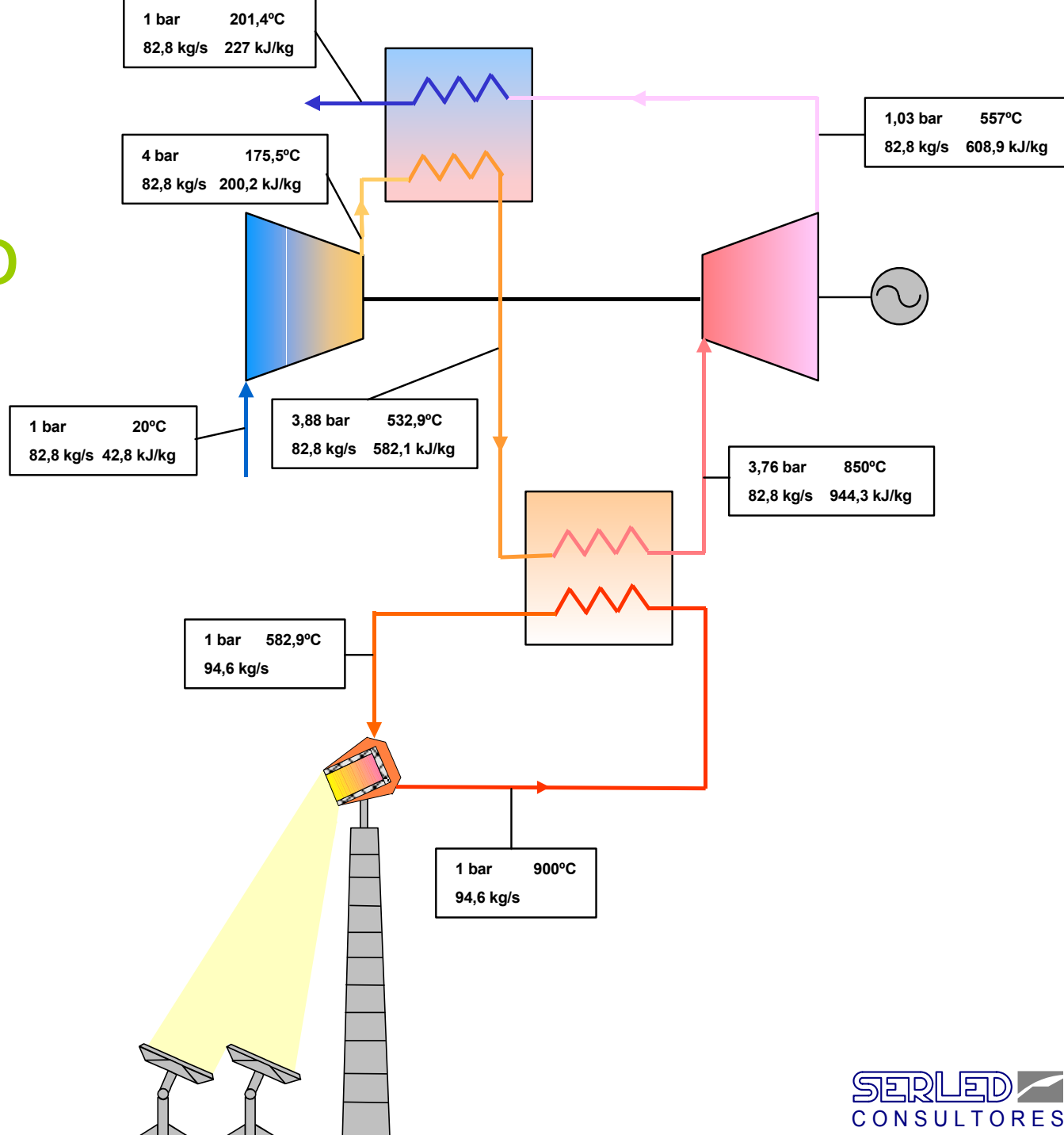


Desarrollo SOLAIR

CICLO VAPOR DE AGUA CON RECALENTAMIENTO

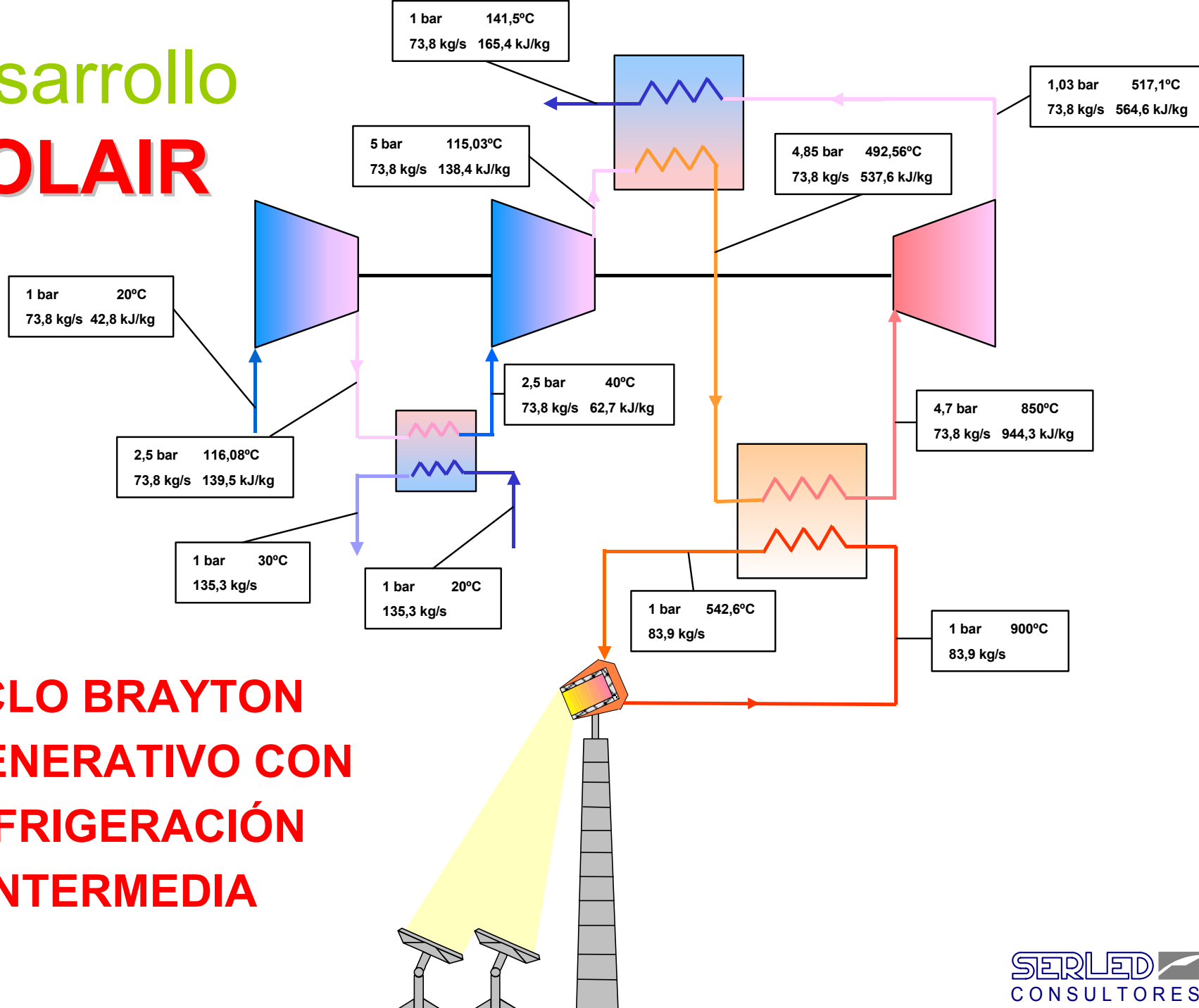


Desarrollo SOLAIR



CICLO BRAYTON REGENERATIVO

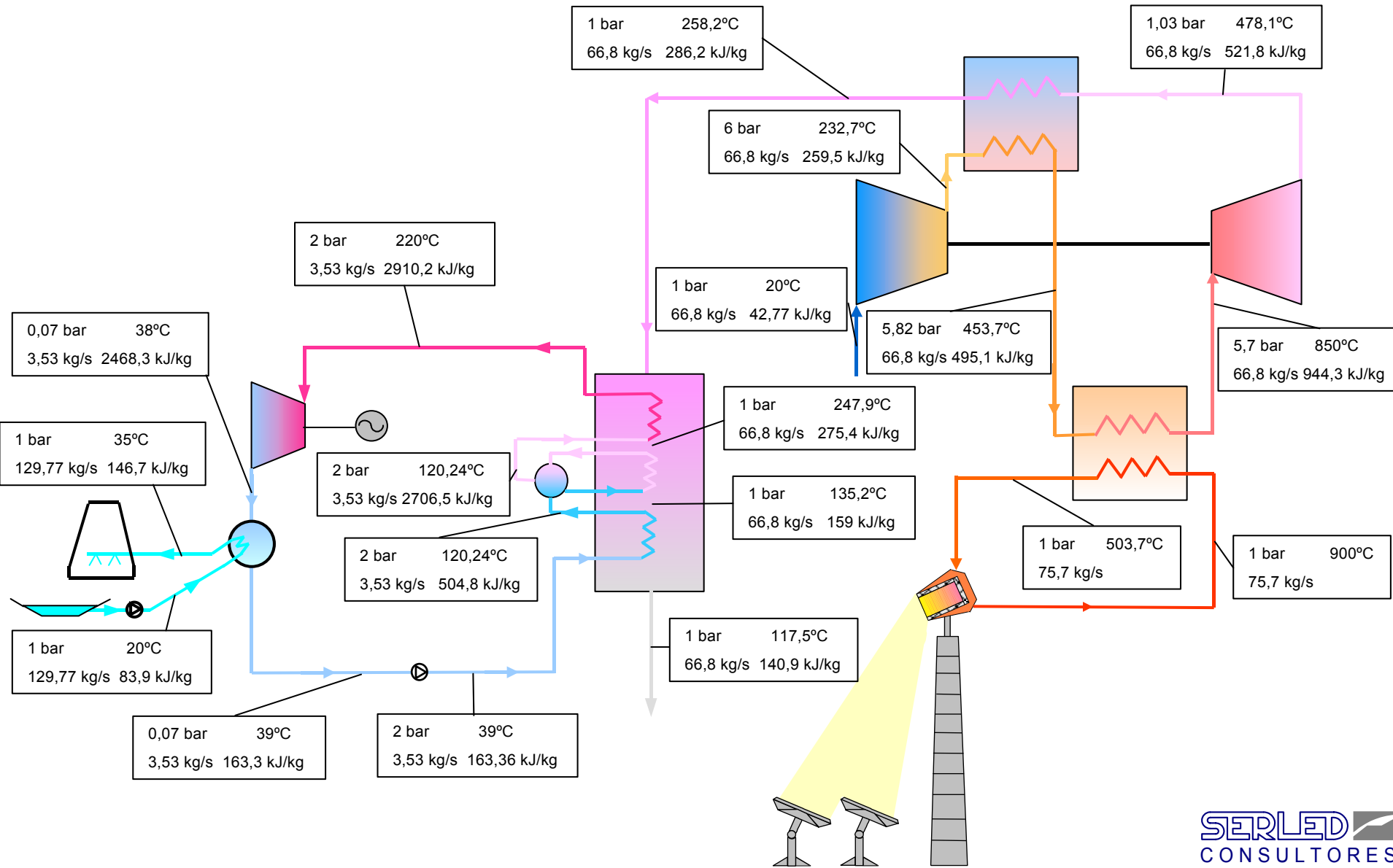
Desarrollo SOLAIR



CICLO BRAYTON REGENERATIVO CON REFRIGERACIÓN INTERMEDIA

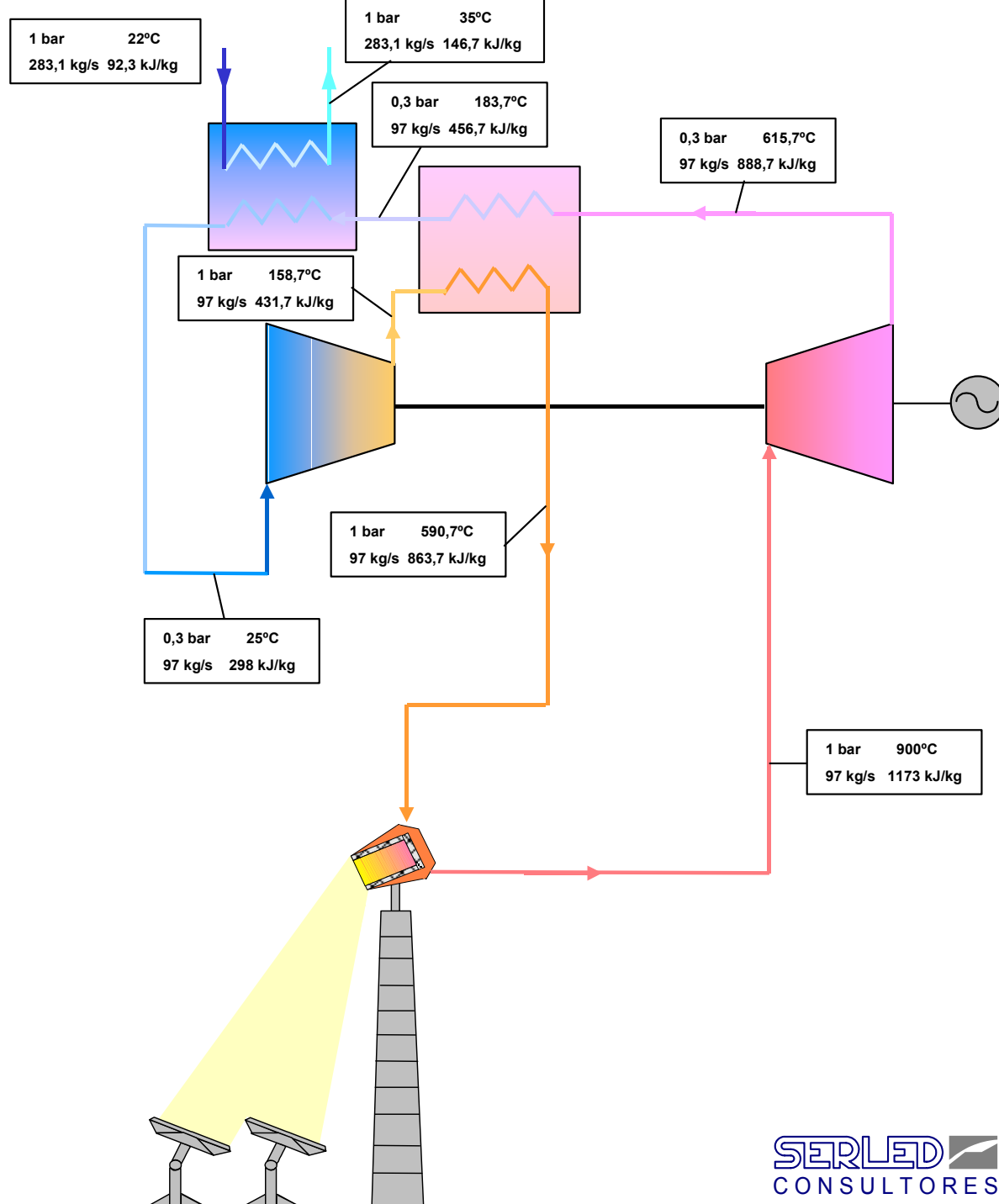
Desarrollo SOLAIR

CICLO COMBINADO REGENERATIVO

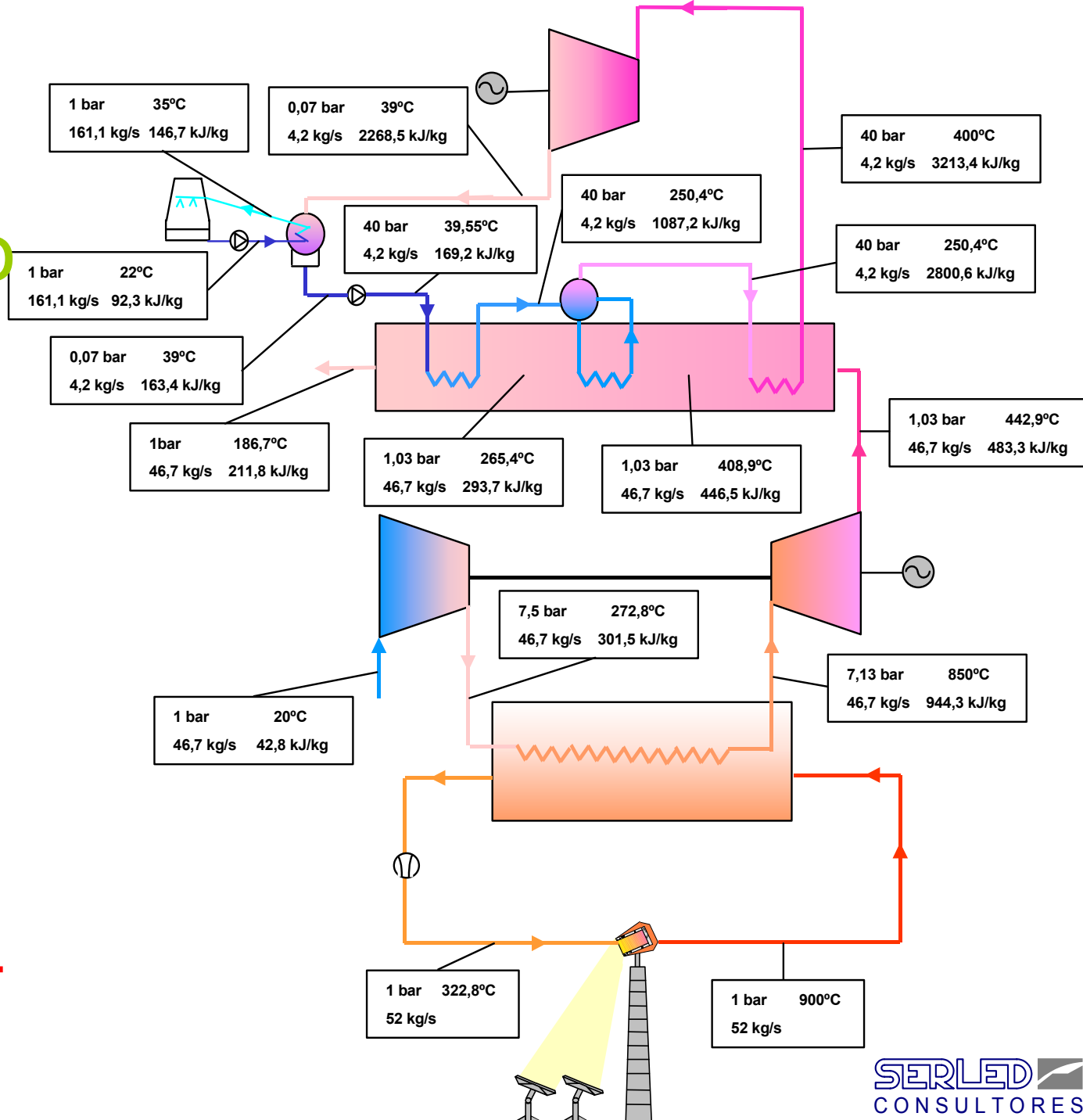


Desarrollo SOLAIR

CICLO BRAYTON INVERSO REGENERATIVO



Desarrollo SOLAIR

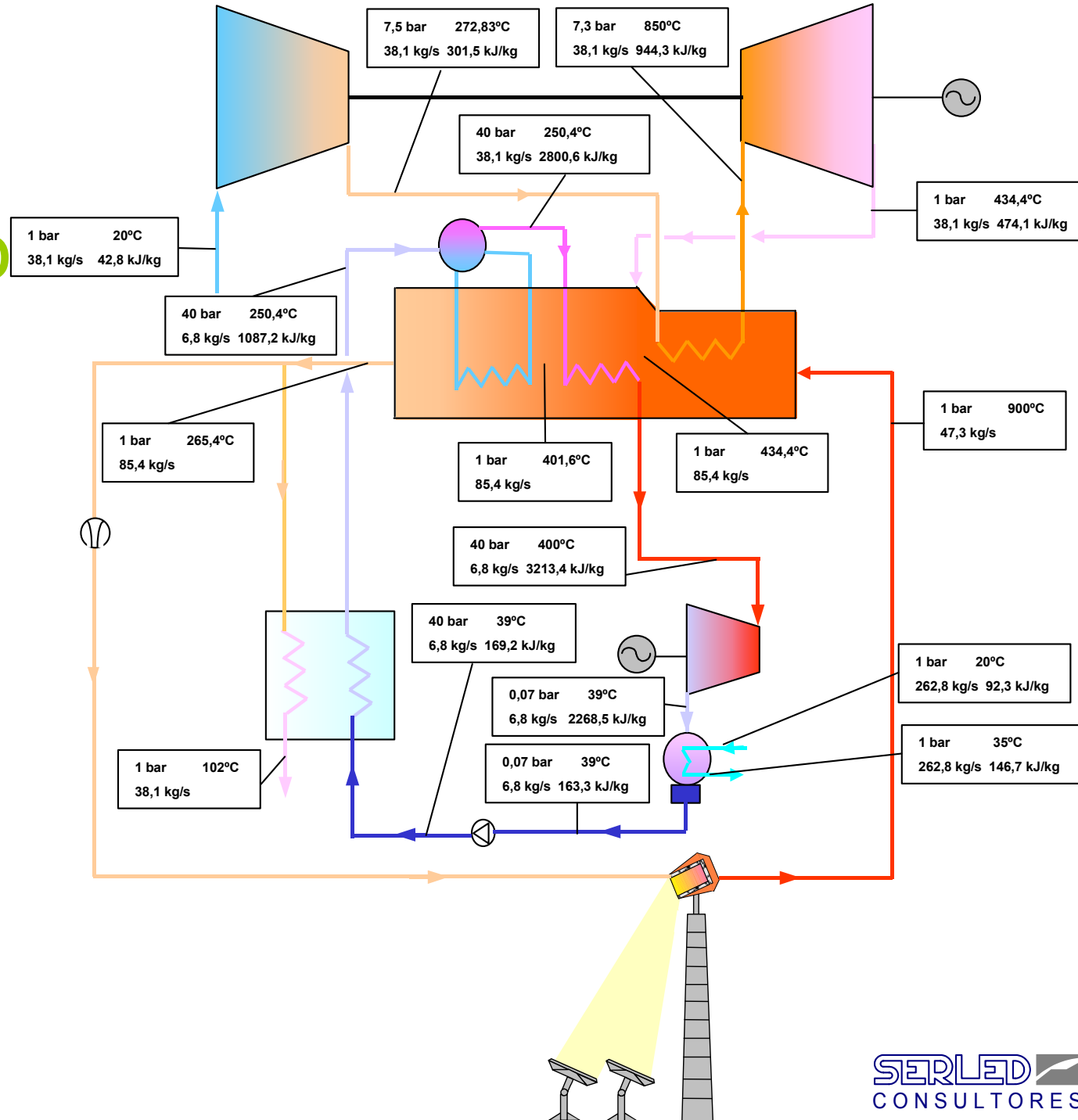


CICLO COMBINADO CONVENCIONAL

Desarrollo SOLAIR

