



Universidad de Salamanca
Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Industrial

Diseño del campo solar de una central termosolar

Norberto Redondo Melchor
Doctor Ingeniero Industrial

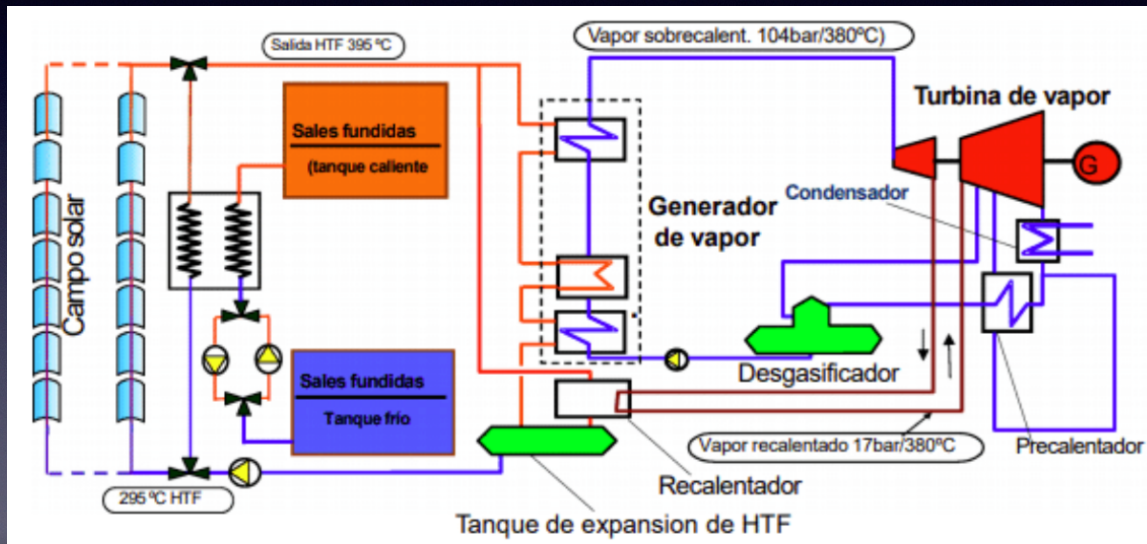
Un poco de investigación...

Planta termosolar “La Africana” 50 MW
Las Posadas (Córdoba)



Un poco de investigación...

50 MW - ESQUEMA DE PRINCIPIO CLÁSICO



© NRM 2012-2026 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Un poco de investigación...

COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO EUROTROUGH ET



© NRM 2012-2026 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Un poco de investigación...

COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO EUROTROUGH ET

Eurotrough ET	Tipo 0	Tipo I	Tipo II
Apertura espejos (m)	5.77		
Longitud espejos por módulo (m)	11.80		
Superf. interceptadora por mód. (m ²)	68.125		
Distancia focal (m)	1.71		
Anchura máxima (m)	5.77		
Longitud por módulo (m)	12.50		
Módulos por bloque	6	8	12
Longitud por bloque (m)	75	100	150
Superficie intercep. por bloque (m ²)	408.75	545.00	817.50

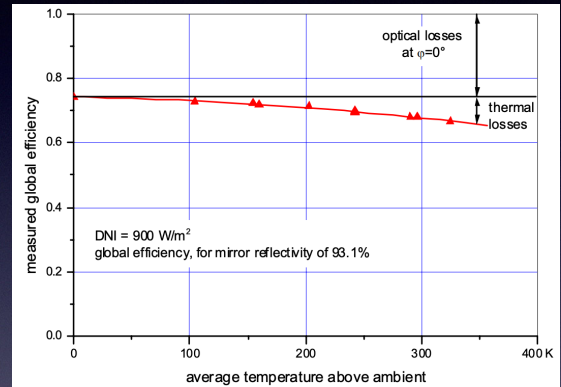


Figure 5: Global efficiency of the ET150 prototype at PSA for clean mirrors, reference area $6 \times 11.98 \times 5.76$ m², and DNI = 900 W/m² solar irradiation

© NRM 2012-2026 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Un poco de investigación...

