



Optimización de plantas termosolares

Norberto Redondo Melchor
Doctor Ingeniero Industrial

1

Programa

- I. Primer bloque
 - 1. Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas
 - 2. La perspectiva de la modularidad
 - 3. El enfoque de bajo-coste
 - 4. Análisis de un prototipo modular
- II. Segundo bloque
 - 1. Fundamentos de captación de energía solar
- 2. Fundamentos de la conversión termoeléctrica
- 3. Optimización del uso del fluido de trabajo (I)
- III. Tercer bloque
 - 1. Optimización del uso del fluido de trabajo (II)
 - 2. Optimización del uso del fluido de trabajo (III)
- IV. Cuarto bloque
 - 1. Diseño virtual de prototipos
 - 2. Optimización de diseños

2

Bloque primero

1. Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas
 - a. Objetivos de rentabilidad y eficiencia
 - b. Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales
 - c. Alternativas y mejoras
2. La perspectiva de la modularidad
 - a. Ventajas e inconvenientes de la modularidad
 - b. Estimación de costes y beneficios
- c. Prototipos
3. El enfoque de bajo-coste
 - a. Dispositivos de concentración solar
 - b. Conversión termoeléctrica
 - c. Supproductos valorizables
4. Análisis de un prototipo modular
 - a. Esquema de principio
 - b. Estimaciones termodinámicas
 - c. Análisis coste - beneficio y rentabilidad
 - d. Tecnología empleada

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

3

Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas

Objetivos de rentabilidad y eficiencia

Enfoque clásico:

- Máximo rendimiento termodinámico
- Máxima eficiencia en el proceso
- Máxima capacidad de la planta
- Máxima rentabilidad

Enfoque alternativo:

- Máximo rendimiento termodinámico
- Máxima eficiencia en el proceso
- Máxima capacidad de la planta
- Máxima rentabilidad

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

4

Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas

Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales

Configuraciones habituales:

- Colectores planos tipo Eurotrough
- Torre central



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

5

Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas

Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales

Instalaciones de colectores planos:

- Espejos cilindro parabólicos
- Turbina única
- Tamaño único 50 MW
- Hibridación con gas natural
- Elevadas temperaturas y presiones de trabajo (100 bar, 400°C)

Almacenamiento en sales fundidas



RD 667/2007

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

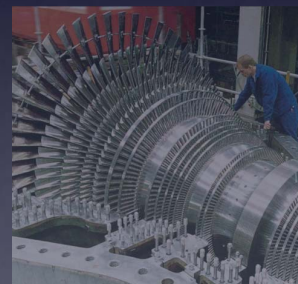
6

Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas

Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales

Espejos cilindro parabólicos

- Diseño comprobado
- Eficacia comprobada
- Financiación asegurada
- Complejidad de instalación
- Problemas de orientación
- Coste elevado



RD 667/2007

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

7

Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas

Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales

Turbina única:

- Diseño comprobado
- Eficacia comprobada
- Financiación asegurada
- Dificultades de arranque y parada
- Componente crítico para la planta
- Instalaciones auxiliares complicadas
- Altas necesidades de mantenimiento
- Coste elevado



RD 667/2007

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

8

Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas

Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales

Tamaño único (50 MW):

- Optimiza la inversión
- Eficacia comprobada
- Financiación asegurada
- Grandes extensiones del campo solar
- Abundante demanda de agua
- Importante infraestructura de conexión a red
- Dificultades de gestión



RD 667/2007

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

9

Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas

Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales

Hibridación con gas natural:

- Optimiza el rendimiento
- Tecnología convencional
- Financiación asegurada
- Problemas de optimización de producción
- Disminuye la rentabilidad de la planta
- Reduce el atractivo “renovable”



RD 667/2007

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

10

Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas

Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales

Elevadas temperaturas de trabajo:

- Incrementa el rendimiento termodinámico
- Financiación asegurada
- Requiere equipos especiales
- Requiere materiales específicos
- Incrementa los costes de mantenimiento
- Introduce graves riesgos de seguridad para las personas



RD 667/2007

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

11

Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas

Alternativas y opciones de mejora

Reducción de costes

Enfoque clásico:

- Optimización tecnológica de equipos existentes
- Mejoras en materiales
- Investigación química
- Modelos termodinámicos
- Herramientas de simulación
- Modelos de predicción atmosférica

Enfoque alternativo:

- Cambio de sistemas
 - Colectores solares
 - Bloque de potencia
 - Almacenamiento térmico
- Búsqueda de alternativas
- Generación directa de vapor
- Diseño modular
- Aplicaciones adicionales

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

12

Bloque primero

1. Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas
 - a. Objetivos de rentabilidad y eficiencia
 - b. Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales
 - c. Alternativas y mejoras
2. La perspectiva de la modularidad
 - a. Ventajas e inconvenientes de la modularidad
 - b. Estimación de costes y beneficios
- c. Prototipos
3. El enfoque de bajo-coste
 - a. Dispositivos de concentración solar
 - b. Conversión termoeléctrica
 - c. Supproductos valorizables
4. Análisis de un prototipo modular
 - a. Esquema de principio
 - b. Estimaciones termodinámicas
 - c. Análisis coste - beneficio y rentabilidad
 - d. Tecnología empleada