CICLO COMBINADO ESPECIAL

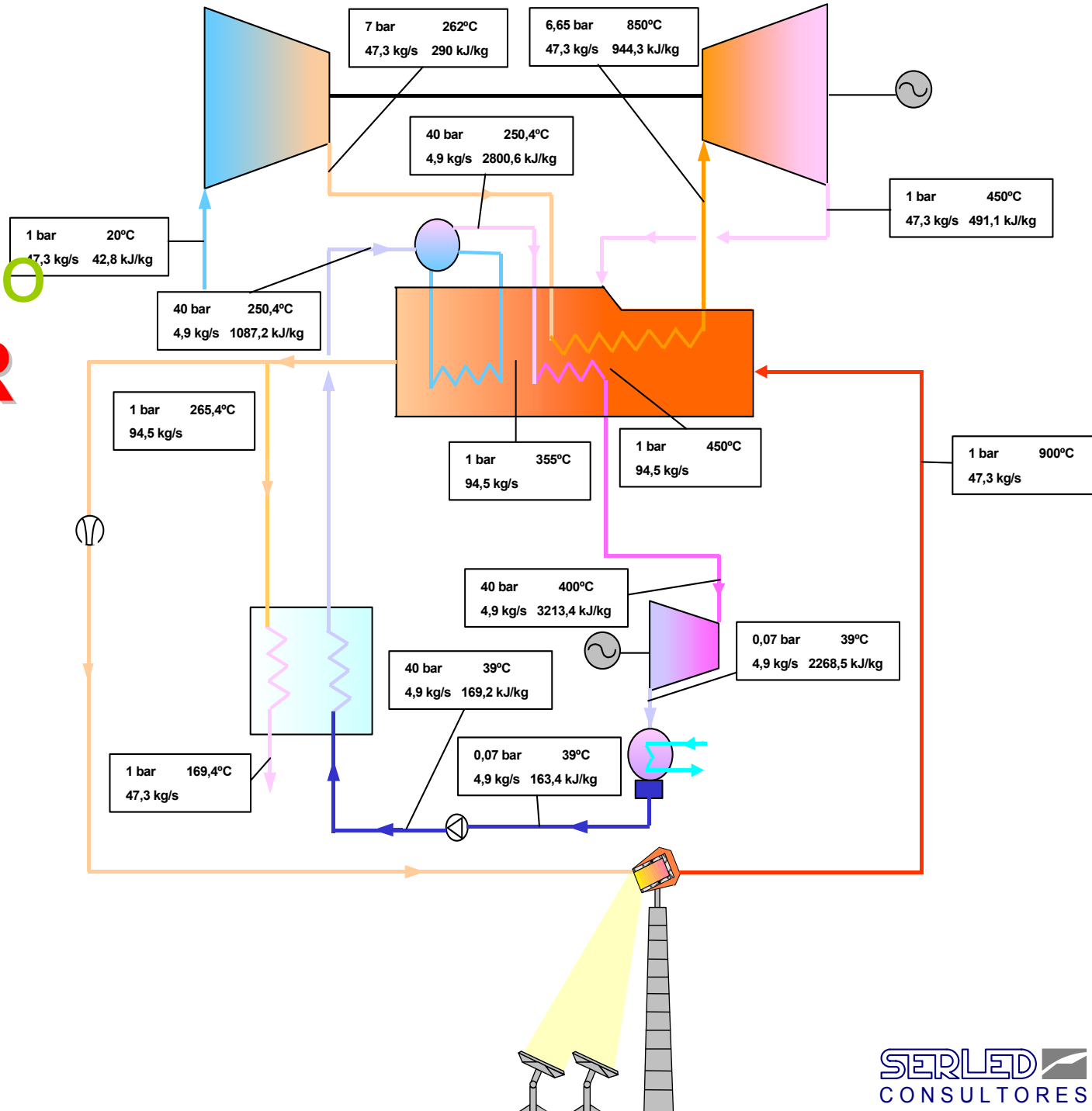
Opción A



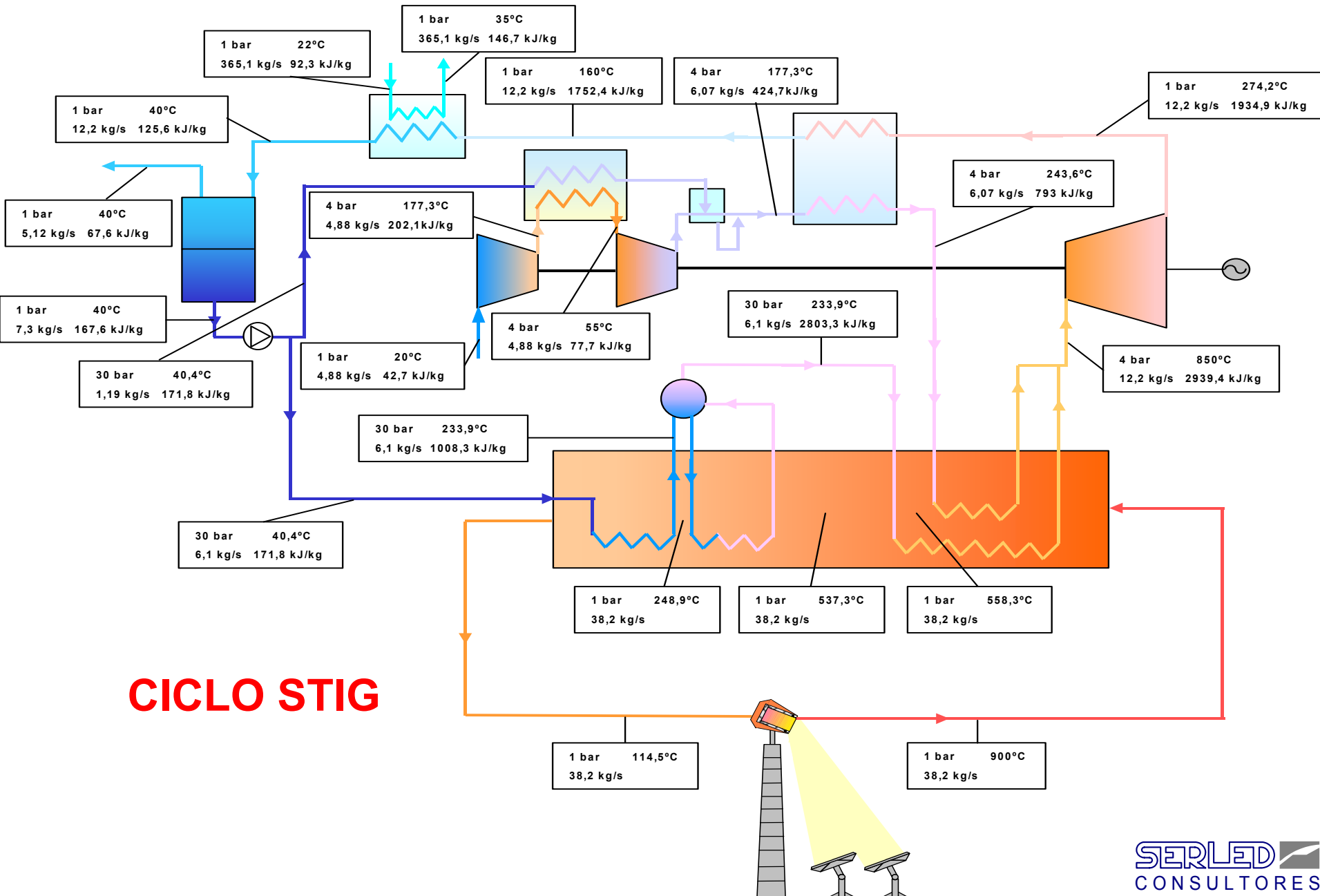
Desarrollo SOLAIR

CICLO COMBINADO ESPECIAL

Opción B



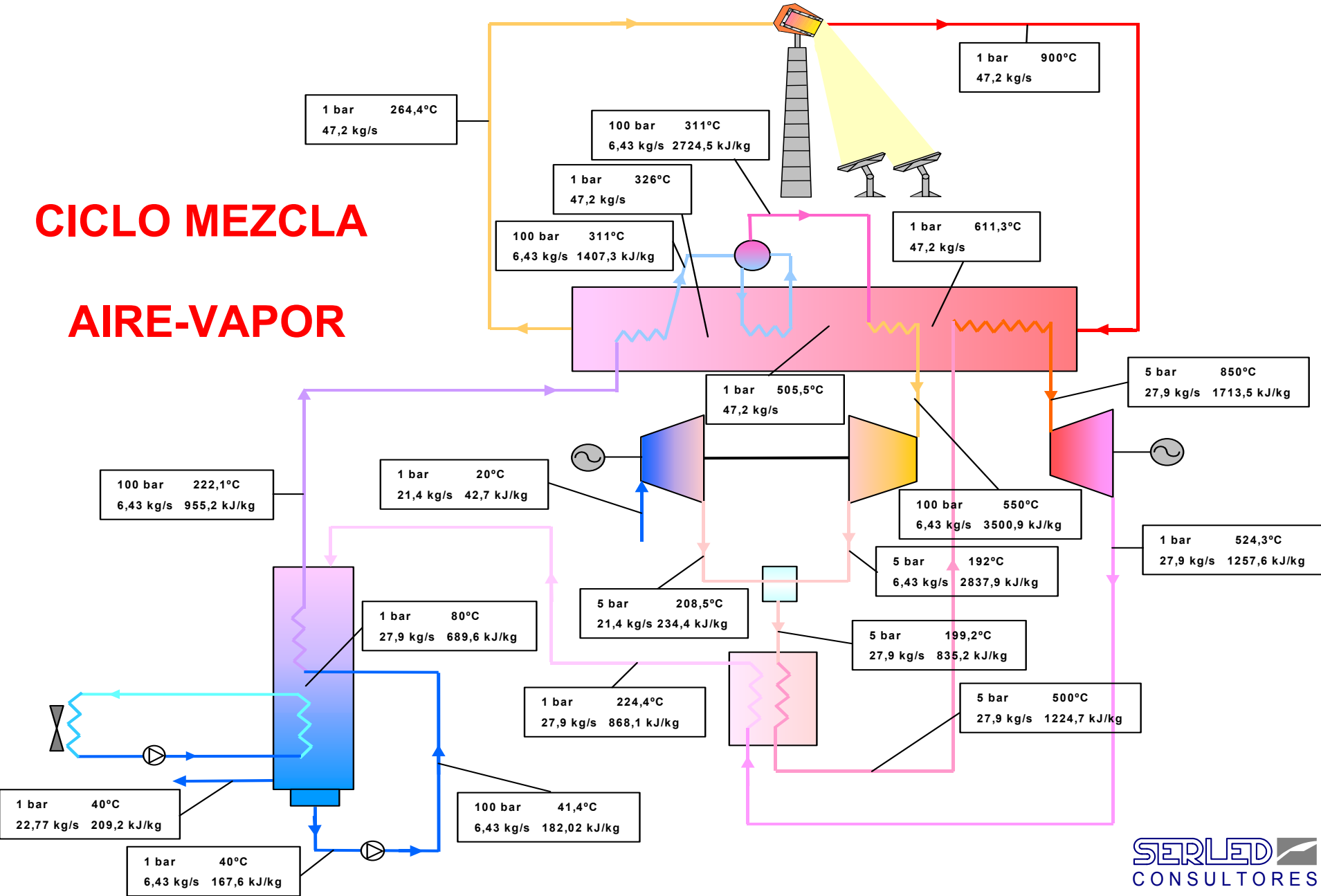
Desarrollo SOLAIR



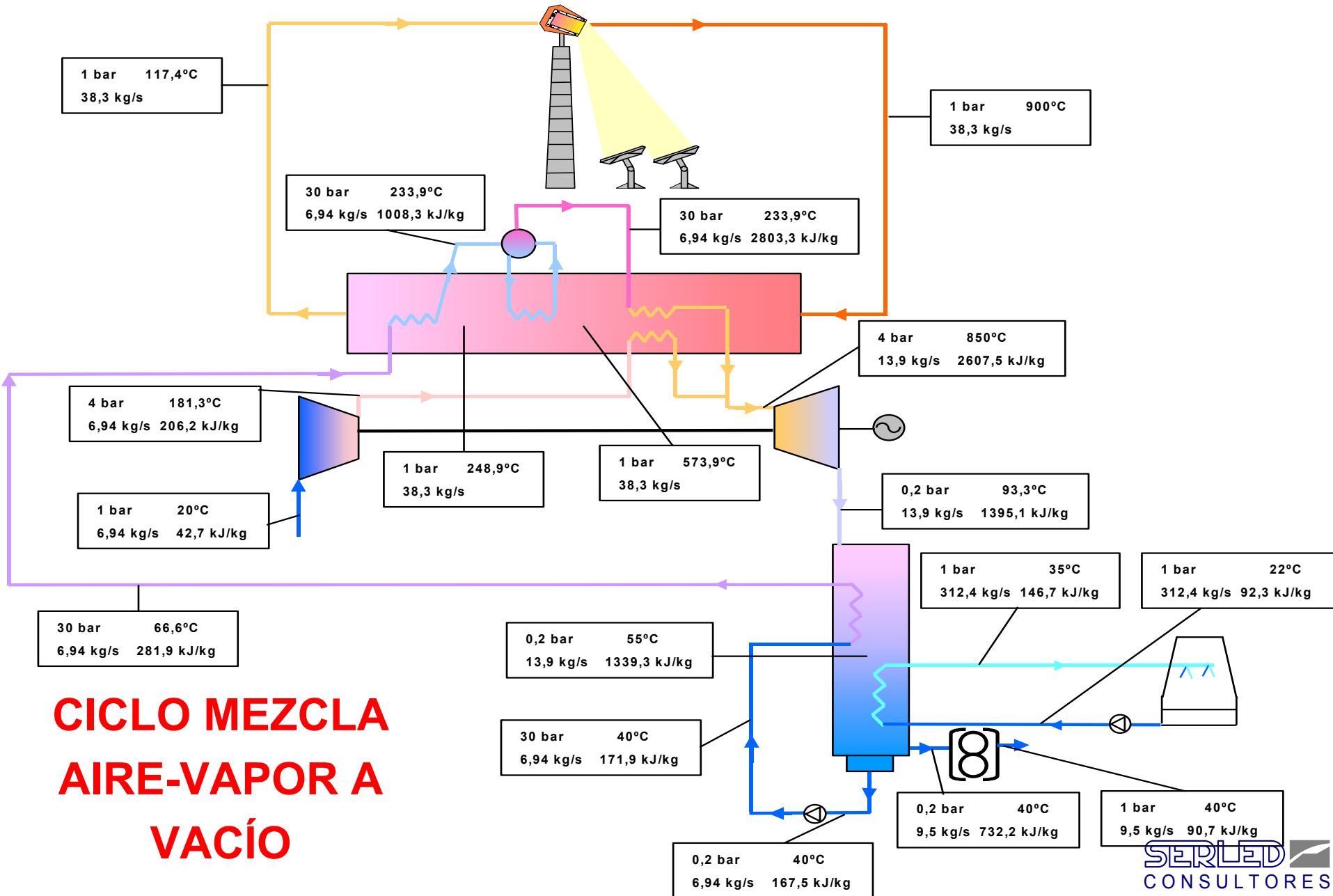
Desarrollo SOLAIR

CICLO MEZCLA

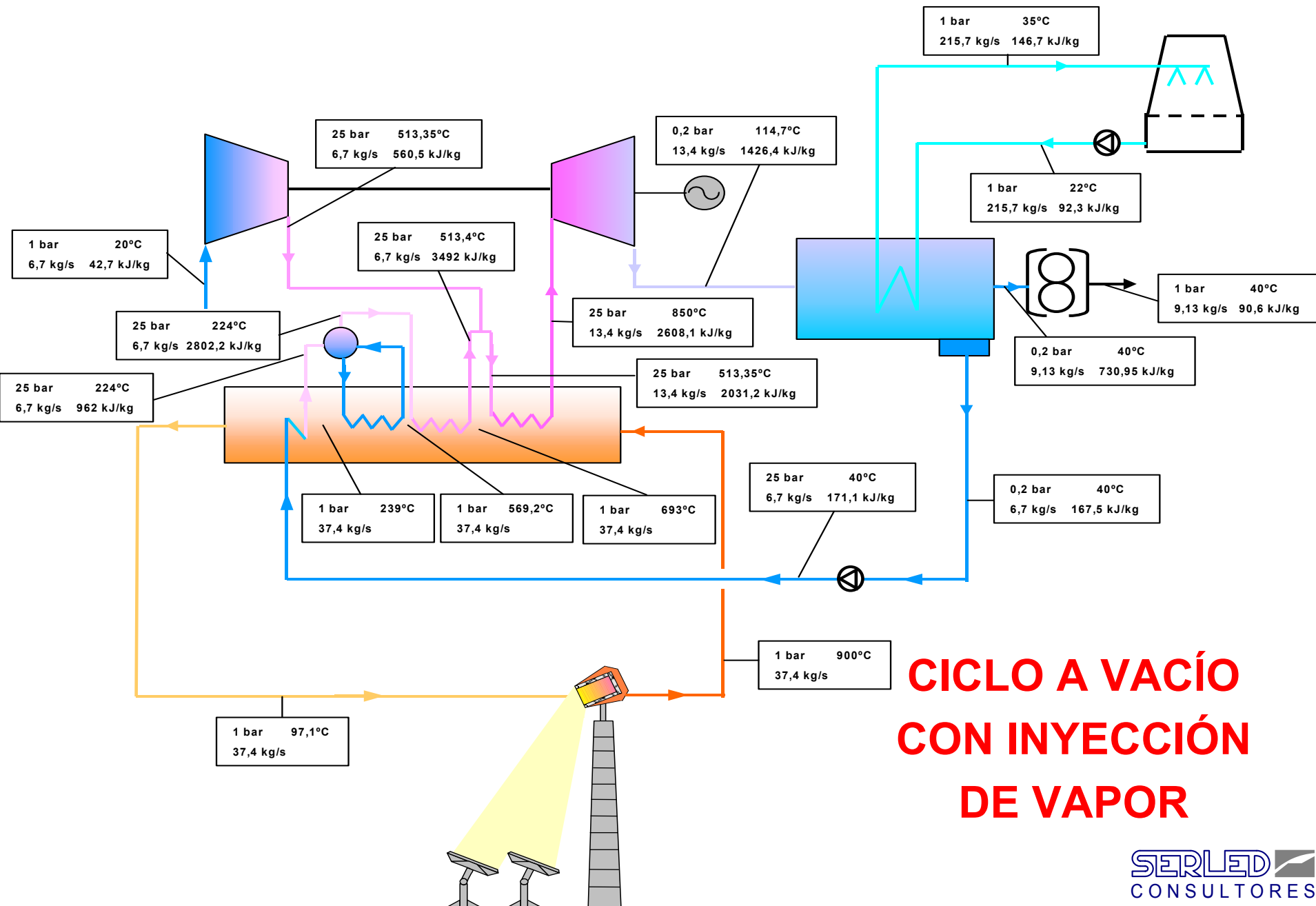
AIRE-VAPOR



Desarrollo SOLAIR

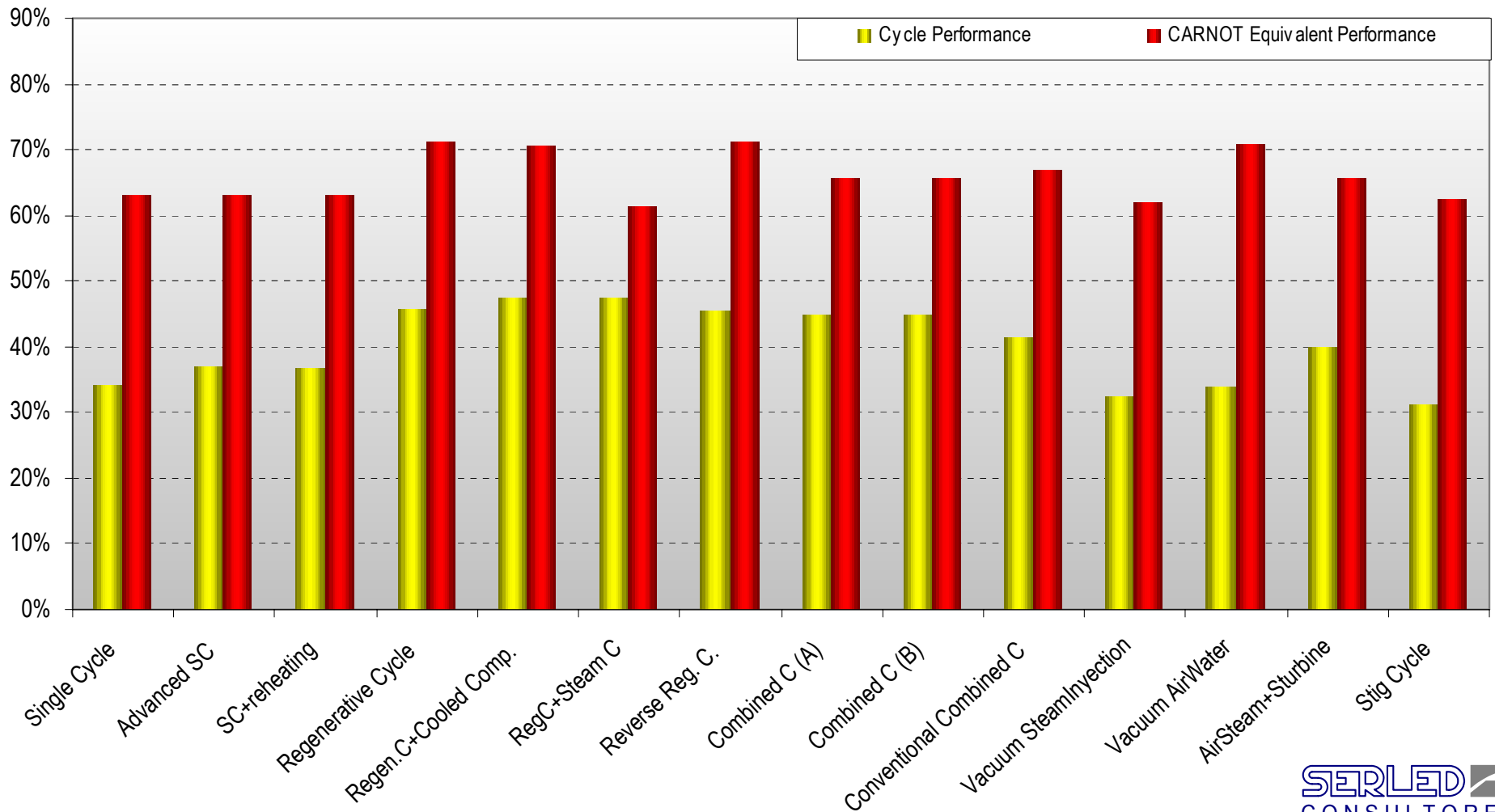


Desarrollo SOLAIR



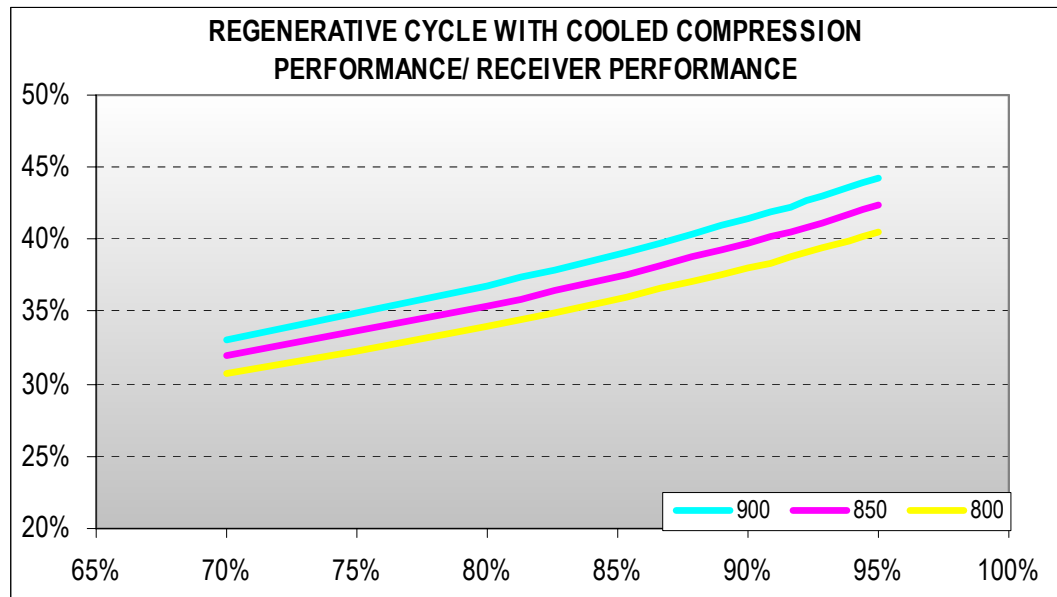
Desarrollo SOLAIR

Esquemas más favorables: ciclos regenerativos y combinados



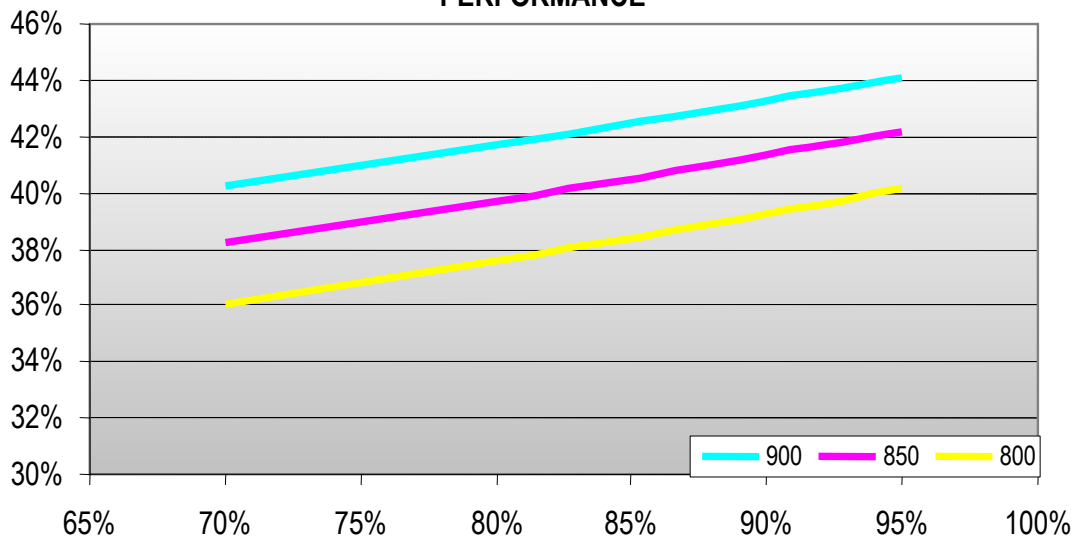