TUBO ABSORBEDOR



	SCHOTT PTR 70
Longitud	4060 mm
Ø exterior tubo metálico	70 mm
Tipo de metal	Acero inoxidable
recubrimiento selectivo	Cermet
Ø exterior tubo vidrio	125 mm
Tipo de vidrio	Vidrio borosilicatado ²
Transmisividad	≥ 96%
Tratamiento antirreflexivo	En las dos caras del tubo de vidrio
Absortividad	≥ 95%
Emisividad	≤ 10 % a 400 °C
Superficie útil	~ 95%
Cámara de vacío	Vida útil > 25 años

© NRM 2012-2026 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Un poco de investigación...

Properties of Therminol VP-1 vs Temperatures - Liquid Phase

Temperature °C	Density kg/m ³	Thermal Conductivity W/m.K	Heat Capacity kJ/kg.K	Viscosity		Vapour pressure (absolute) kPa*	Enthalpy kJ/kg	Latent Heat vap. kJ/kg
				Dynamic mPa.s	Kinematic mm ² /s**			
12	1071	0.137	1.523	5.48	5.12	-	0	419.0
20	1064	0.136	1.546	4.29	4.03	-	12.3	414.7
30	1056	0.135	1.575	3.28	3.10	-	27.9	409.3
40	1048	0.134	1.604	2.60	2.48	-	43.8	403.9
50	1040	0.133	1.633	2.12	2.03	-	60.0	398.6
60	1032	0.132	1.662	1.761	1.707	-	76.4	393.3
70	1024	0.131	1.690	1.492	1.458	-	93.2	388.1
80	1015	0.130	1.719	1.284	1.265	-	110.3	382.9
90	1007	0.129	1.747	1.119	1.111	-	127.6	377.8
100	999	0.128	1.775	0.985	0.986	0.5	145.2	372.7
110	991	0.126	1.803	0.875	0.884	0.8	163.1	367.6
120	982	0.125	1.831	0.784	0.798	1	181.3	362.6
130	974	0.124	1.858	0.707	0.726	2	199.7	357.5
140	965	0.123	1.886	0.642	0.665	3	218.4	352.6
150	957	0.121	1.913	0.585	0.612	5	237.4	347.6
160	948	0.120	1.940	0.537	0.566	7	256.7	342.7
170	940	0.118	1.968	0.494	0.526	9	276.2	337.7
180	931	0.117	1.995	0.457	0.491	13	296.0	332.8
190	922	0.115	2.021	0.424	0.460	18	316.1	327.9
200	913	0.114	2.048	0.395	0.432	24	336.5	323.0
210	904	0.112	2.075	0.368	0.407	32	357.1	318.0
220	895	0.111	2.101	0.345	0.385	42	378.0	313.0
230	886	0.109	2.128	0.324	0.366	54	399.1	308.0
240	877	0.107	2.154	0.305	0.348	68	420.5	303.0
250	867	0.106	2.181	0.288	0.332	86	442.2	297.9
260	857	0.104	2.207	0.272	0.317	108	464.1	292.7
270	848	0.102	2.234	0.258	0.304	133	486.3	287.5
280	838	0.100	2.260	0.244	0.292	163	508.8	282.2
290	828	0.098	2.287	0.232	0.281	198	531.6	276.8
300	817	0.096	2.314	0.221	0.271	239	554.6	271.2
310	806	0.095	2.341	0.211	0.262	286	577.8	265.6
320	795	0.093	2.369	0.202	0.254	340	601.4	259.7
330	784	0.091	2.397	0.193	0.246	401	625.2	253.8
340	773	0.089	2.425	0.185	0.239	470	649.3	247.6
350	761	0.086	2.454	0.177	0.233	548	673.7	241.3
360	749	0.084	2.485	0.170	0.227	635	698.4	234.7
370	736	0.082	2.517	0.164	0.222	732	723.4	227.8
380	723	0.080	2.551	0.158	0.218	840	748.8	220.7
390	709	0.078	2.588	0.152	0.214	959	774.4	213.2
400	694	0.076	2.628	0.146	0.211	1090	800.5	205.3
410	679	0.073	2.674	0.141	0.208	1230	827.0	197.0
420	662	0.071	2.729	0.137	0.206	1390	854.0	188.0
425	654	0.070	2.760	0.134	0.205	1470	867.7	183.3