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

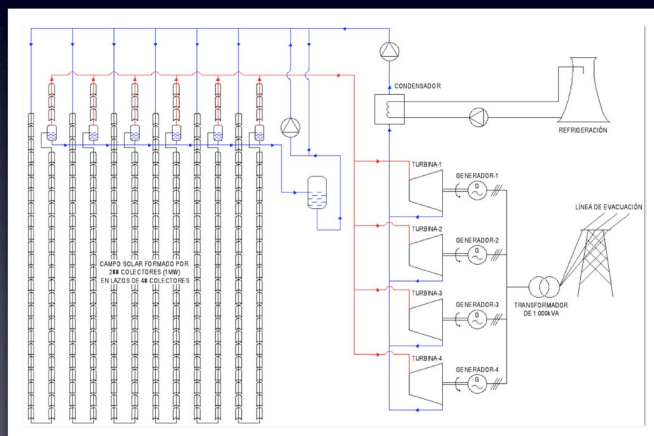
13

La perspectiva de la modularidad

Ventajas e inconvenientes de la modularidad

Ventajas:

- Componentes de pequeño tamaño
- Eficacia del aprovechamiento a baja irradiación solar
- Innecesaria hibridación con gas
- Flexibilidad de la gestión
- Tamaño escalable
- Replicabilidad
- Adaptación al entorno
- Integración con procesos industriales



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

14

La perspectiva de la modularidad

Estimación de costes y beneficios

Costes de desarrollo ↑↑ :

- Sistema de colectores
- Bloque de conversión termoeléctrica
- Sistema de gestión y control
- Métodos de refrigeración

Inversión necesaria ⇔ :

- Equipos modulares ↑↑
- Enfoque bajo coste ↓↓
- Eliminación instalación gas ↓↓

Ingresos por venta de energía ↑↑ :

- Simplicidad de gestión ↑↑
- Eliminación coste gas ↑↑

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

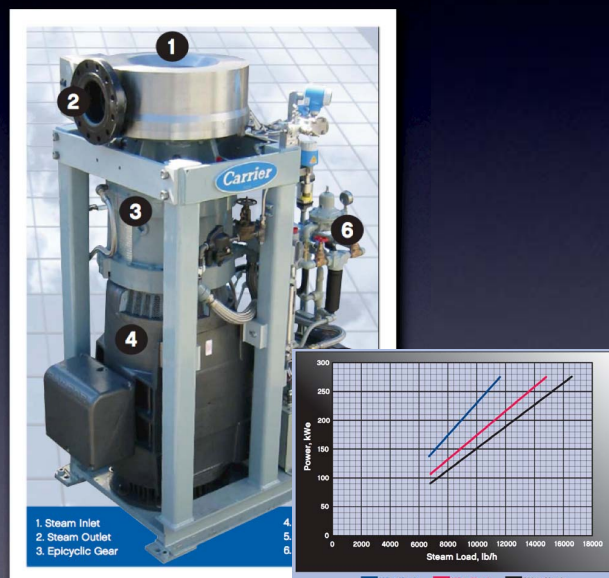
15

La perspectiva de la modularidad

Prototipos

Microturbina de vapor de agua:

- $P_n \leq 275 \text{ kW}$
- Bloque turbina - alternador
- Elevada eficiencia $\geq 80\%$
- Gran fiabilidad y robustez
- Instalación “llegar y enchufar”
- Funcionamiento simple
- $0.14 \leq p \leq 13.8 \text{ bar g}$
- $100 \leq T \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

16

La perspectiva de la modularidad

Prototipos

Microturbina de vapor de refrigerante:

- $200 \leq S_n \leq 250$ kW
- R245fa (pentafluoropropano)
- Bloque turbina - alternador
- Instalación “llegar y enchufar”
- Funcionamiento simple
- $90 \leq T \leq 150$ °C agua



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

17

Bloque primero

1. Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas
 - a. Objetivos de rentabilidad y eficiencia
 - b. Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales
 - c. Alternativas y mejoras
2. La perspectiva de la modularidad
 - a. Ventajas e inconvenientes de la modularidad
 - b. Estimación de costes y beneficios
3. El enfoque de bajo-coste
 - a. Dispositivos de concentración solar
 - b. Conversión termoeléctrica
 - c. Supproductos valorizables
4. Análisis de un prototipo modular
 - a. Esquema de principio
 - b. Estimaciones termodinámicas
 - c. Análisis coste - beneficio y rentabilidad
 - d. Tecnología empleada