Desarrollo **SOLAIR**

CICLO BRAYTON REGENERATIVO CON REFRIGERACIÓN INTERMEDIA



CICLO COMBINADO ESPECIAL – Opción A

**COMBINED CYCLE OPTION A PERMANDE/RECEIVER
PERFORMANCE**



Desarrollo SOLAIR

		DISADVANTAGES	ADVANTAGES	
REGENERATIVE CYCLES	Small Power	<ul style="list-style-type: none"> - Regenerative exchangers - High return temperature 	<ul style="list-style-type: none"> - High Performance - Simplicity 	REGENERATIVE CYCLE WITH COOLED COMPRESSION
COMBINED CYCLES	High Power	<ul style="list-style-type: none"> - High thermal operating inertia - Low performance of large solar field 	<ul style="list-style-type: none"> - Commercial equipment - Low technical risk 	COMBINED CYCLE OPTION A

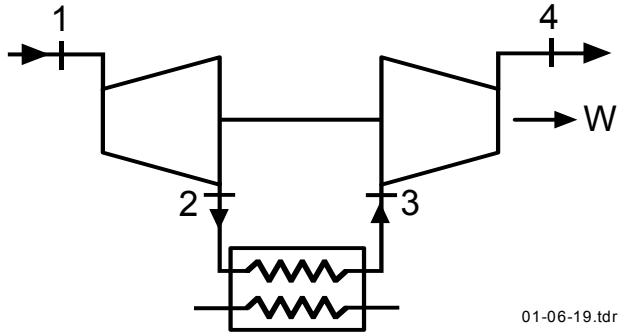
La tecnología SOLAIR requiere de más trabajos de desarrollo, tanto en el área del receptor de alta temperatura como en el de los ciclos térmicos óptimos antes de poder pasar a una etapa de demostración comercial

Desarrollo SOLAUT

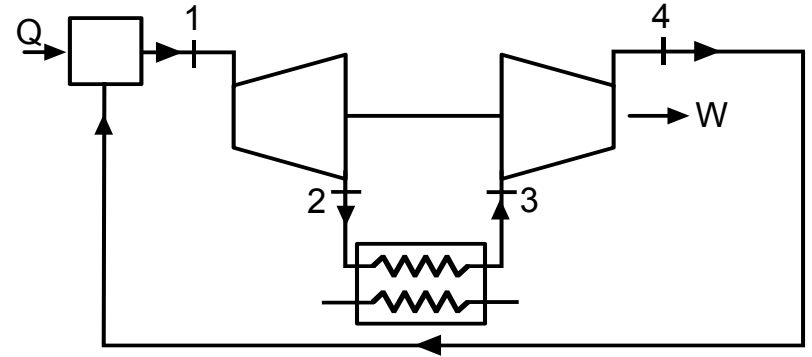
Características básicas tecnología:

- Módulos autónomos de 1 MWe
- Receptor volumétrico y ciclo Brayton inverso de aire
- Alto rendimiento
- Dispatchabilidad total (almacenamiento térmico + bioalcohol)