FLUIDO CALOPORTADOR



© NRM 2012-2026 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

...y de diseño propio

TAMAÑO DEL CAMPO SOLAR:

- POTENCIA OBJETIVO = 50 MW
- RENDIMIENTOS DECRECIENTES:
 - ALTERNADOR / TURBINA / CONDENSADOR.... (RANKINE)
 - INTERCAMBIADOR CALOR ACEITE / AGUA
 - PÉRDIDAS DE CALOR EN DISTRIBUCIÓN ACEITE
 - PÉRDIDAS EN CAPTACIÓN:
 - ENFOQUE
 - SUCIEDAD
 - DEL TUBO ABSORBEDOR ETC

© NRM 2012-2026 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

...y de diseño propio

**ETSII BÉJAR - MÁSTER ING. INDUSTRIAL
TERMO-SOLAR
CAMPO SOLAR**

Cálculos globales

Potencia nominal (kW) **50 000**
 Rendimiento global ciclo vapor (%) **33.0%**
 Rendimiento global instalación HTE (%) **99.3%**
 Rendimiento de captación solar (%) **70.0%**

Temperatura inicio (°C) **295**
 Temperatura fin (°C) **395**
 Temperatura media (°C) **345**

Fluido térmico **Therminol VP-1**
 Coeficiente expansión térmica volumétrica (°C⁻¹) **0.000979**
 Capacidad calorífica (345 °C) Ce (kJ/(kg·°C)) **2.44**
 Densidad (T_{amb} °C) (kg/m³) **765.780319**

$$\dot{Q} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right) = c_p \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \right) \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) C \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \Delta T \left(\text{°C} \right)$$

Potencia térmica a transferir al ciclo vapor (kW) **151 515**
 Potencia térmica a incorporar al fluido (kW) **152 560**
 Potencia térmica a interceptar del sol (kW) **217 960**

Salto térmico (°C) **100**
 Temperatura media (°C) **345**
 Caudal (m³/h) **0.817**
 Caudal (m³/h) **2 941**

Therminol VP-1

Density (kg/m³) = -0.00797 * T(°C) + 0.00078116 * T(°C)² - 2.367 * 10⁻⁴ * T(°C)³ + 1083.25
 Heat capacity (kJ/kg·K) = 0.002414 * T(°C) + 5.9591 * 10⁻⁴ * T(°C)² - 2.8679 * 10⁻⁶ * T(°C)³ + 4.4172 * 10⁻⁹ * T(°C)⁴ + 1.498
 Thermal Conductivity (W/m·K) = -6.19477 * 10⁻⁴ * T(°C) - 1.82257 * 10⁻⁶ * T(°C)² + 2.5034 * 10⁻⁹ * T(°C)³ - 7.974 * 10⁻¹² * T(°C)⁴ + 0.157743
 Kinematic viscosity (mm²/s) = $\frac{\text{Density}}{\text{Dynamic Viscosity}}$
 Vapour pressure (kPa) = 0.190859 * T(°C) + 4.38824 * 10⁻⁴ * T(°C)² - 5.6708 * 10⁻⁷ * T(°C)³ + 1.08408 * 10⁻¹⁰ * T(°C)⁴ + 2.12239
 Latent Heat Vaporisation (kJ/kg) = -0.528833 * T(°C) - 7.50703 * 10⁻⁴ * T(°C)² + 1.5822 * 10⁻⁶ * T(°C)³ - 3.771 * 10⁻⁹ * T(°C)⁴ + 425.18

Temp. °C	Ce (kJ/(kg·°C))	T(°C)	e (kJ/kW·°C)
295	2.29624	295	2.3
305	2.61157	305	2.32
315		315	2.35
325		325	2.38
335		335	2.41
345		345	2.44
375		375	2.54
395		395	2.62