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

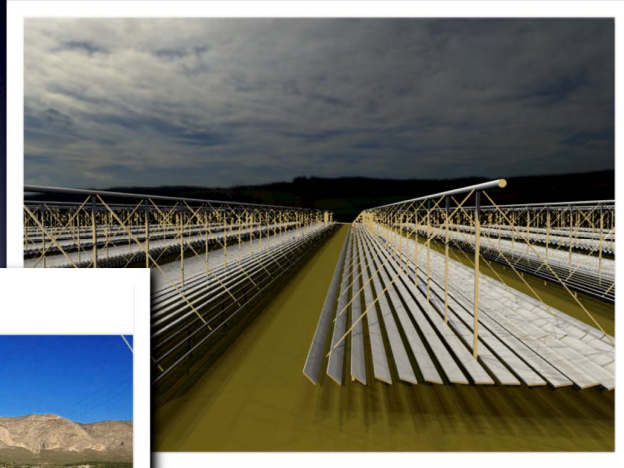
18

El enfoque de bajo coste

Dispositivos de concentración solar

Concentradores planos
tipo Fresnel

Generación directa de
vapor



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

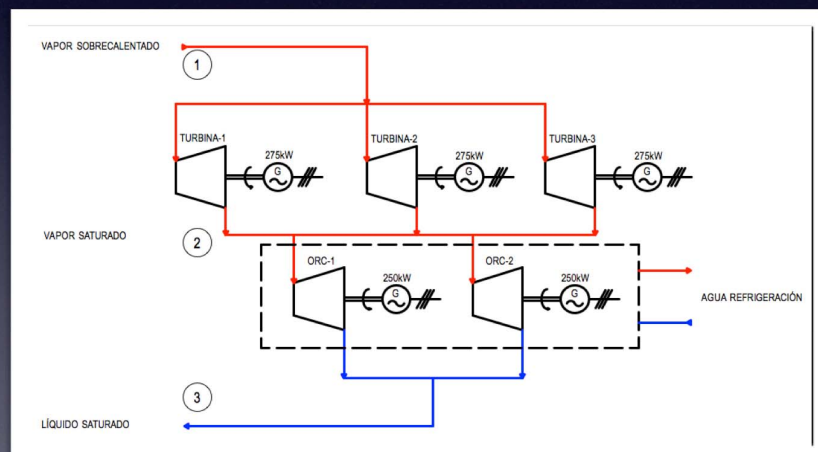
19

El enfoque de bajo coste

Conversión termoeléctrica

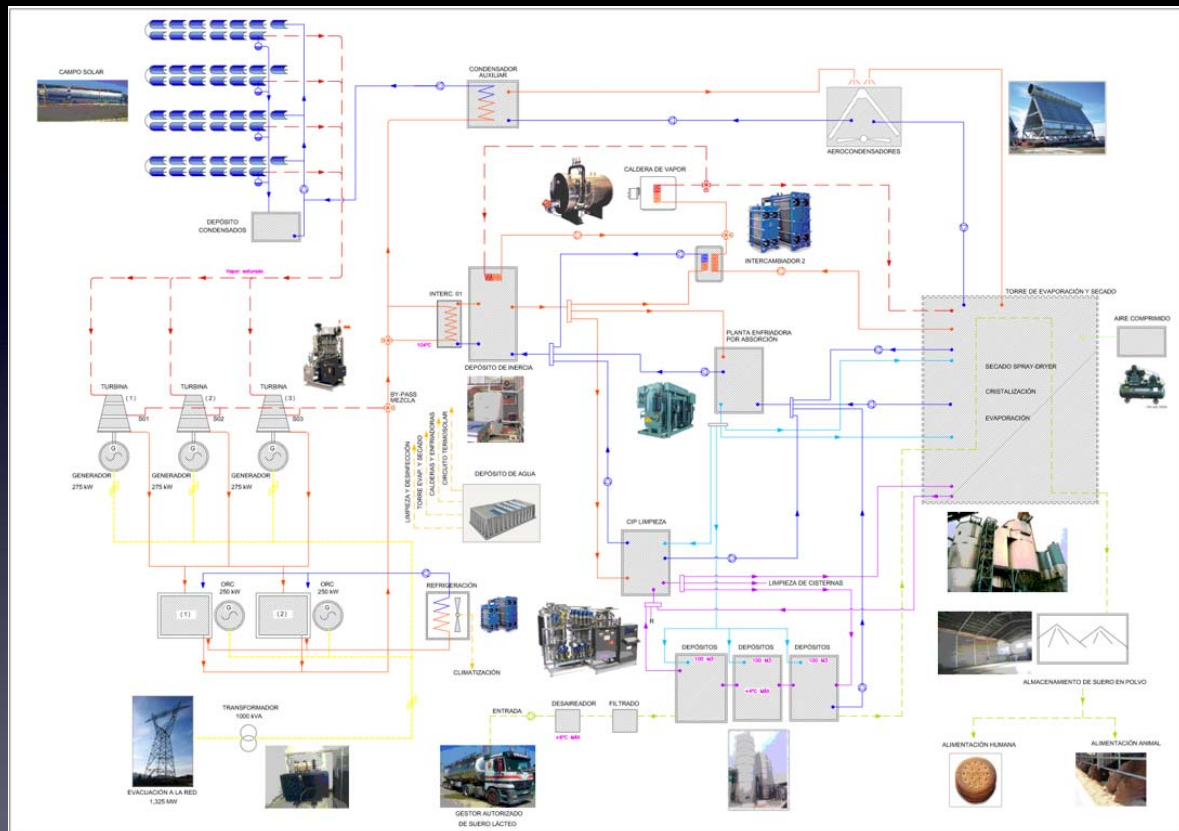
Ciclo de vapor de agua

Ciclo de vapor de refrigerante orgánico (ORC)



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

20



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

21

Bloque primero

1. Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas
 - a. Objetivos de rentabilidad y eficiencia
 - b. Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales
 - c. Alternativas y mejoras
2. La perspectiva de la modularidad
 - a. Ventajas e inconvenientes de la modularidad
 - b. Estimación de costes y beneficios
3. El enfoque de bajo-coste
 - a. Dispositivos de concentración solar
 - b. Conversión termoelectrica
 - c. Supproductos valorizables
4. Análisis de un prototipo modular
 - a. Esquema de principio
 - b. Estimaciones termodinámicas
 - c. Análisis coste - beneficio y rentabilidad
 - d. Tecnología empleada

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

22

Análisis de un prototipo modular

Esquema de principio

Vapor sobrecalentado

$$P_n = 1.325 \text{ MW}$$

$$2300 \leq t_a \leq 2550 \text{ h}$$

Campo solar

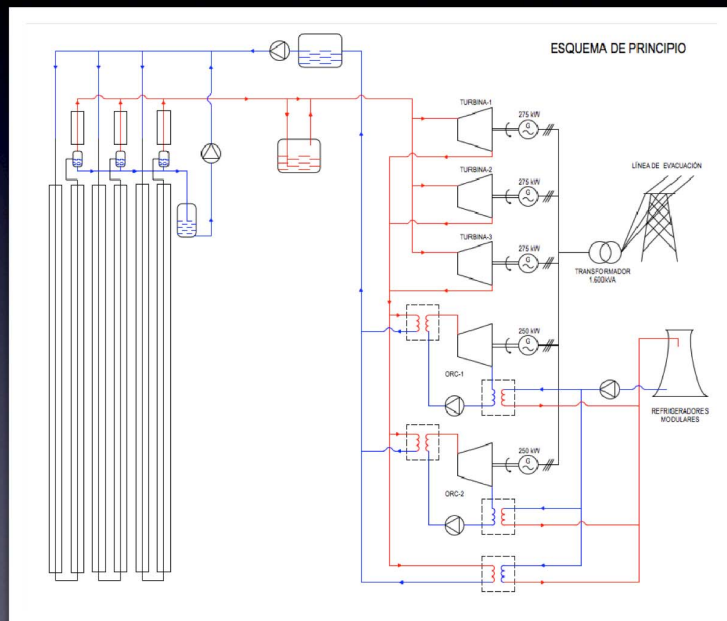
260°C / 30 bar

25°C recalentamiento

Turbinas

235°C / 15 bar

33°C recalentamiento



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

23

Análisis de un prototipo modular

Esquema de principio

Vapor justamente saturado

$$P_n = 1.325 \text{ MW}$$

$$2300 \leq t_a \leq 2550 \text{ h}$$

Campo solar

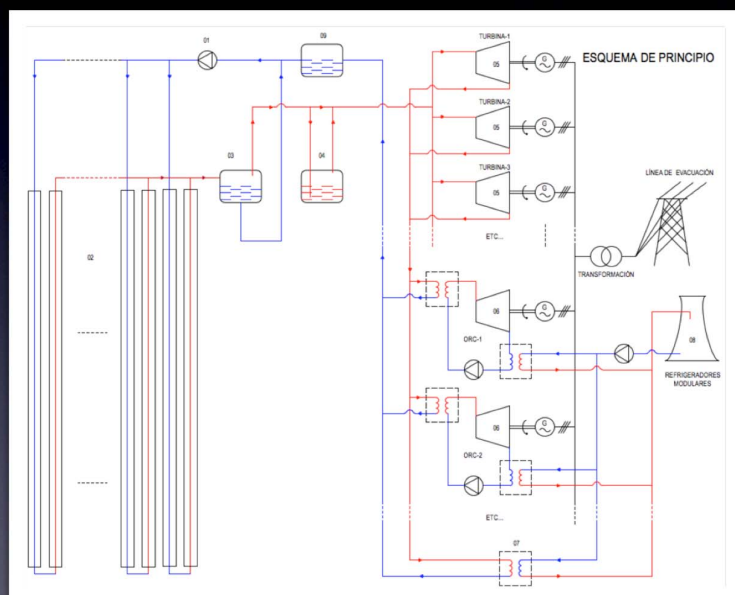
235°C / 30 bar

0°C recalentamiento

Turbinas

202°C / 15 bar

0°C recalentamiento



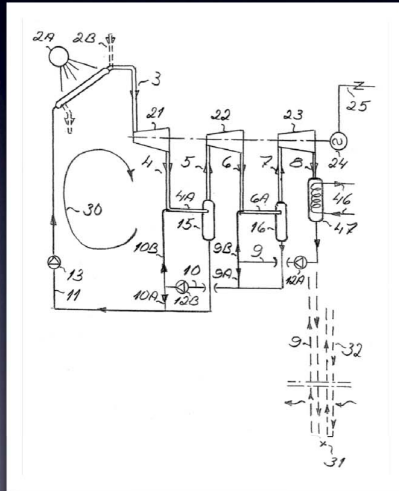
© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

24

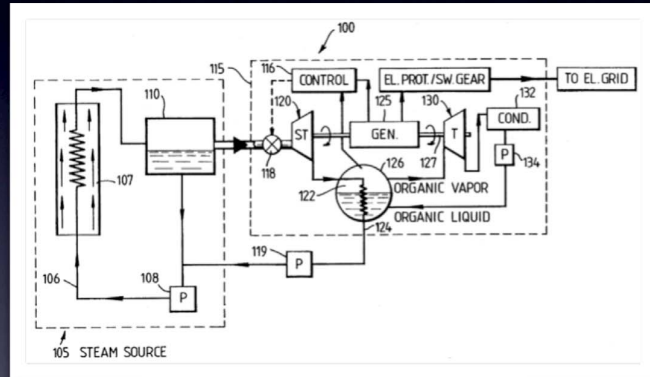
Análisis de un prototipo modular

Esquema de principio

Patente WO2009014480



Patente US5467624



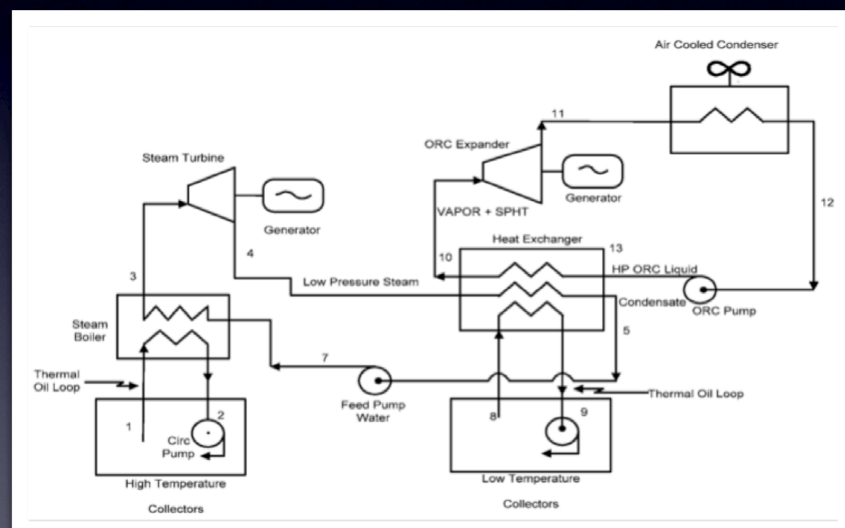
© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

25

Análisis de un prototipo modular

Esquema de principio

Patente WO2010022184



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

26

Análisis de un prototipo modular

Esquema de principio

Patente solicitada Universidad de Salamanca

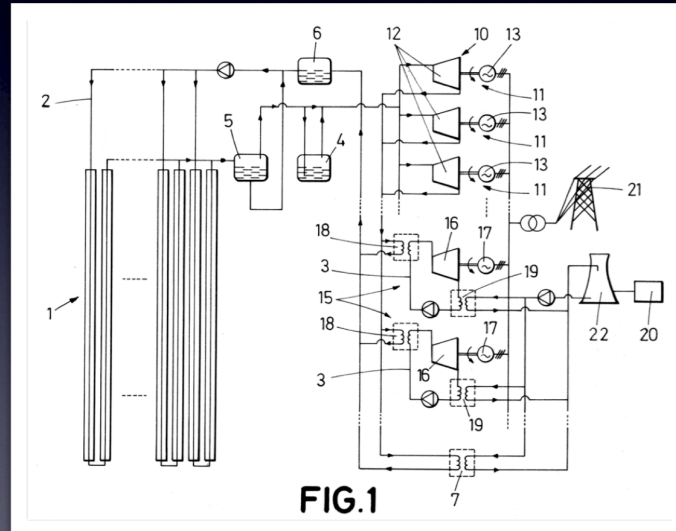


FIG.1

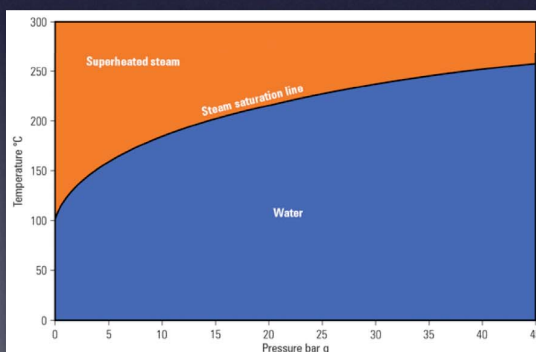
© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

27

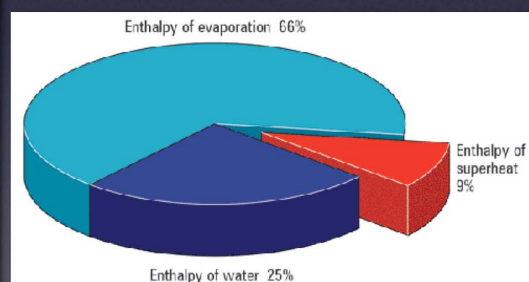
Análisis de un prototipo modular

Estimaciones termodinámicas

Diagrama presión - temperatura del vapor



Contenido entálpico del vapor sobrecalentado a 10 bar g y 300°C

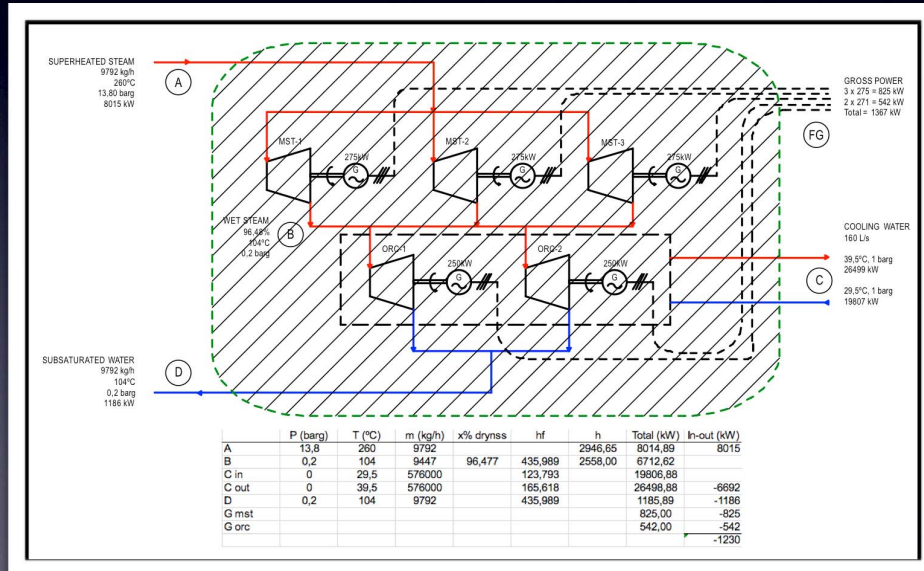


© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

28

Análisis de un prototipo modular

Estimaciones termodinámicas



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

29

Análisis de un prototipo modular

Estimaciones termodinámicas

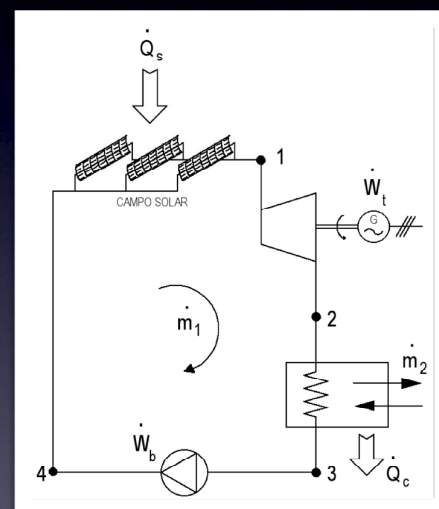
$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}_e (h_e - h_s) = 0$$

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_1 (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_s - \dot{W}_t + \dot{W}_b$$

$$\dot{W}_b = \dot{m}_1 (h_4 - h_3) \quad h_4 = h_3 + v_3 (p_4 - p_3)$$

$$\eta_c = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4}$$



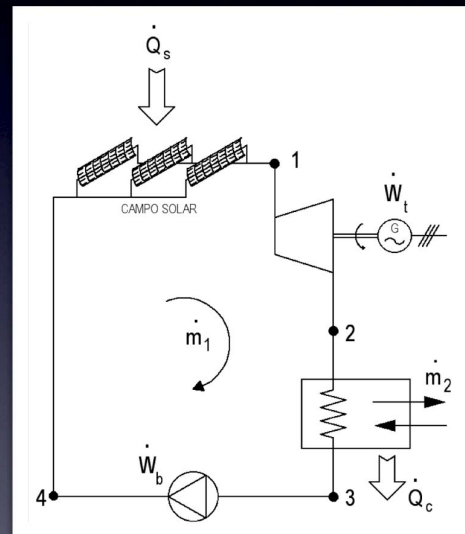
© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

30

Análisis de un prototipo modular

Estimaciones termodinámicas

1	P	200 psig	14.79 bar
	T	500°F	260.00°C
	h		2946.8 kJ/kg
2	P	3 psig	1.21 bar
	T	220°F	104.44°C
	x		88,89%
	h		2444.2 kJ/kg
3	P	3 psig	1.21 bar
	T	220°F	104.44°C
	h		437.9 kJ/kg
	v		0.0010469 m³/kg
4	P	200 psig	16.27 bar
	T	220°F	104.44°C
	h		439.4 kJ/kg



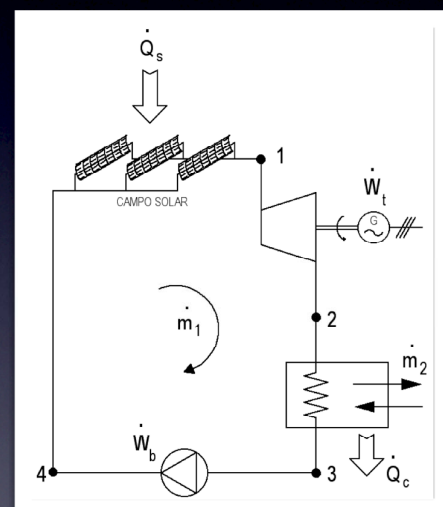
© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

31

Análisis de un prototipo modular

Estimaciones termodinámicas

\dot{Q}_s	campo solar	-6 819.97 kW
\dot{W}_t	turbina	1 325.00 kW
\dot{W}_b	bomba	-4.29 kW
\dot{Q}_c	condensador	5 457.26 kW
η_c	rendimiento del ciclo	19,98%



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

32

Análisis de un prototipo modular

Análisis coste - beneficio y rentabilidad

Estimación de la producción anual

Irradiación media diaria en una superficie perpendicular a los rayos solares (W/m2)
41°N

Fuente: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) © European Communities, 1995-2009

U. T.	En	Feb	Ma	Abr	Ma	Jun	Jul	Ag	Se	Oct	No	Dic
4:52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:07	0	0	0	0	0	74	0	0	0	0	0	0
5:22	0	0	0	0	67	152	117	0	0	0	0	0
5:37	0	0	0	0	141	250	215	0	0	0	0	0
5:52	0	0	0	0	236	326	312	121	0	0	0	0
6:07	0	0	0	121	305	393	389	230	0	0	0	0
6:22	0	0	0	210	364	451	456	333	61	0	0	0
6:37	0	0	102	282	415	501	513	415	147	0	0	0
6:52	0	0	203	338	458	546	563	485	257	0	0	0
7:07	0	0	320	385	496	584	606	545	341	86	0	0
7:22	0	98	394	424	529	618	643	597	413	172	0	0
7:37	0	179	453	458	557	647	676	641	474	263	0	0
7:52	99	261	502	487	581	672	703	679	525	329	111	0
8:07	171	316	542	512	603	694	727	711	569	383	182	95
8:22	247	361	575	533	621	713	748	739	606	429	242	146
8:37	298	399	603	552	636	729	765	762	638	468	287	197
8:52	338	430	626	567	649	742	780	782	666	500	325	228
9:07	370	457	646	581	660	753	792	799	689	528	356	254
9:22	397	479	663	592	669	763	802	813	709	552	383	276
9:37	420	498	677	601	677	770	810	825	725	572	405	294
9:52	439	514	689	609	683	776	817	834	739	589	425	310
10:07	455	528	698	615	688	781	822	842	751	603	441	323
10:22	469	539	706	620	691	785	826	848	761	615	455	334

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

33

Análisis de un prototipo modular

Análisis coste - beneficio y rentabilidad

Estimación de la producción anual

$$\frac{\dot{Q}_s \text{ campo solar}}{\dot{W}_t \text{ turbina}} = \frac{-2 \text{ 273.32 kW}}{441.67 \text{ kW}}$$

U. T.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5:37	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-
5:52	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-
6:07	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-
6:22	-	-	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-
6:37	-	-	-	1	1	2	2	1	-	-	-	-
6:52	-	-	1	1	1	2	2	2	1	-	-	-
7:07	-	-	1	1	1	2	2	2	1	-	-	-
7:22	-	-	1	1	2	2	2	2	1	-	-	-
7:37	-	-	1	1	2	2	2	2	1	1	-	-
7:52	-	1	2	1	2	2	2	2	2	1	-	-
8:07	-	1	2	1	2	2	2	2	2	1	-	-
8:22	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	-
8:37	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	-
8:52	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	-
9:07	1	1	2	2	2	2	2	3	2	2	1	1
9:22	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
9:37	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
9:52	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
10:07	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
10:22	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
10:37	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
10:52	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
11:07	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
11:22	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
11:37	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
11:52	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1

U. T.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
12:22	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
12:37	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
12:52	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
13:07	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
13:22	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
13:37	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
13:52	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
14:07	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
14:22	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
14:37	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
14:52	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
15:07	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2	1	1
15:22	1	1	2	2	2	2	2	3	2	2	1	1
15:37	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	-
15:52	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	-
16:07	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	-
16:22	-	1	2	1	2	2	2	2	2	1	-	-
16:37	-	1	2	1	2	2	2	2	2	1	-	-
16:52	-	-	1	1	2	2	2	2	2	1	-	-
17:07	-	-	1	1	2	2	2	2	2	1	-	-
17:22	-	-	1	1	1	2	2	2	2	1	-	-
17:37	-	-	1	1	1	2	2	2	2	1	-	-
17:52	-	-	-	1	1	2	2	2	2	1	-	-
18:07	-	-	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-
18:22	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-
18:37	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-
18:52	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-
19:07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19:22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	8,0	13,5	20,0	20,0	23,0	25,0	31,0	30,0	20,0	16,0	8,0	6,5
Total	248	378	620	600	713	750	961	930	600	496	240	202

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

34

Análisis de un prototipo modular

Análisis coste - beneficio y rentabilidad

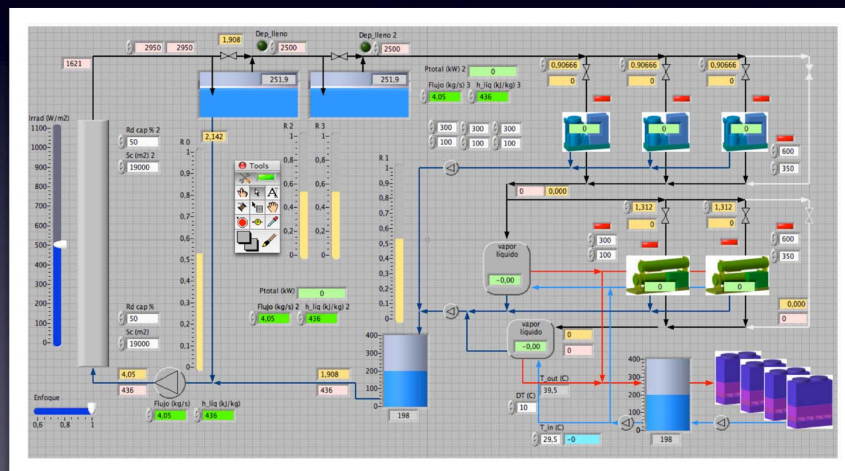
Potencia eléctrica instalada (MW)	1,325
Nº turbinas ideales (441.7 kW)	3
Total horas func. anual (media turbinas)	2.317
Producción anual (MWh/año)	3.070

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

35

Análisis de un prototipo modular

Análisis coste - beneficio y rentabilidad



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

36

Análisis de un prototipo modular

Tecnología empleada



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

37

Análisis de un prototipo modular

Tecnología empleada



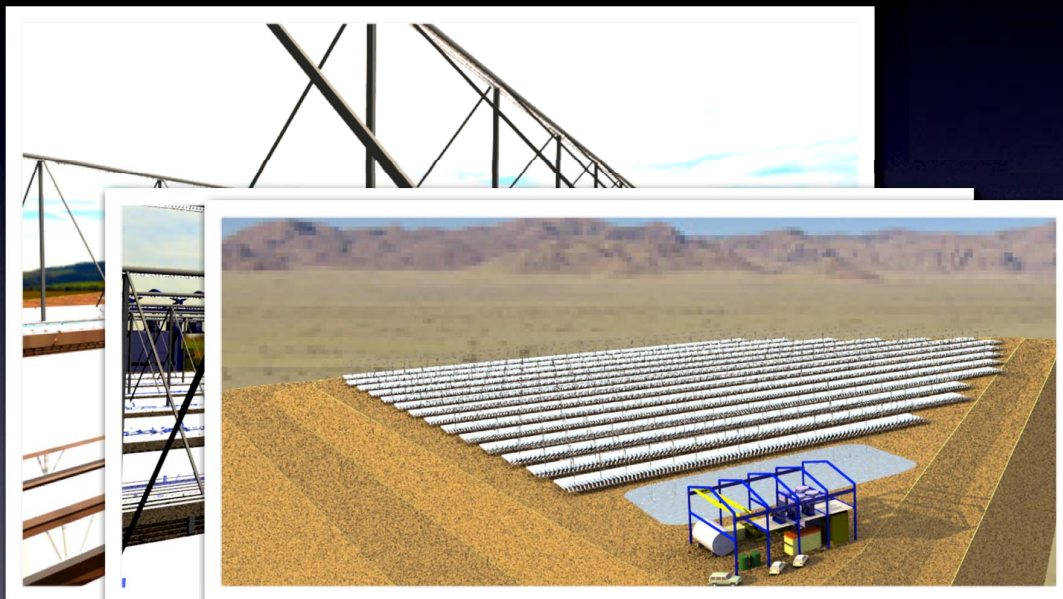
© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

38

Análisis de un prototipo modular

Tecnología empleada

Bloque 1.325 MW



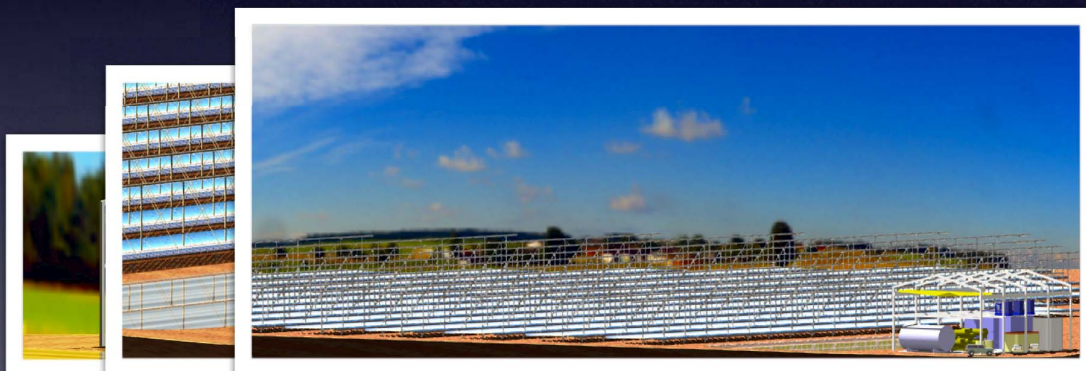
© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

39

Análisis de un prototipo modular

Tecnología empleada

Bloque 1.325 MW



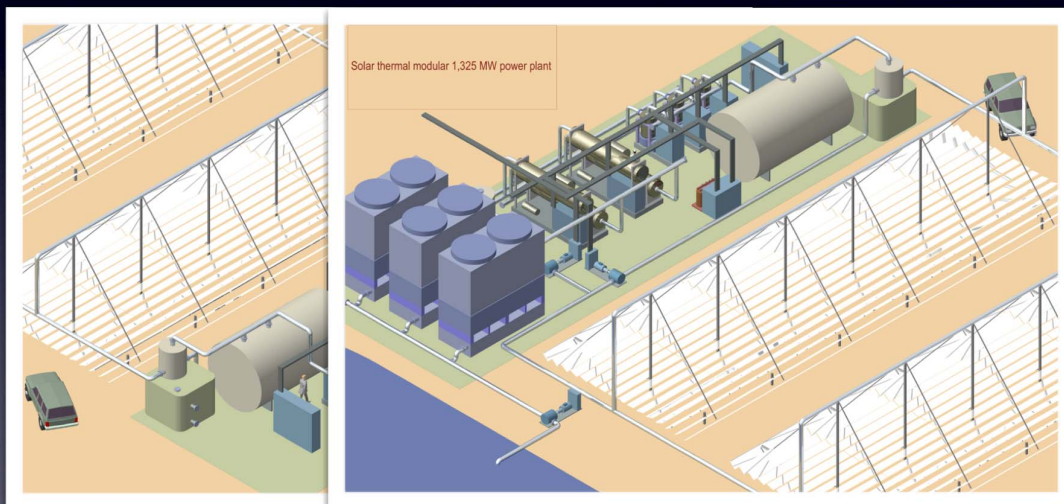
© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

40

Análisis de un prototipo modular

Tecnología empleada

Bloque 1.325 MW



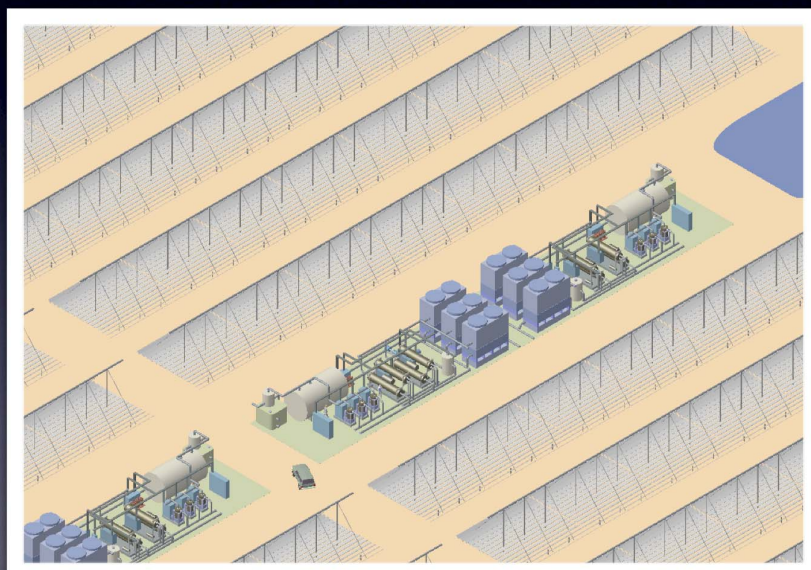
© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

41

Análisis de un prototipo modular

Tecnología empleada

2 bloques de 1.325 MW



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

42

Análisis de un prototipo modular

Tecnología empleada

Varios bloques de 1.325 MW



© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

43

Bloque primero

1. Optimización de plantas termosolares: enfoque y propuestas
 - a. Objetivos de rentabilidad y eficiencia
 - b. Ventajas e inconvenientes de los diseños habituales
 - c. Alternativas a ellos
2. La perspectiva de la modularidad
 - a. Ventajas e inconvenientes de la modularidad
 - b. Estimación de costes y beneficios
 - c. Prototipos
3. El enfoque de bajo-coste
 - a. Dispositivos de concentración solar
 - b. Conversión termoelectrica
 - c. Supproductos valorizables
4. Análisis de un prototipo modular
 - a. Esquema de principio
 - b. Estimaciones termodinámicas
 - c. Análisis coste - beneficio y rentabilidad
 - d. Tecnología empleada

Fin bloque primero

© NRM 2012 - ETSII Béjar - Universidad de Salamanca

44