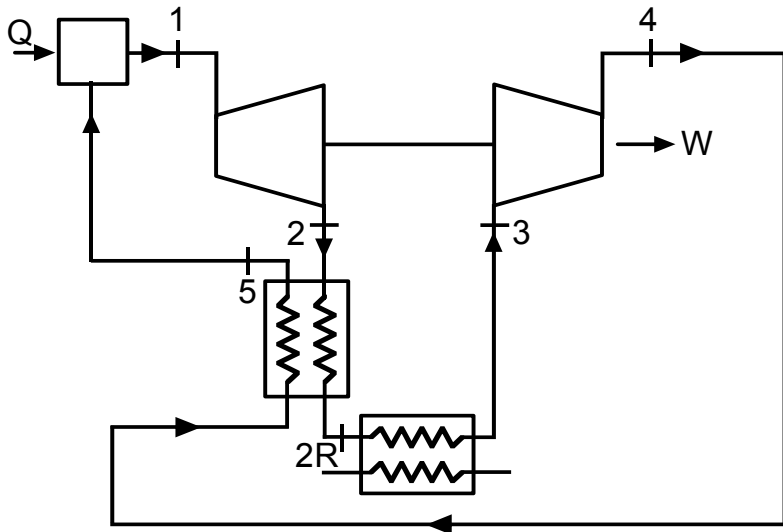
Desarrollo SOLAUT



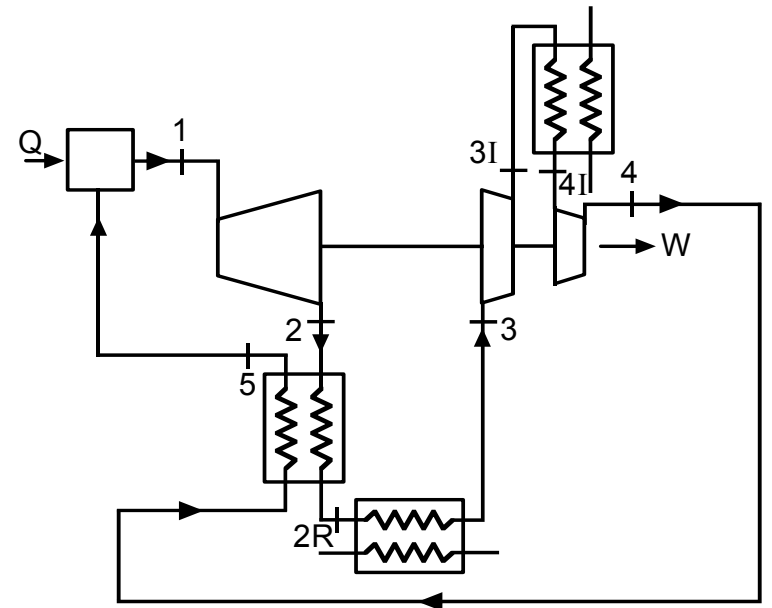
01-06-19.tdr



01-06-19.tdr

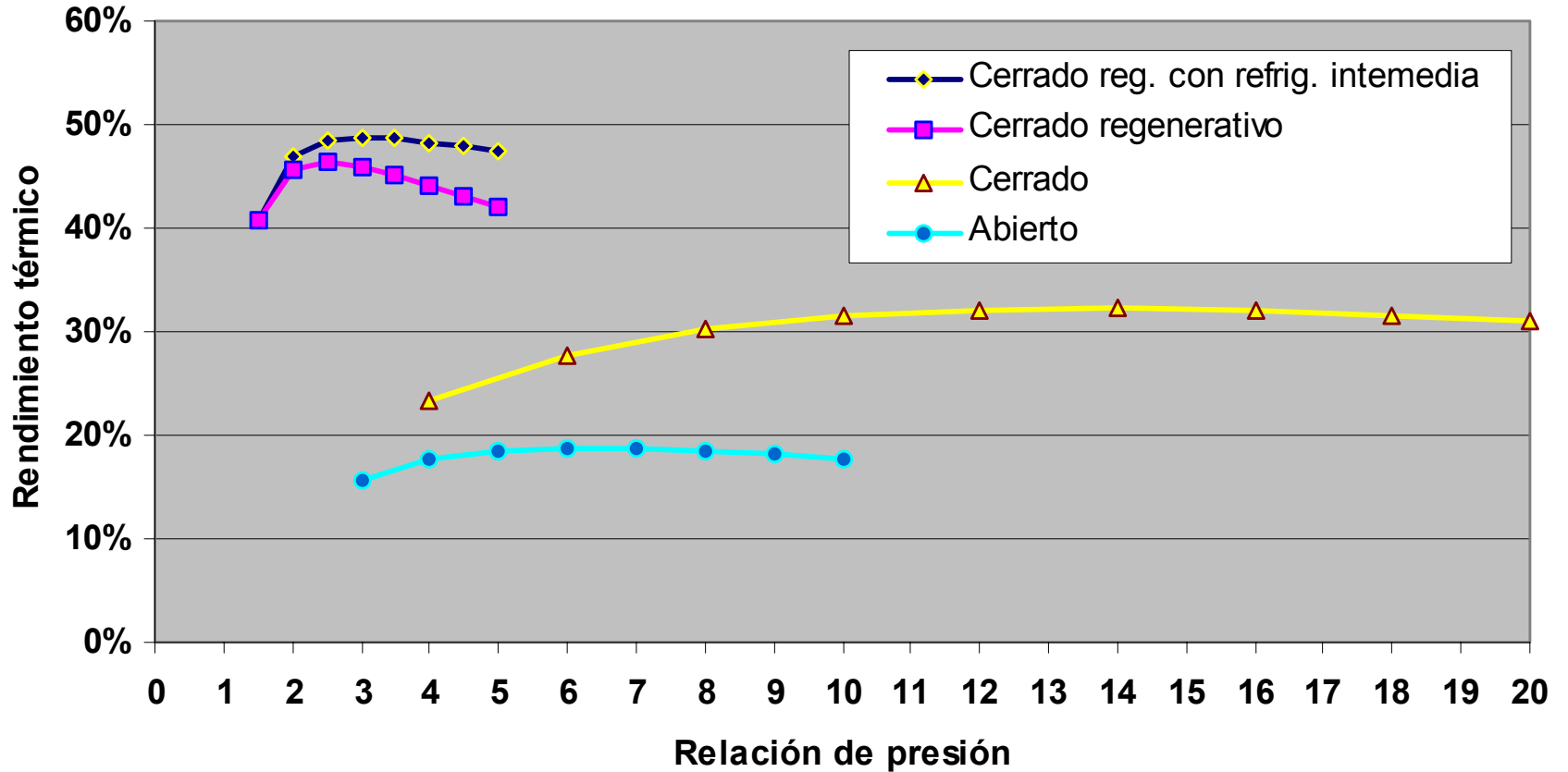


01-06-19.tdr



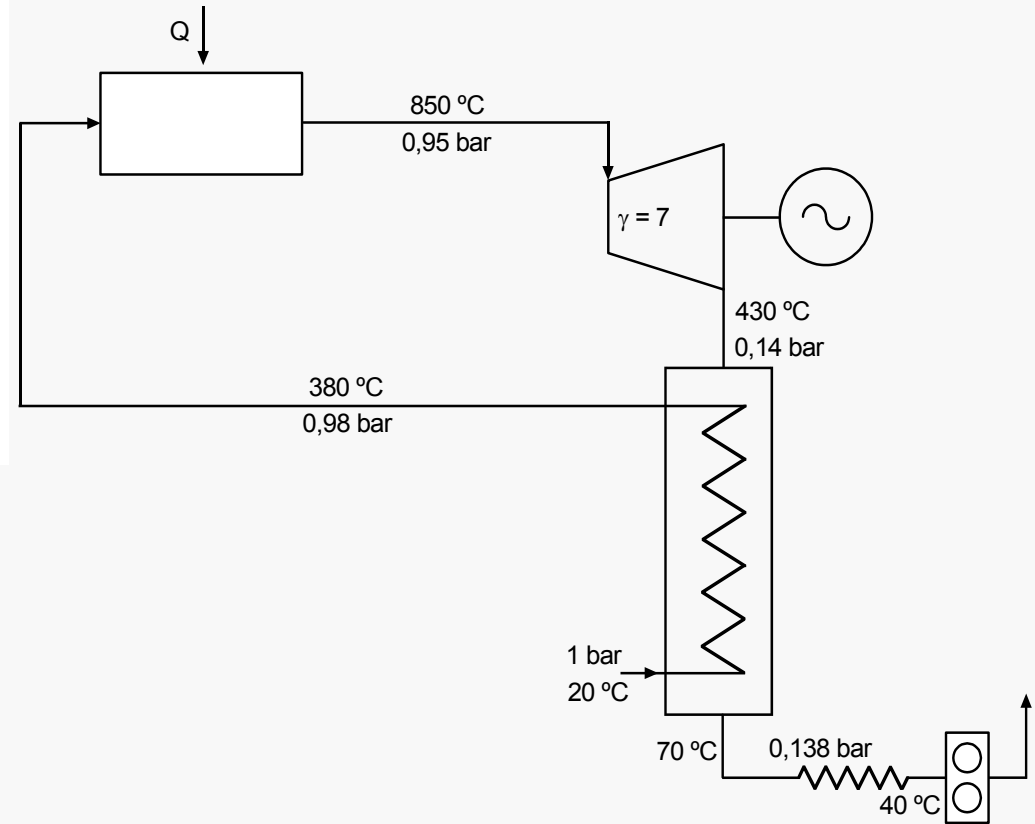
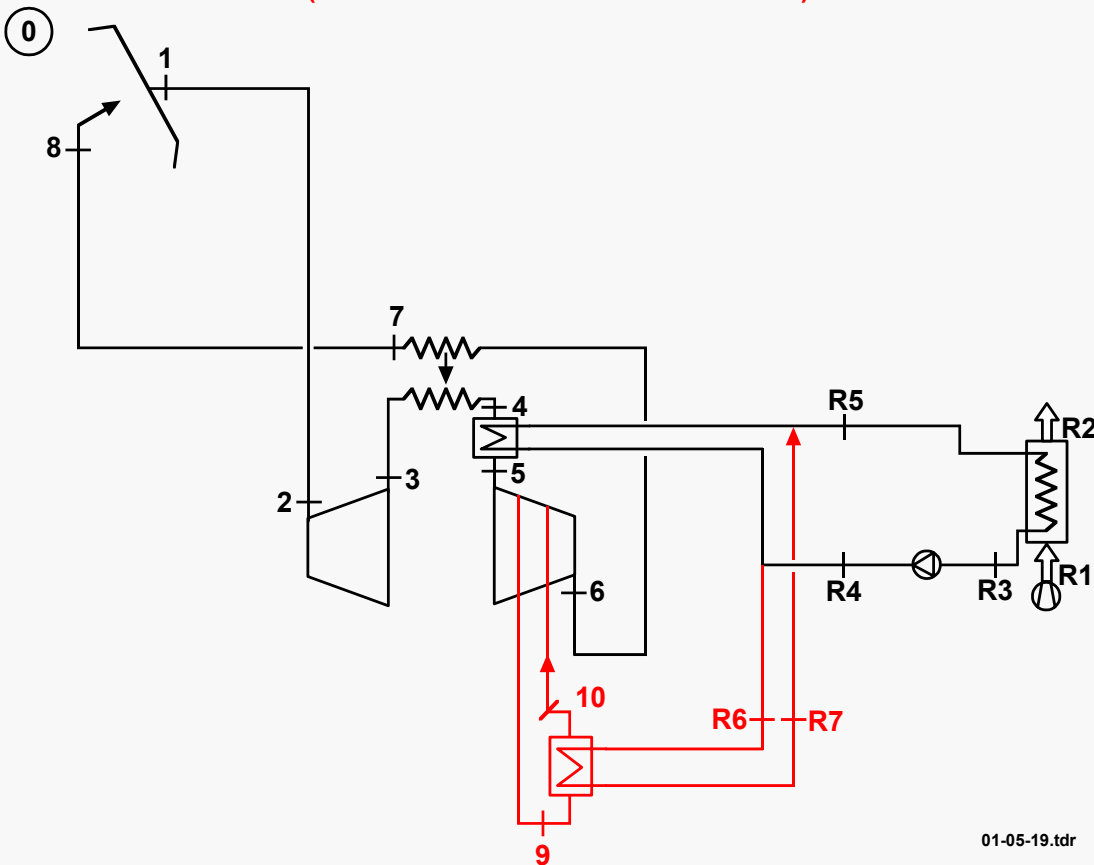
01-06-19.tdr

Desarrollo SOLAUT

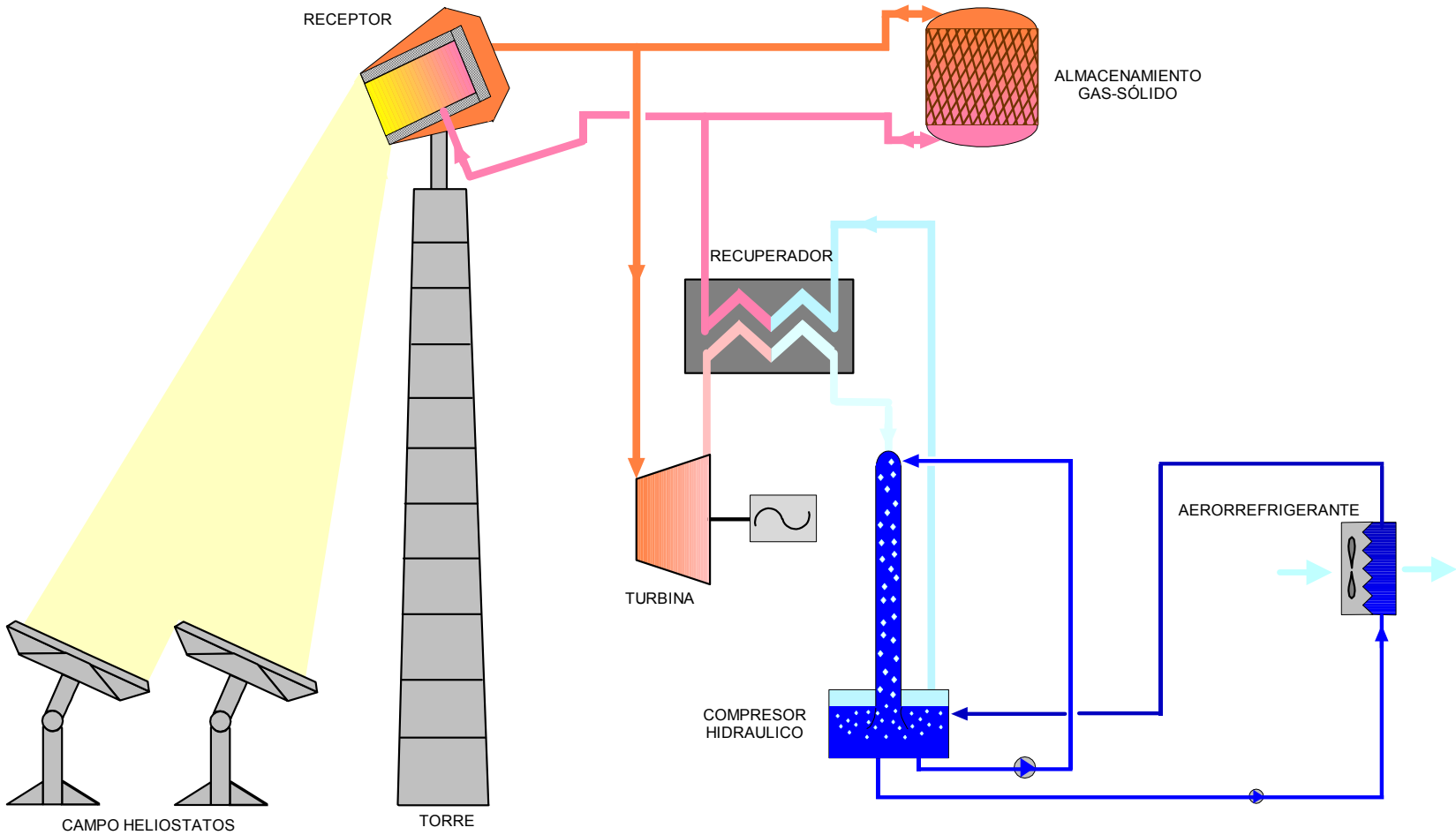


Desarroll O SOLAUT

CICLO REGENERATIVO (CON REFRIGERACIÓN INTERMEDIA)

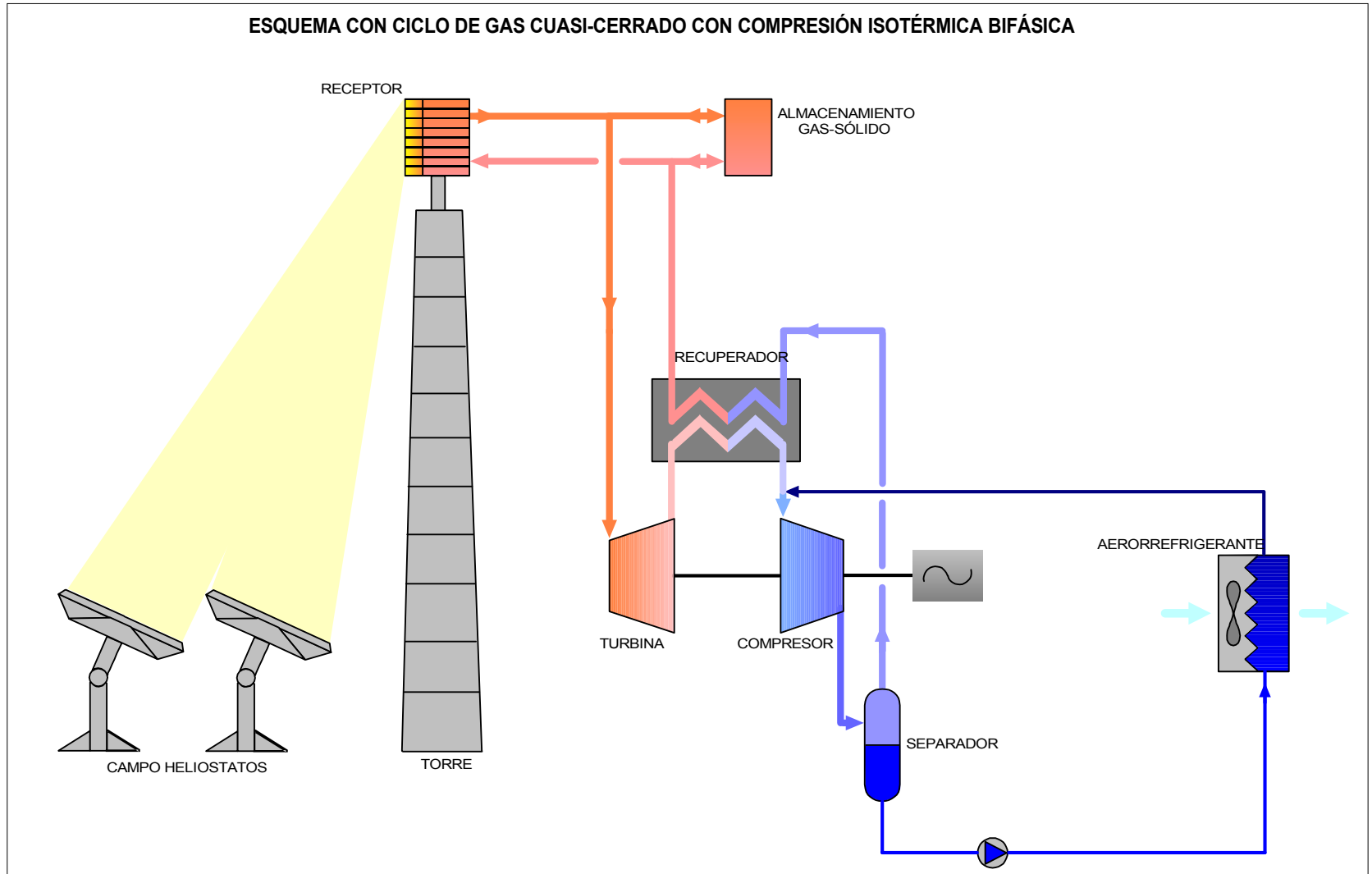


Desarrollo SOLAUT

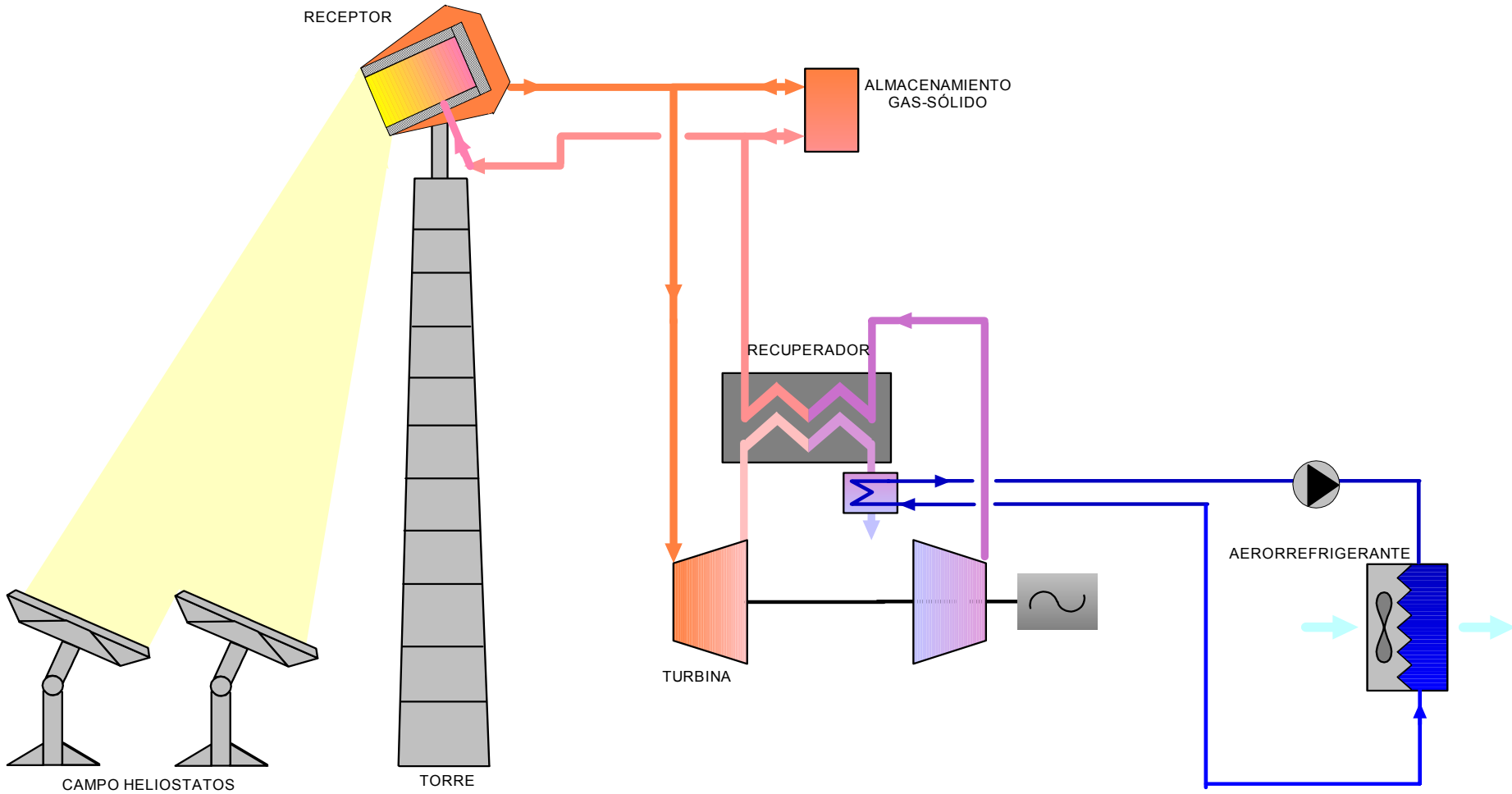


Desarrollo SOLAUT

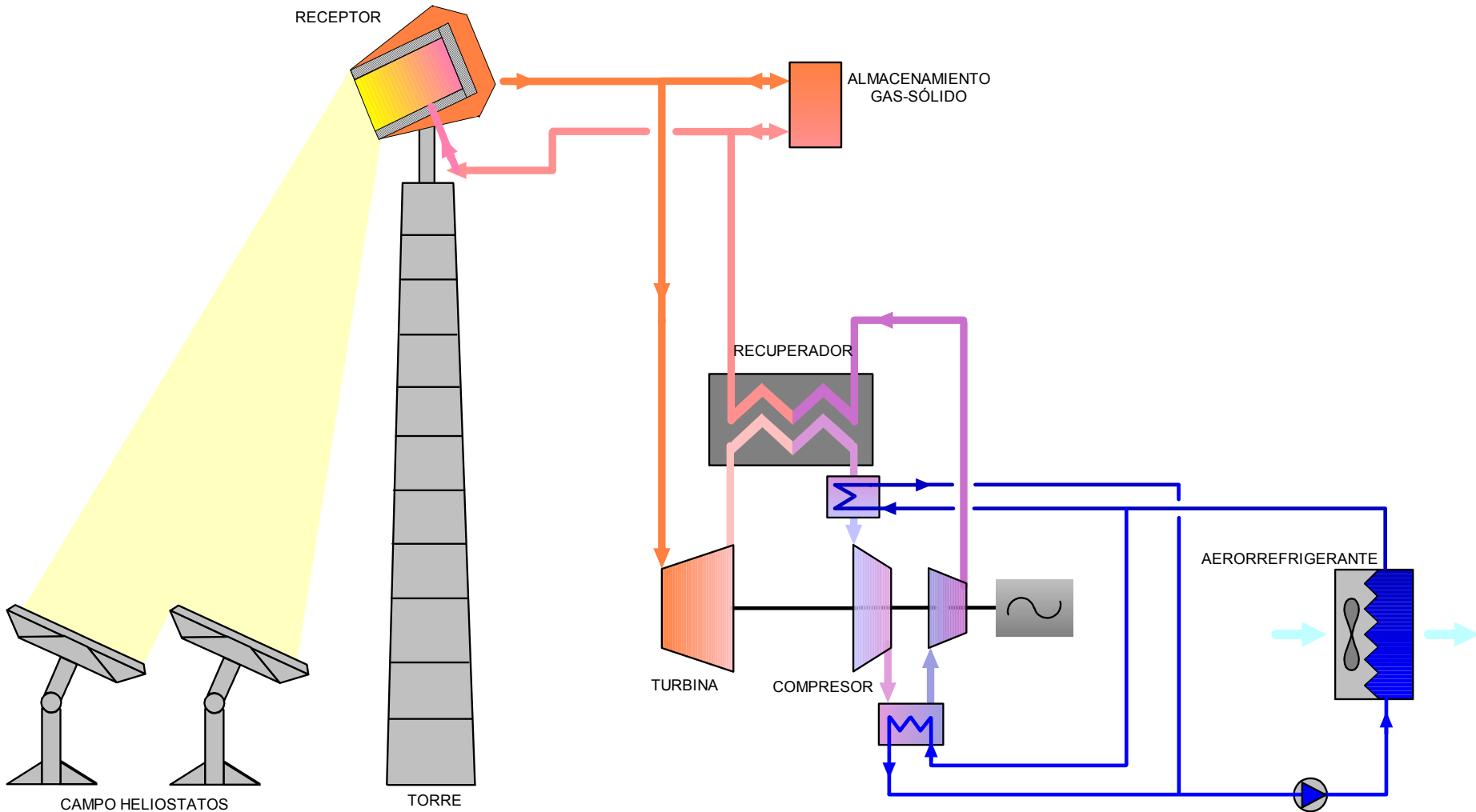
ESQUEMA CON CICLO DE GAS CUASI-CERRADO CON COMPRESIÓN ISOTÉRMICA BIFÁSICA



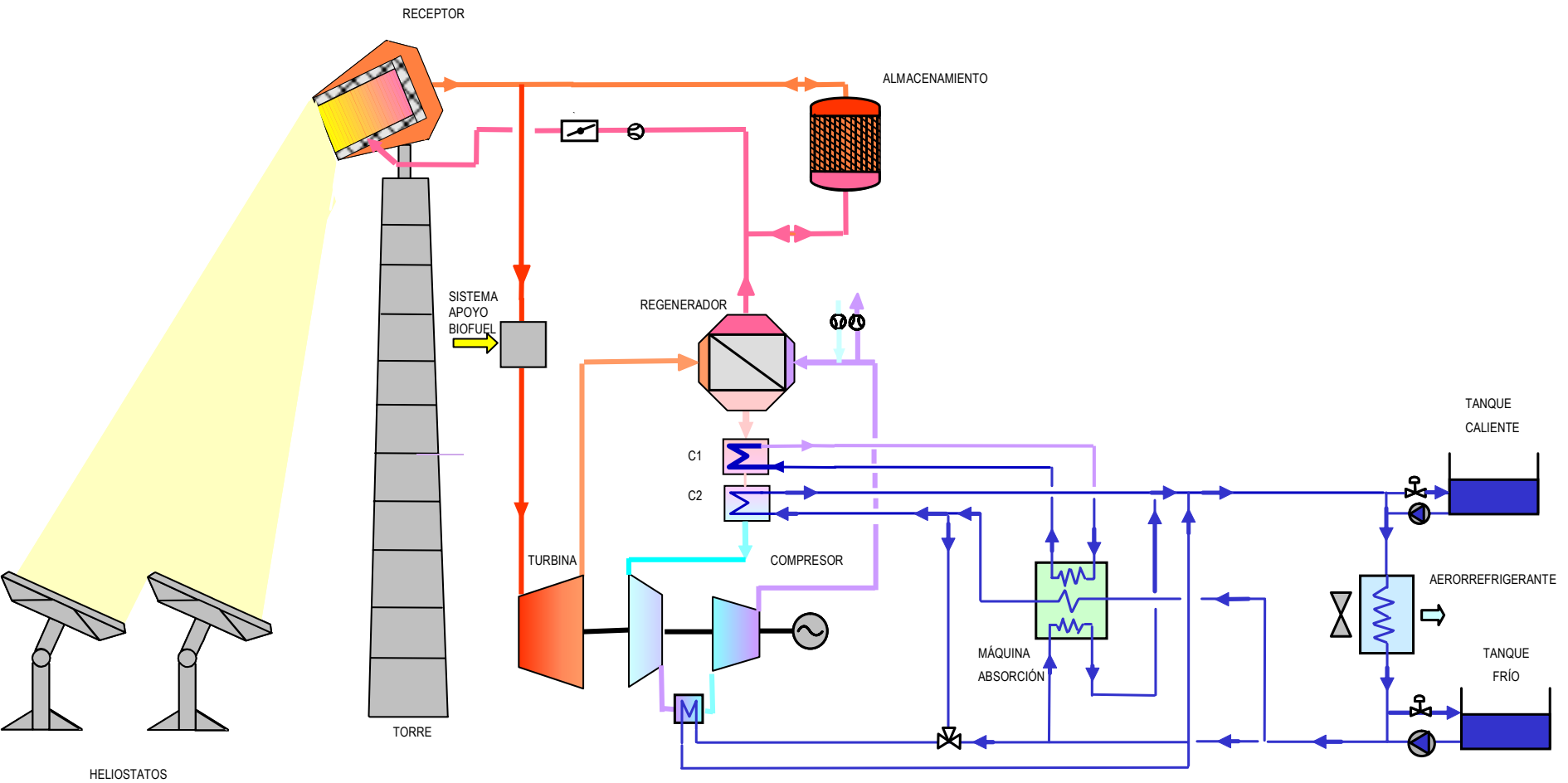
Desarrollo SOLAUT



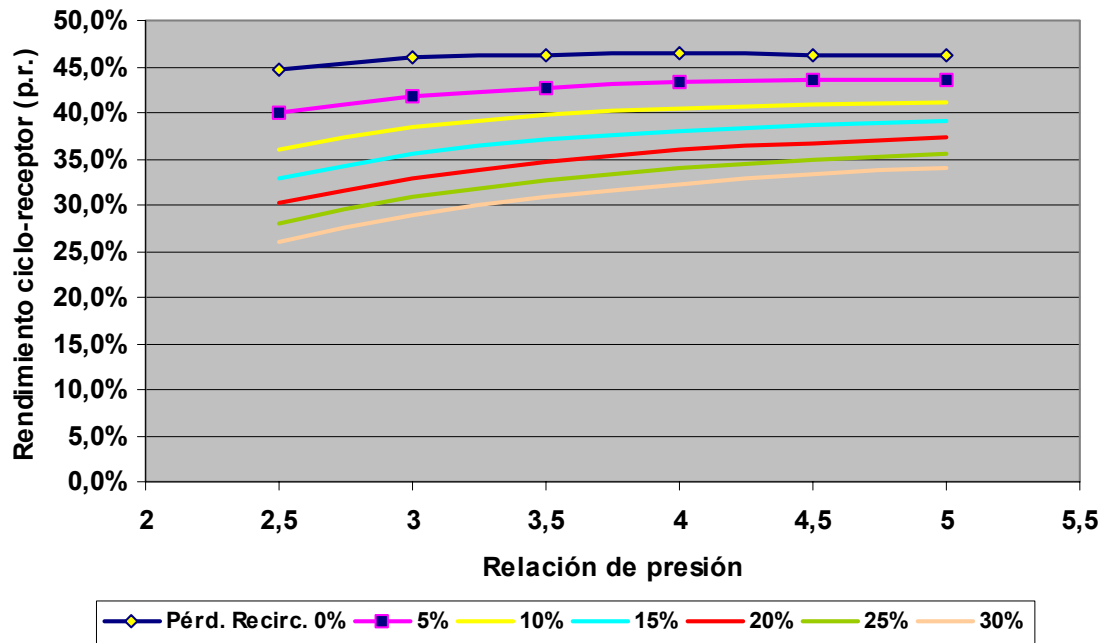
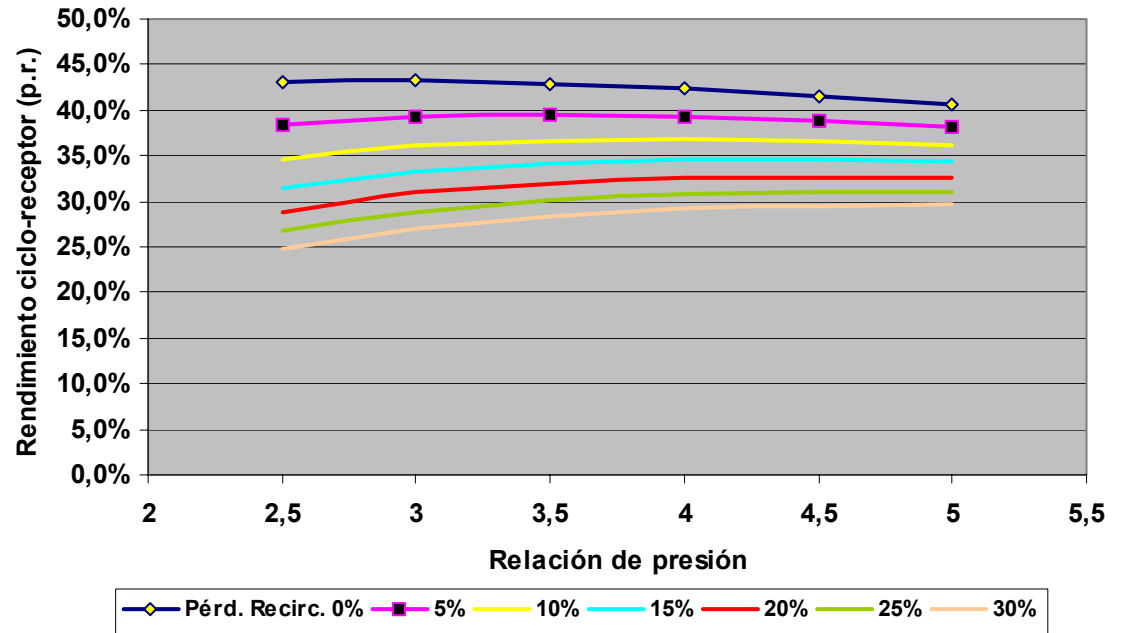
Desarrollo SOLAUT



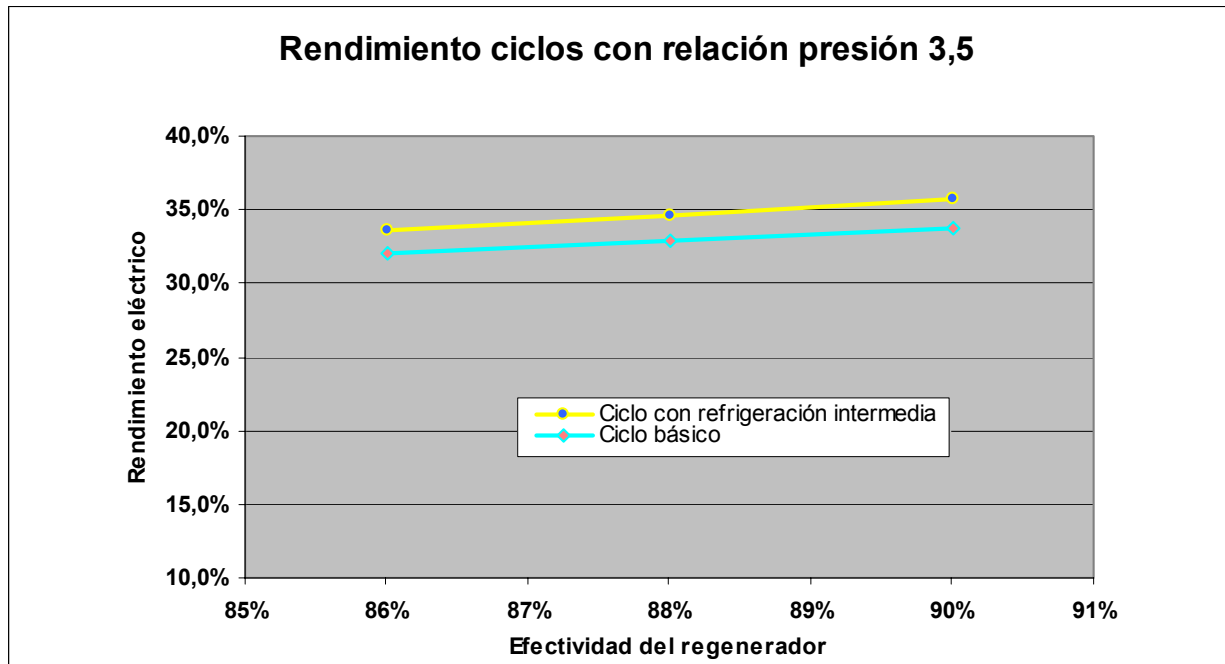
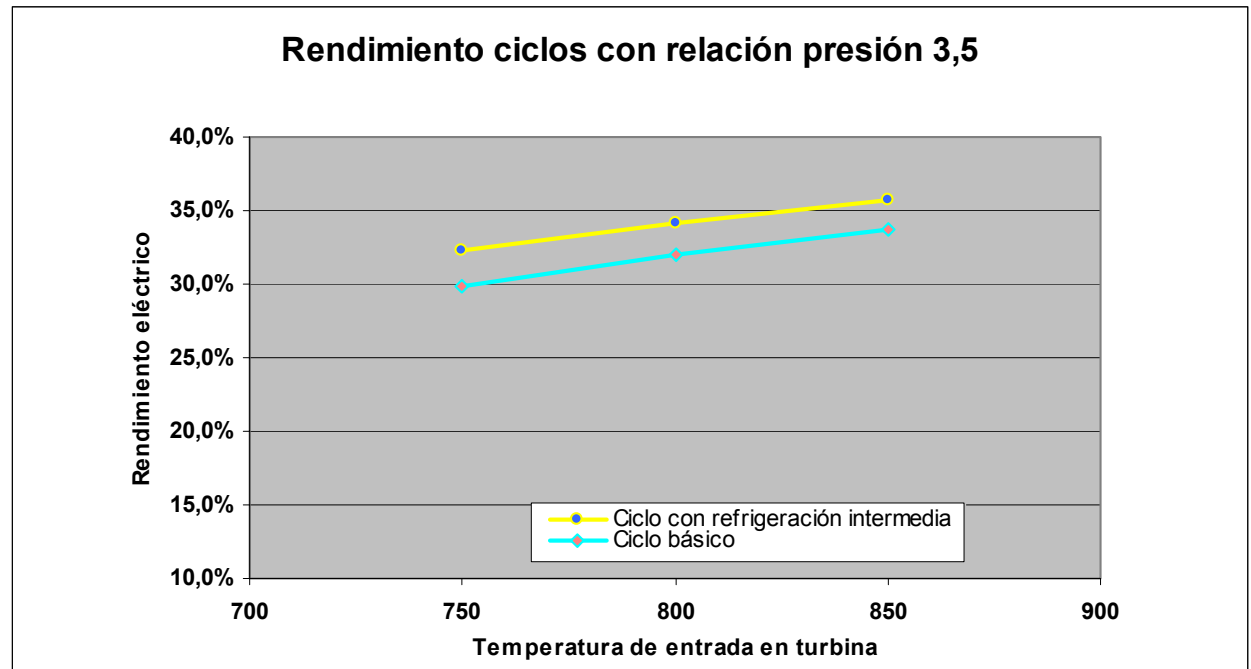
Desarrollo SOLAUT



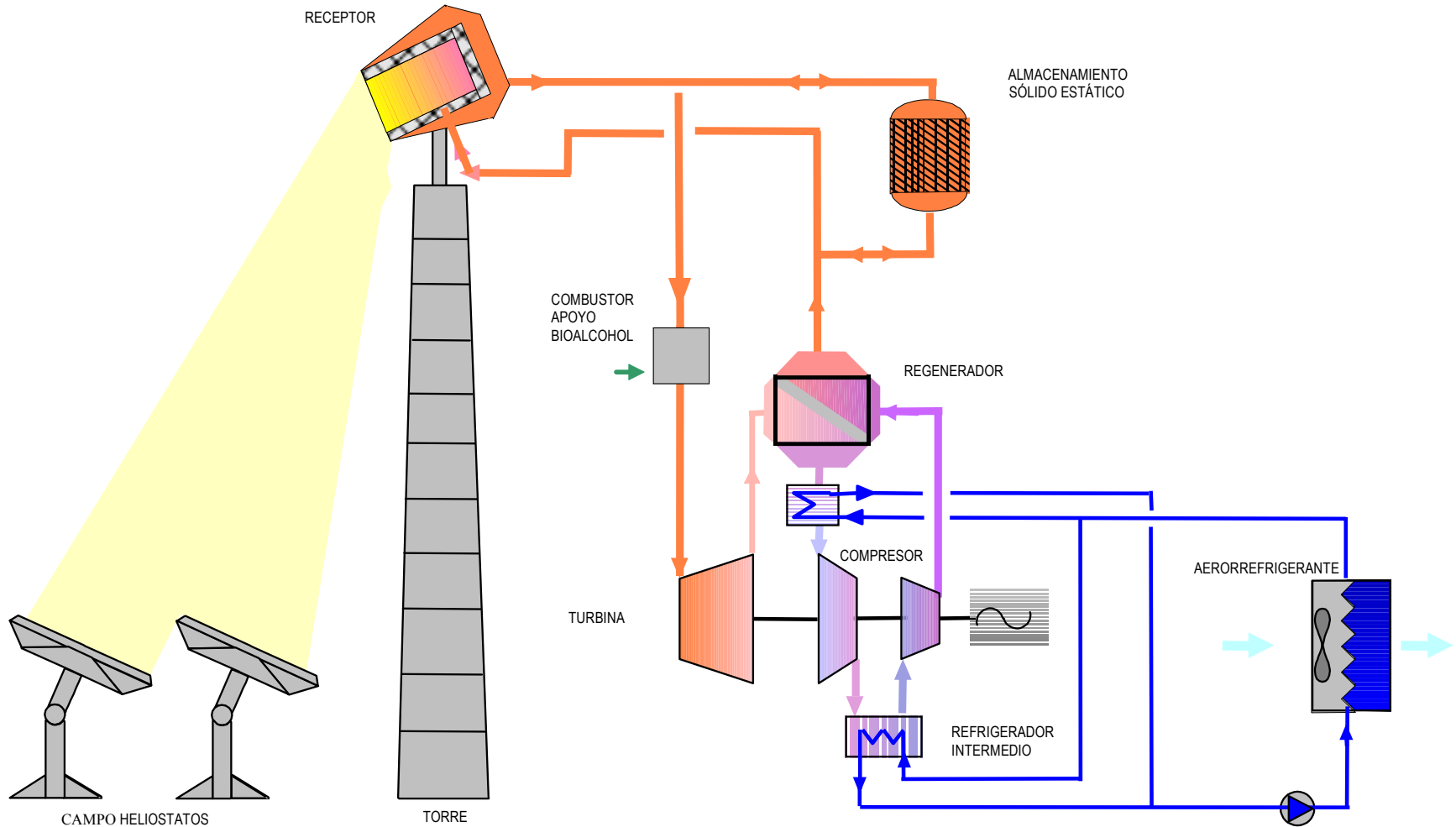
Desarrollo SOLAUT



Desarrollo SOLAUT



Desarrollo SOLAUT



		PV crystal		PV thin-film	SOLAUT	
Concept	Units	2001	2010	2010	2010	2020
Techno-economical uncertainty	---	None	Low	High	Medium	Medium
Tracking system	---	Non tracking		Non tracking	Dual-axis	Dual-axis
Annual radiation	kWh/m ² -yr	1800 (total)	1800 (total)	1800 (total)	2050 (direct)	2050 (direct)
Design specific radiation	W/m ²	1000	1000	1000	900	900
Annual eq. hours design specific radiation	h/yr	1800	1800	1800	2278	2278
Integrated storage	---	NO		NO	YES	
Solar multiplier	---	1.0	1.0	1.0	2.6	2.6
Annual eq. hours design energy input	h/yr	1800	1800	1800	5923	5923
Plant design gross output	MWe	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Module nominal efficiency (25 °C)	%	13.5	17.0	14.0 ¹	---	---
Plant design gross efficiency	%	10.8	13.6	11.2	30.3	33.3
Radiated area	m ²	9259	7353	8929	9168	8675
Annual design gross efficiency	%	10.3	13.0	10.7	24.8	27.3
Annual gross electricity	MWh/yr	1717	1717	1717	4857	4857
Losses, unavailability & auxiliary consumption	%	10	10	10	10	10
Annual net electricity	MWh/yr	1545	1545	1545	4371	4371
Module cost	€/Wp	3.6	2.4	0.6 ²	---	---
Specific plant cost	€/Wp	6.6	4.6	1.4	---	---
Plant cost	€/We	8.3	5.8	1.8	3.6	2.7
Total investment cost	M€	8.3	5.8	1.8	3.6	2.7
O&M cost	€/kWh	0.005	0.004	0.002	0.010	0.008
Electricity cost	€/kWh	0.381	0.267	0.084	0.068	0.051
Output to network	---	Uncontrolled		Uncontrolled	Controlled	
Maximum theoretical solar coverage of total EU electricity needs using each technology	---	~20%		~20%	~55%	

Desarrollo
SOLAUT

Desarrollo SOLAUT

La tecnología SOLAUT es una excelente alternativa para la generación eléctrica solar a pequeña escala o a gran escala de forma modular, pero requiere un importante esfuerzo de desarrollo antes de poder pasar a una etapa de demostración, fundamentalmente en el área del receptor de alta temperatura, la turbomaquinaria y el regenerador

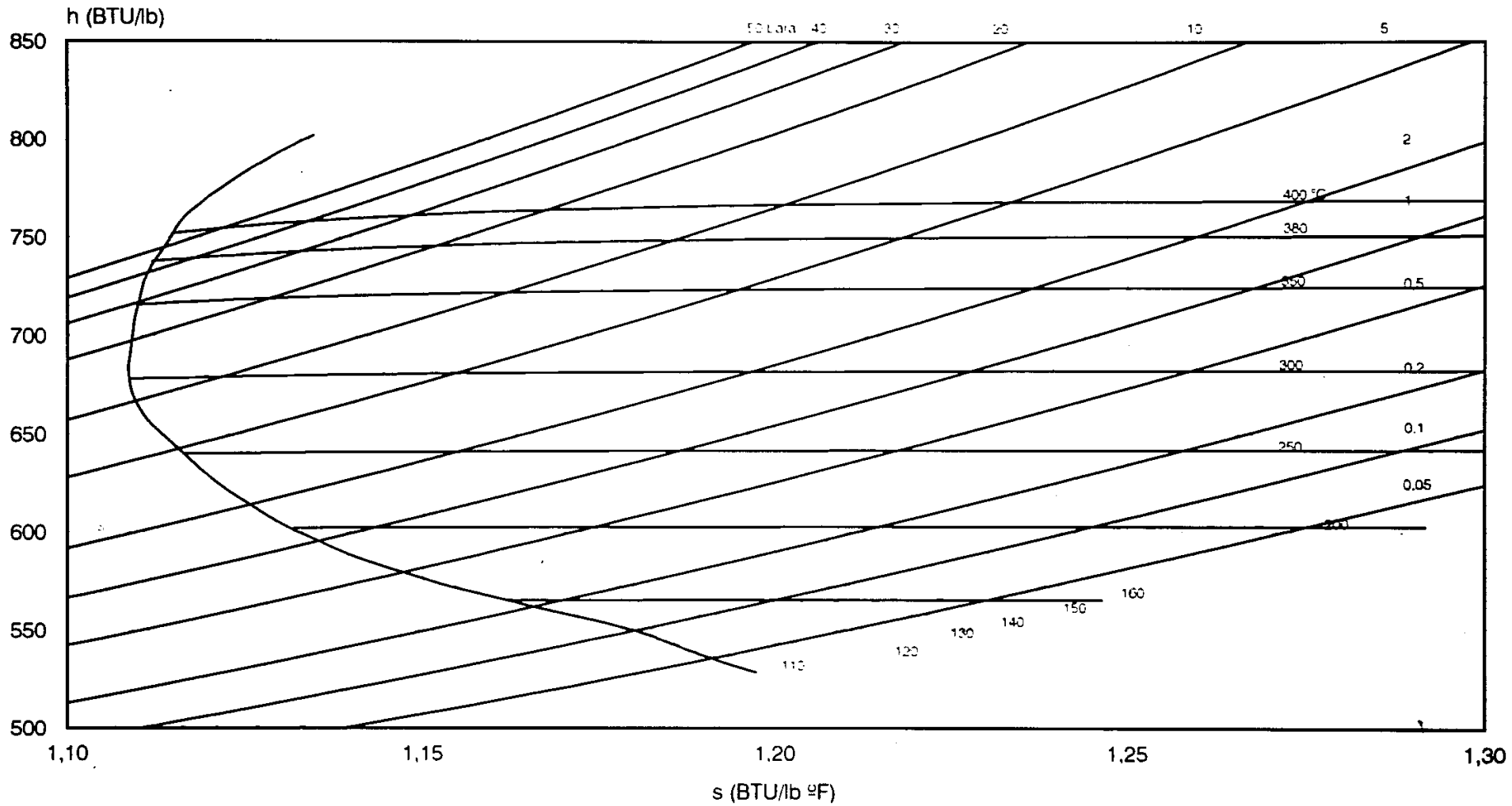
Desarrollo SOL-SMR

Aplicación del Ciclo SMR a plantas solares de pequeña potencia: 5 – 10 MWe

El Ciclo SMR:

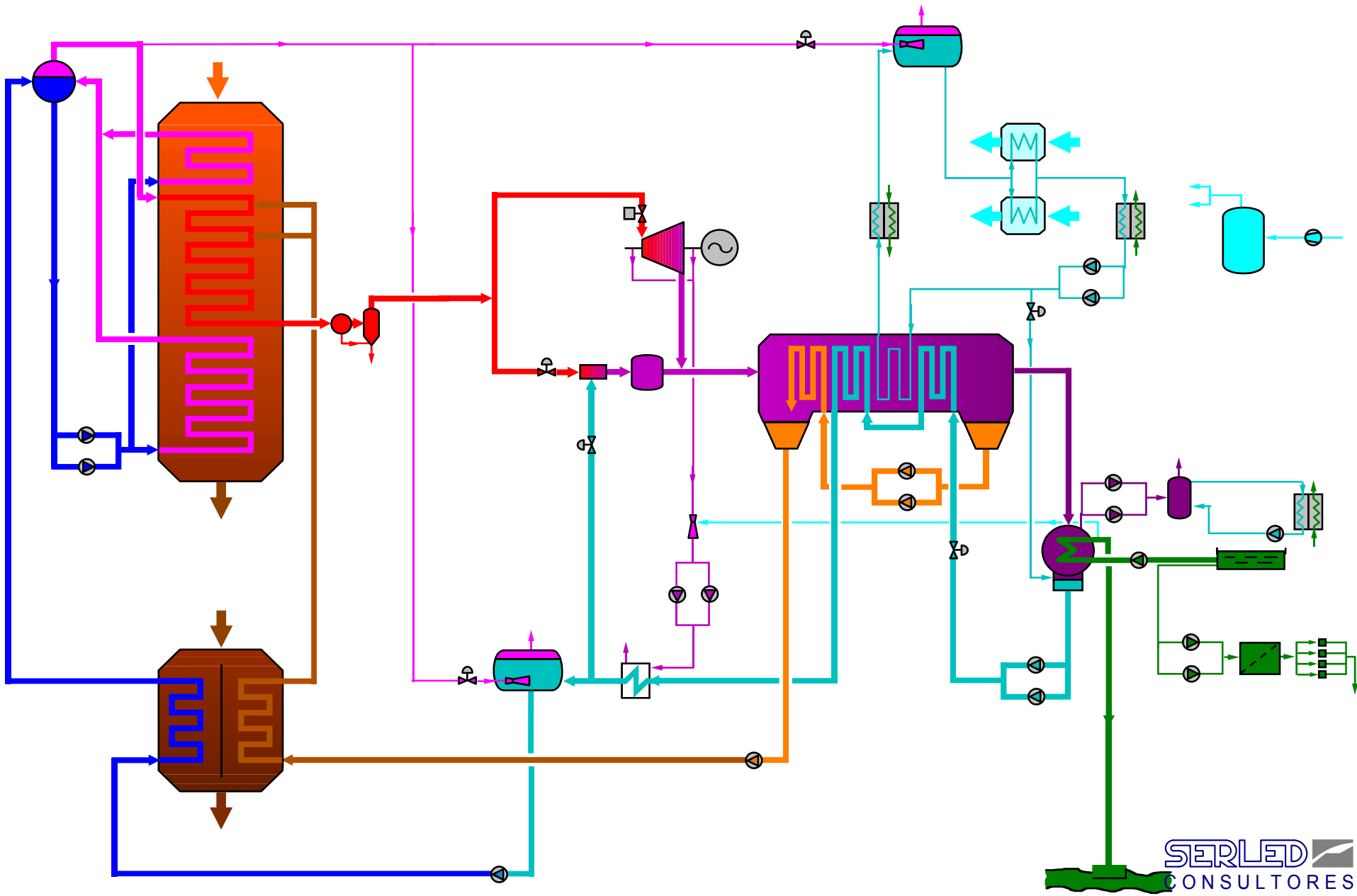
- Invención española (Ing. Industrial Serafín Mendoza Rosado)
- Primer ciclo térmico a nivel mundial en operación comercial con fluido de trabajo mezcla (desde 1992)
- Único ciclo térmico a nivel mundial en operación comercial con dos sustancias inmiscibles (agua y difenilo/óxido de difenilo)
- Rendimiento 12% superior que el ciclo de vapor de agua

Desarrollo SOL-SMR

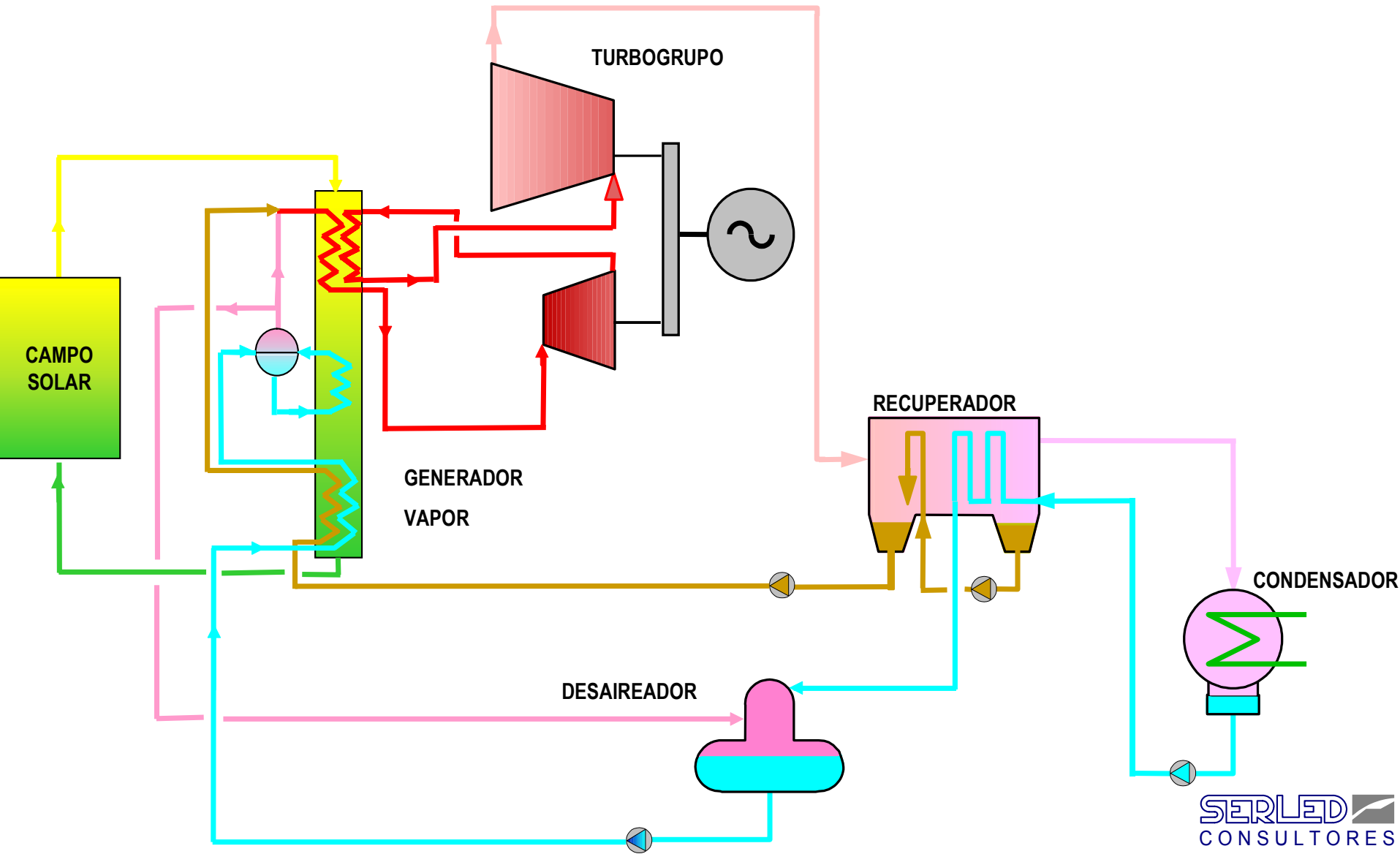


RATIO 2:1

Desarrollo SOL-SMR



Desarrollo SOL-SMR



Desarrollo SOL-SMR

El avanzado Ciclo SMR con vapor mezcla es la tecnología óptima de ciclo de vapor para mejorar el rendimiento y la rentabilidad de centrales solares termoeléctricas de pequeña potencia.

Una planta de demostración de la tecnología para esta aplicación deberá contar con un turbogruppo específicamente integrado de dos cuerpos: turboexpansor en alta y turbina multietapa en baja

Reseñas finales

La energía solar termoeléctrica es la única alternativa a corto y medio plazo para la generación eléctrica renovable a gran escala a precios asumibles y con apropiada despachoabilidad

Los desarrollos de nuevas tecnologías en solar termoeléctrica son la clave para lograr a medio plazo mejoras técnicas y reducciones de coste significativas respecto de las tecnologías ya probadas

Además de la prima a la generación, esencial para la expansión de las tecnologías ya probadas, será necesario un continuado apoyo público a los nuevos desarrollos tecnológicos en este campo