ΔC_e (kJ/(kg·°C)) **0.31903**

Módulos colectores Eurotrough ET

Rendimiento reflector

Reflectancia de la superficie (%) **95.2%**
 Factor de suciedad (%) **90.0%**
 Factor de sombras (%) **99.5%**
 Factor ángulo incidencia (%) **98.3%**

Subproducto **83.8%**

Rendimiento captador

Acierdo de enloque (%) **99.0%**
 Transmisividad vidrio-protector (%) **96.0%**
 Absortividad neta tubo negro (%) **97.0%**
 Aprovechamiento térmico a 400°C (%) **90.6%**

Subproducto **83.5%**

Rendimiento neto de captación solar (%) **70.0%**

Potencia solar irradiada s/sup. normal (kW/m²) **1.000** 0.402
 Superficie solar interceptadora (m²/Eurotrough) **68.125**
 Potencia incorporada al fluido (kW/Eurotrough) **47.684**

Num. módulos Eurotrough por lazo (ud) **12** 24 36 48
 Superficie solar interceptadora (m²/lazo) **817.5** 1635 2452.5 3270
 Potencia captada del sol (kW/lazo) **817.5** 1635 2452.5 3270
 Potencia incorporada al fluido (kW/lazo) **572.2** 1144.4 1716.6 2288.8
 Nº de lazos necesarios **267** 134 89 67
 Nº módulos Eurotrough necesarios **3204** 3216 3204 3216

EUROTROUGH COLLECTOR QUALIFICATION COMPLETE - PERFORMANCE TEST RESULTS FROM PSA
 Fuente: https://elab.dtr.de/99768/1/EuroTrough_Ins2003_0521_final.pdf

	Eurotrough ET	Tipo 0	Tipo I	Tipo II
Apertura espejos (m)			5.77	
Longitud espejos por módulo (m)			11.80	
Superf. interceptadora por mód. (m ²)			68.125	
Distancia focal (m)			1.71	
Anchura máxima (m)			5.77	
Longitud por módulo (m)			12.50	
Módulos por bloque		6	8	12
Longitud por bloque (m)		75	100	150
Superficie intercep. por bloque (m ²)		408.75	545.00	817.50

Figure 5: Global efficiency of the ET150 prototype at PSA for clean mirrors, reference area 6 x 11.98 x 3.76 m², and DNI = 900 W/m² solar irradiation

...y de diseño propio

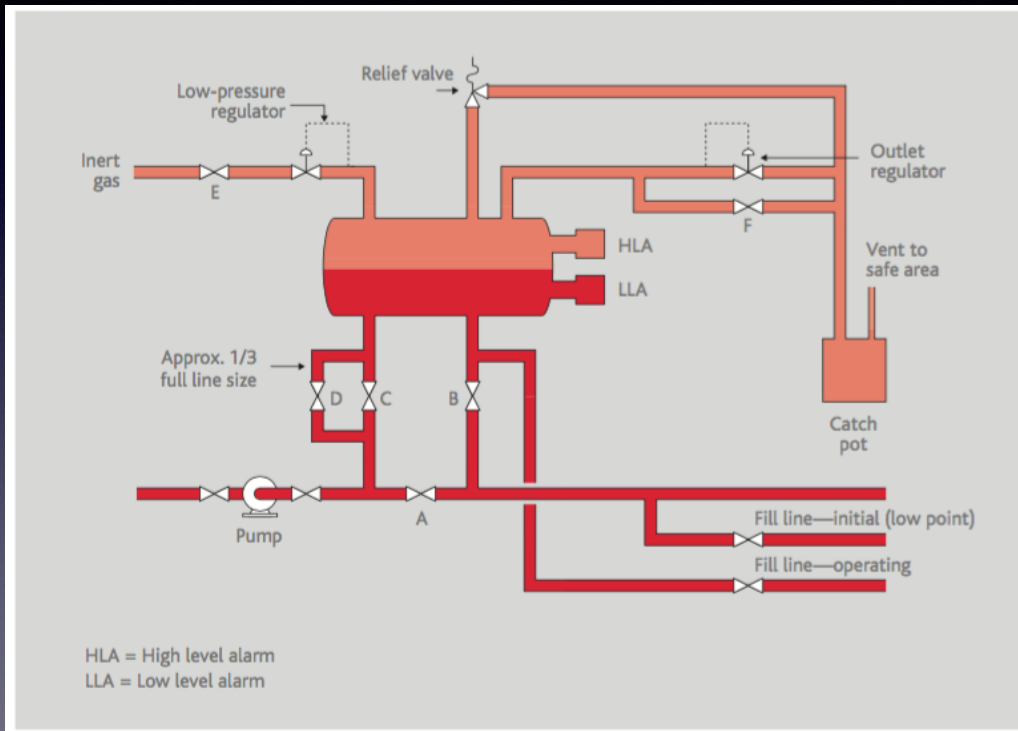
CIRCUITOS DE ACEITE CALOPORTADOR:

- DEFINICIÓN DEL ESQUEMA DE PRINCIPIO
- ESTIMACIÓN DE CAUDALES
- CÁLCULO DE TUBERÍAS
- TANQUES DE EXPANSIÓN
- CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA
- SELECCIÓN DE ELECTROBOMBAS
- OPTIMIZACIÓN DEL AISLAMIENTO TÉRMICO

[Este ha de ser el contenido del trabajo para evaluación de este tema]

...y de diseño propio

TANQUES DE EXPANSIÓN



...y de diseño propio

SCE-M Mag Drive Process Pump

Horizontal Single Stage Pumps with Permanent Magnetic Drive



The SCE-M is a heavy-duty horizontal centrifugal process pump with permanent magnetic drive complying with the latest edition of API 685. It's 100% leakage free performance allows the safe handling of hazardous and volatile fluids.

Operation Limits

Capacity up to 2,200 m³/h (9,690 gpm)

Head up to 330 m (1,080 ft)

Maximum Pressure up to 40 bar (580 psi)

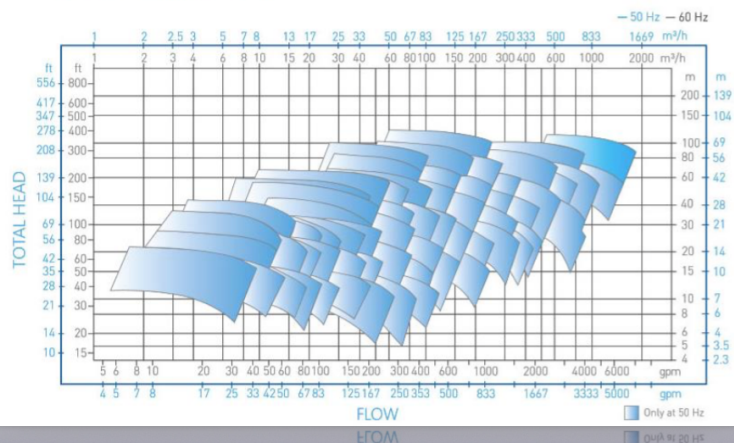
Temperature -120 to 450 °C (-184 to 840 °F)

Discharge flanges according to ASME B16.5 up to 300# (600# as an option)

Applications Petroleum Refining, Production and Distribution, Petrochemical, Refineries, Heavy-duty Chemical, Gas Industry Services, Power Plants, Utilities.

Selection Chart SCE-M

4 POLES



...y de diseño propio

CIRCUITOS DE ACEITE CALOPORTADOR:

- OPTIMIZACIÓN DEL AISLAMIENTO TÉRMICO:

- LANA DE ROCA 0,085 W/(Km) 150 €/m³
- REMATE DE CHAPA DE ALUMINIO 225 €/m²
- HORAS FUNCIONAMIENTO EQUIVALENTE 3000 h/año (0.10 €/kWh)

	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Aisl.+ remate (k€)	170.8	232.5	394.3	540.6
Pérdidas (k€/año)	81.9	53.7	35.8	30.6
Amortización (años)	--	2.2	4.85	7.21

© NRM 2012-2026 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

Bloque preliminar

Fin del bloque

© NRM 2012-2026 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca