

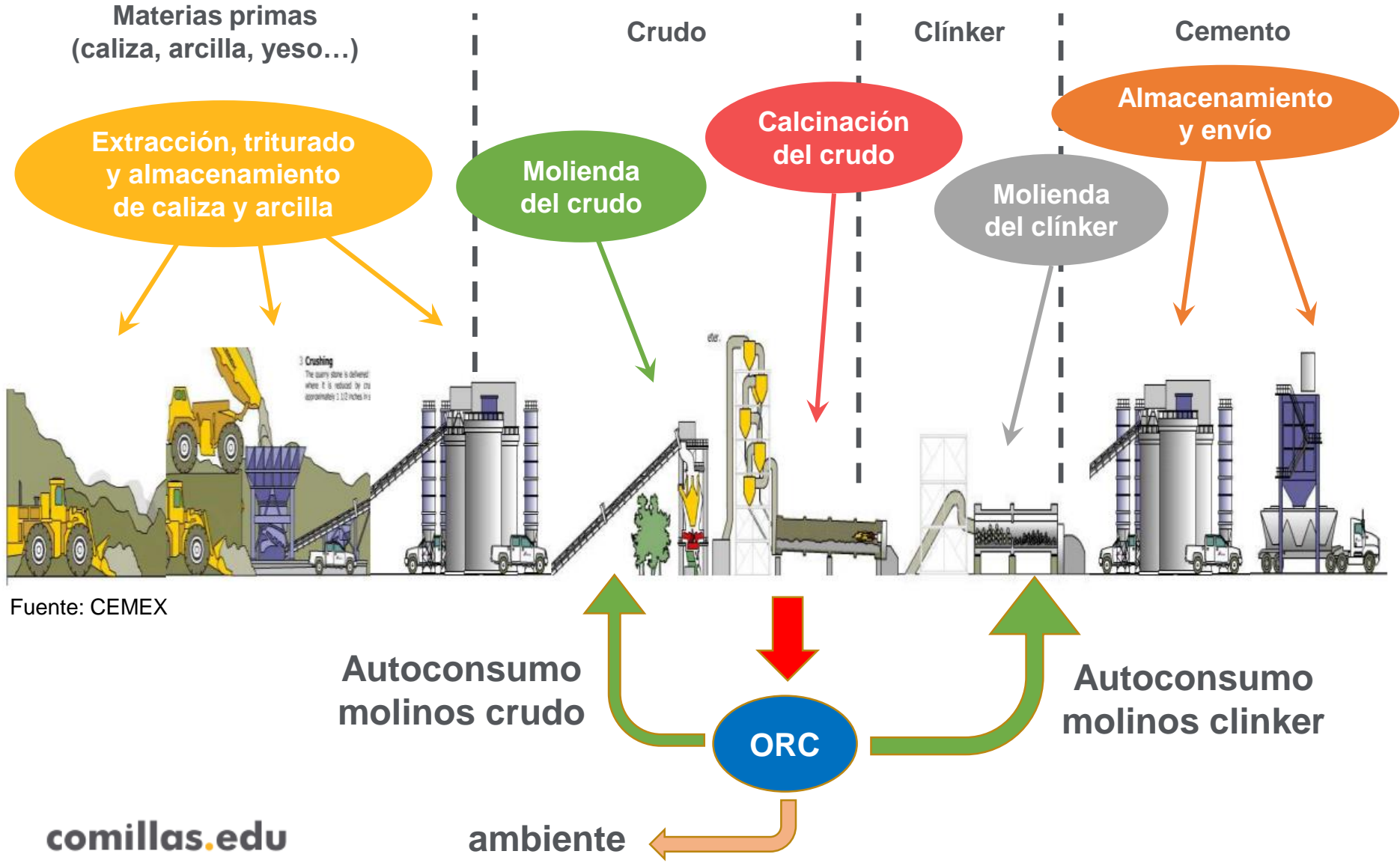
Recuperación de calores residuales mediante ciclo de Rankine orgánico (ORC)

José Ignacio Linares

Director de la Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética (Comillas – ICAI)



Recurso y consumo



Fuente: CEMEX

- Cogeneración por ciclo de cola
- Fuente: Gases de escape del horno
- Autoconsumo: molinos

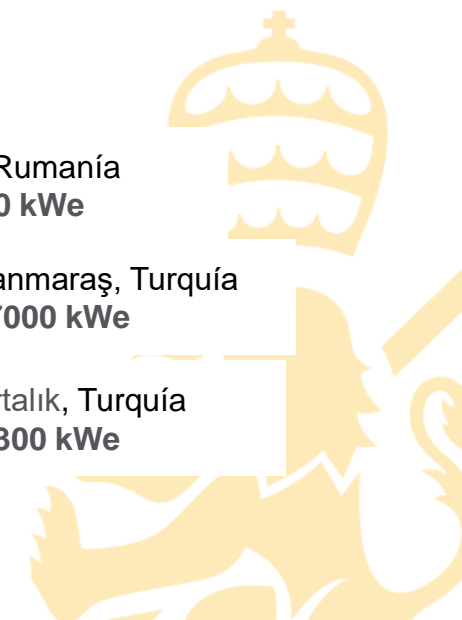
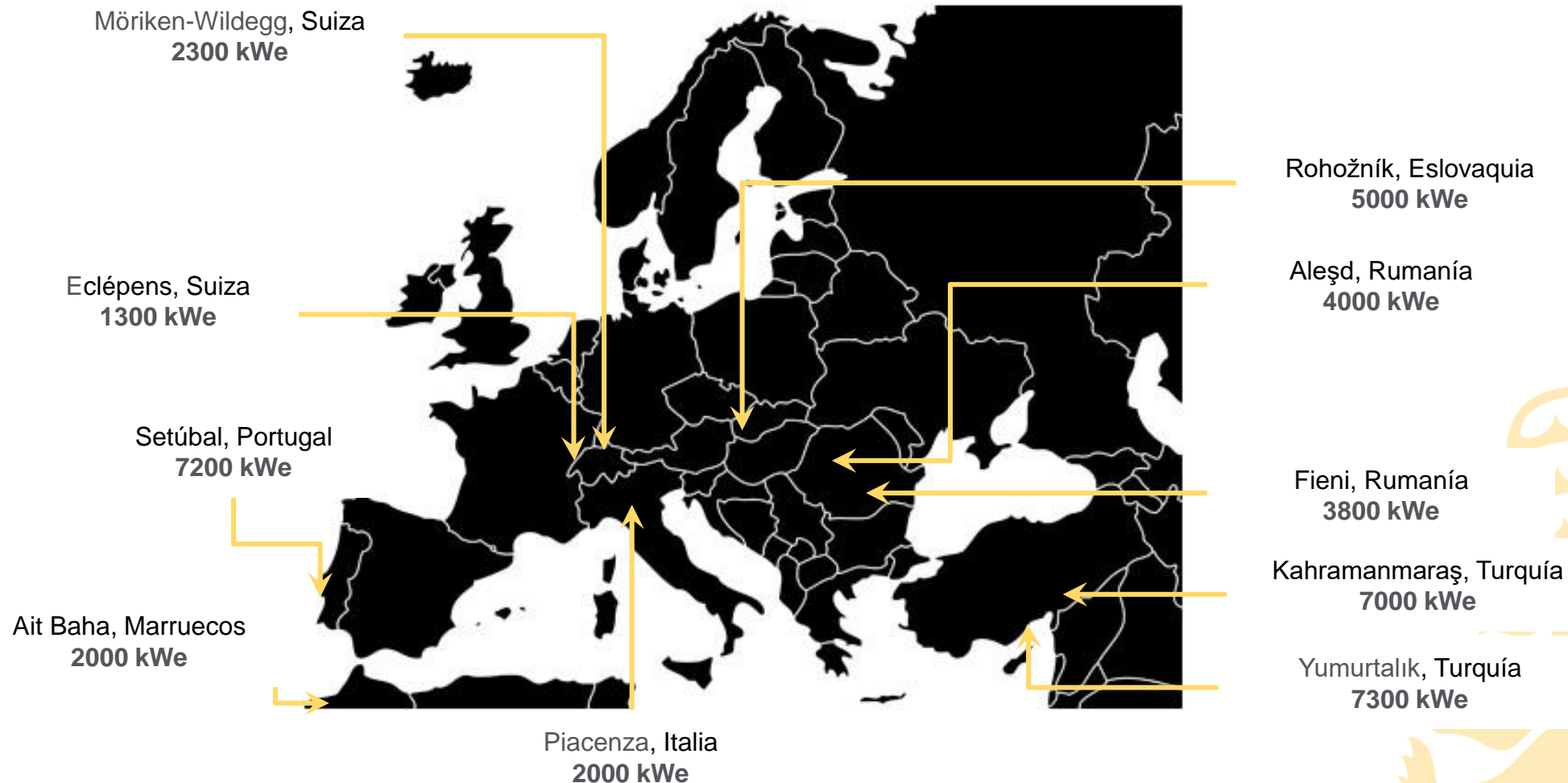


Descarbonización

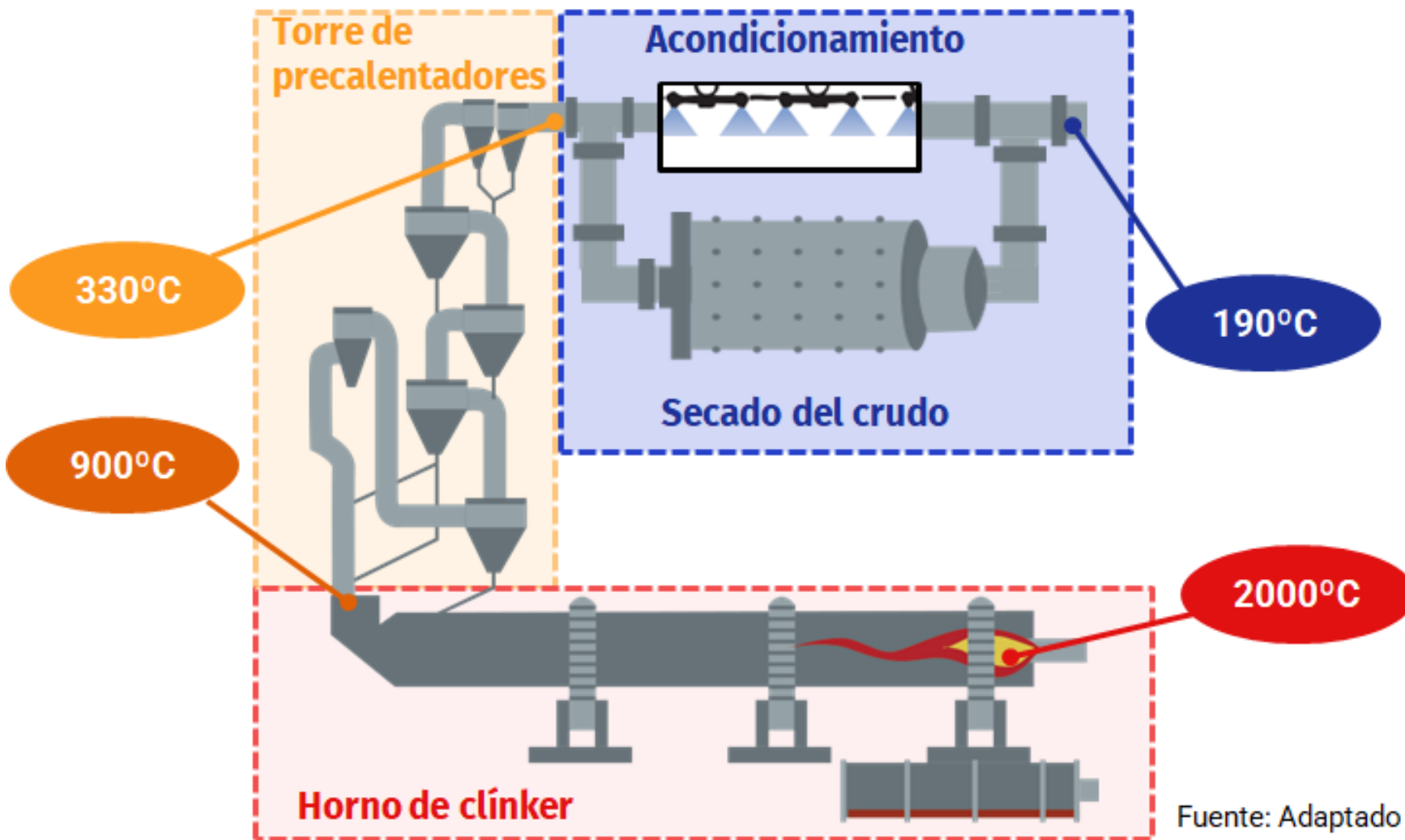
- La actuación se integra en el **Alcance 2**: emisiones indirectas debido al uso de energía final
- Podría actuarse mediante un PPA de renovables
- Si el Sistema resulta viable, el dinero ahorrado permitiría acometer otras inversiones para los Alcances 1 o 3.



Experiencias industriales en cementeras con ORC

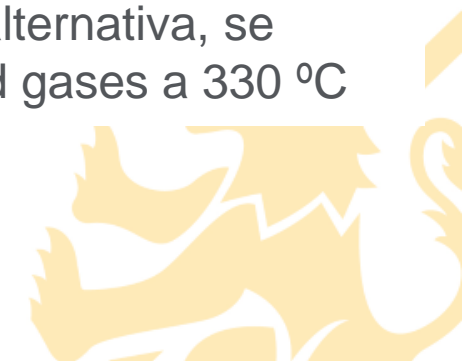


Aprovechamiento actual

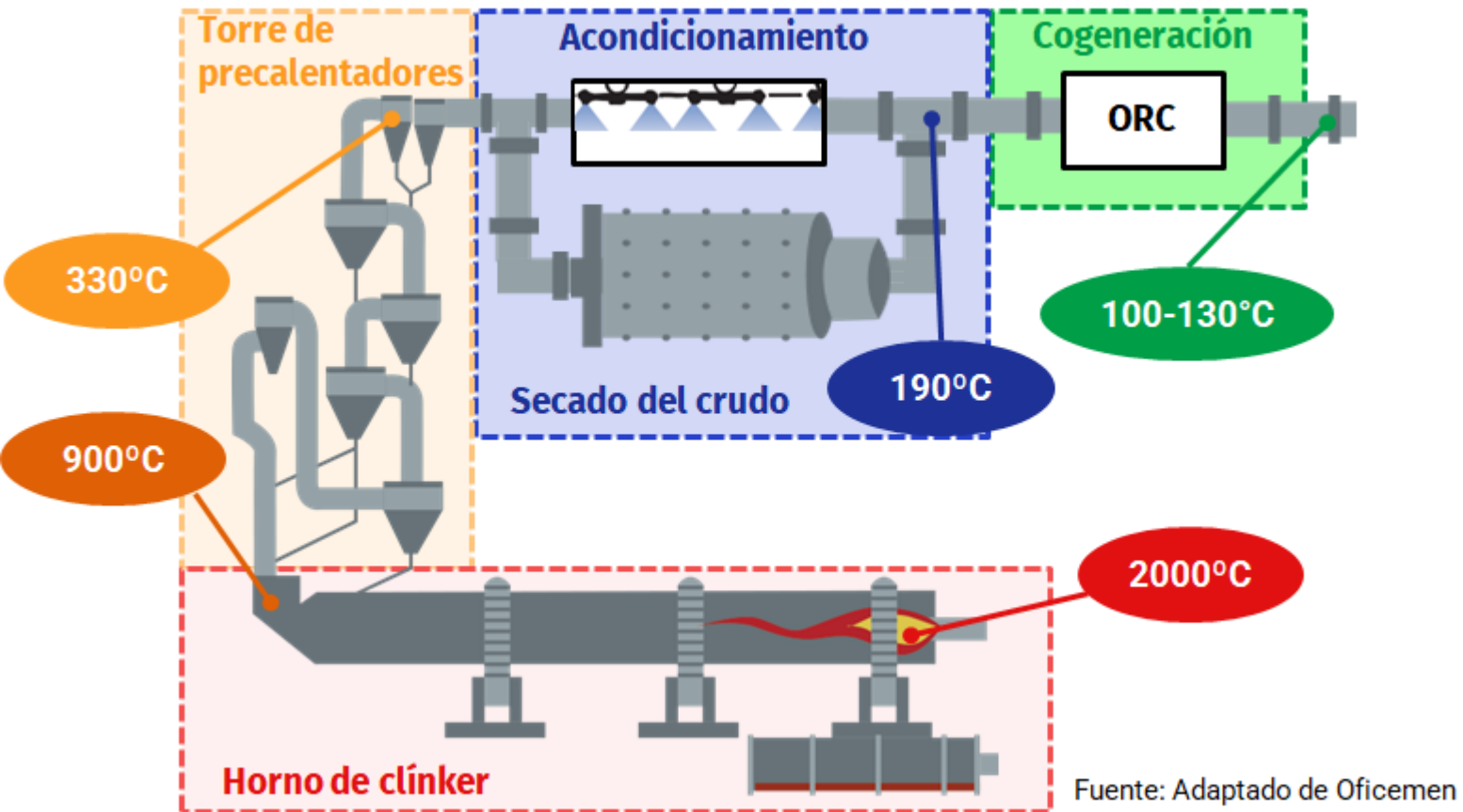


Fuente: Adaptado de Oficemen

- Actualmente parte de los gases se emplean para el secado del crudo, enfriando la parte no usada. Se están **evitando emisiones de Alcance 1**
- Si esa instalación no se modifica se dispone de gases a 190 °C
- Si se realiza el secado de manera alternativa, se dispone d gases a 330 °C



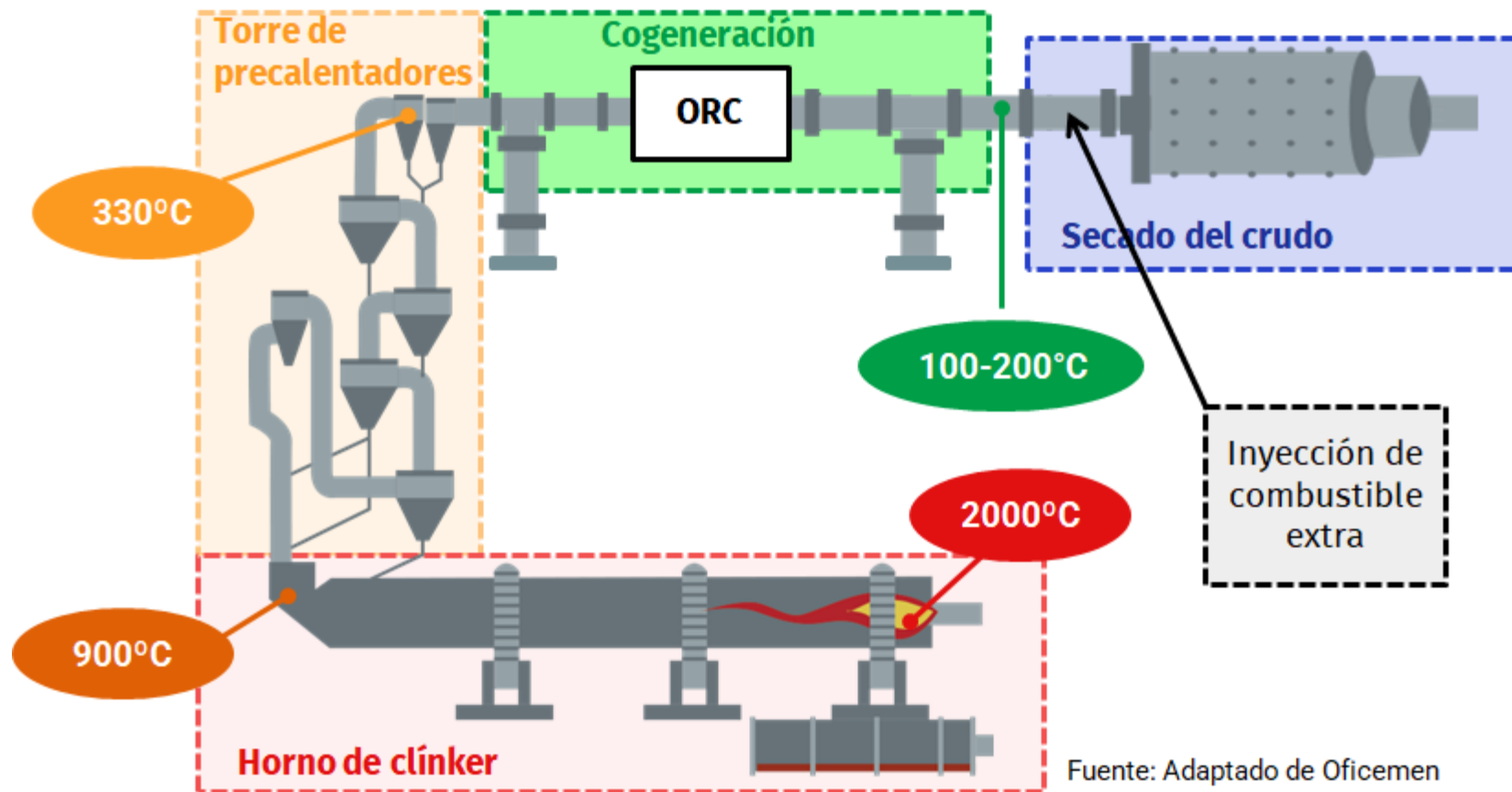
Integración ORC: escenario 190 °C



- Apenas hay modificación adicional
- Los gases se reciben a 190 °C
- Se recupera calor hasta varios subescenarios: 100 a 130 °C
- Se respeta la lucha en el Alcance 1 y se afronta el 2



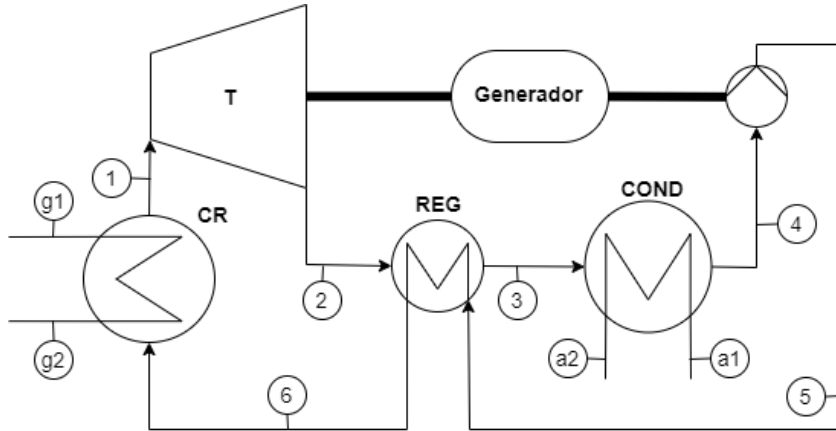
Integración ORC: escenario 330 °C



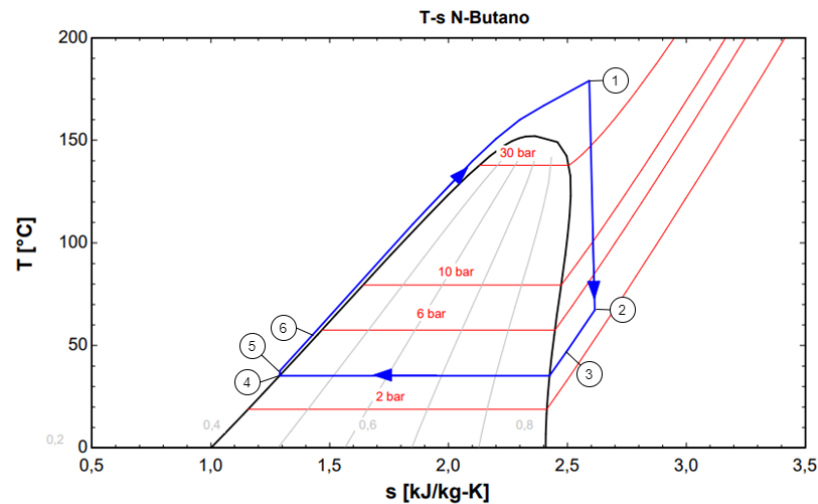
- Se reemplaza el calor del secado por un combustible adicional (**¿Alcance 1?**)
- Los gases se recuperan entre 330 °C y 100 a 200 °C
- Se requieren nuevas conexiones



Ciclo ORC

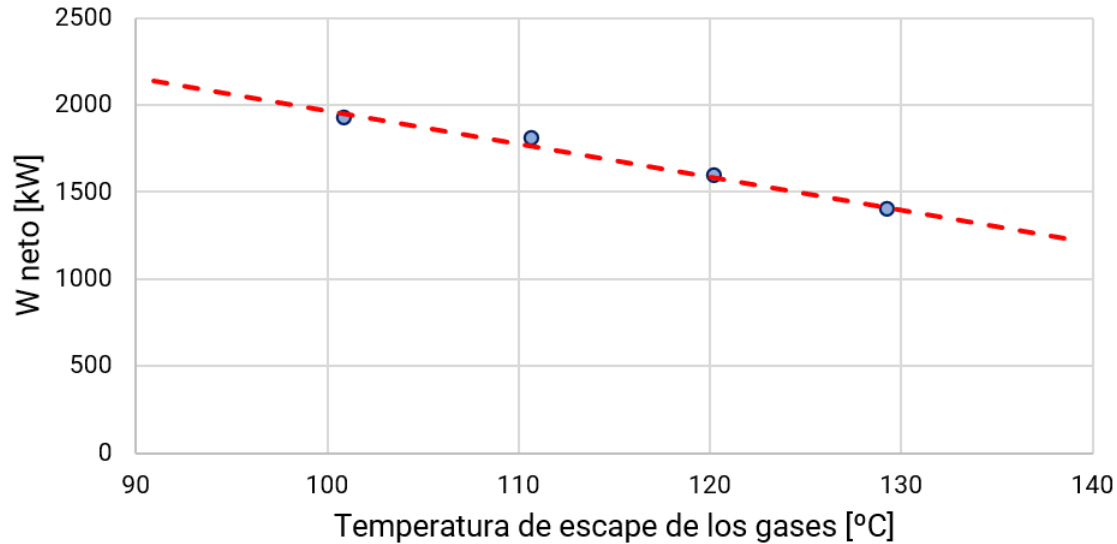


- Ciclo adaptado a temperaturas medias/bajas
- Fluido de trabajo: hidrocarburos o aceites (orgánicos)
- Expansión sin humedad en la turbina
- Se potencia la regeneración sin extracciones de vapor
- Facilidad para ciclos transcríticos
- Ausencia de desgasificador

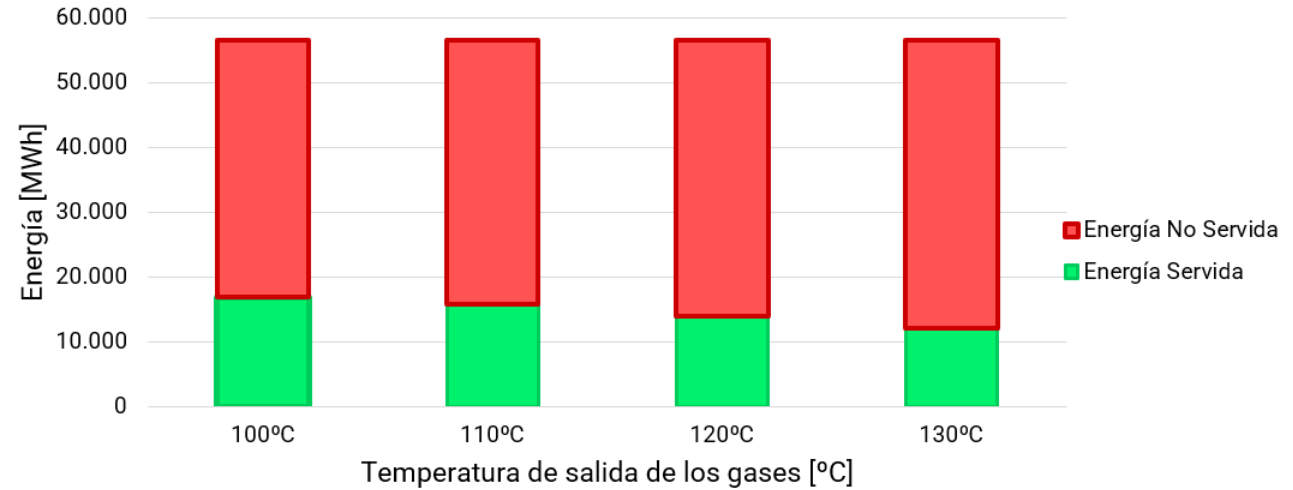


- Fluido: n-butano
- Entrada en turbina: 50 bar
- Salida turbina: 3,3 bar

Potencia - Temperatura



Balance de energías



- Rango de variación: > 100 °C por condensaciones ácidas; < 130 °C por aprovechamiento de calor
- Producción entre **1,9 y 1,4 MWe** (rango comparable a experiencias europeas)
- Cobertura de la demanda de la fábrica entre **20 y 30%**

Resultados 190 °C

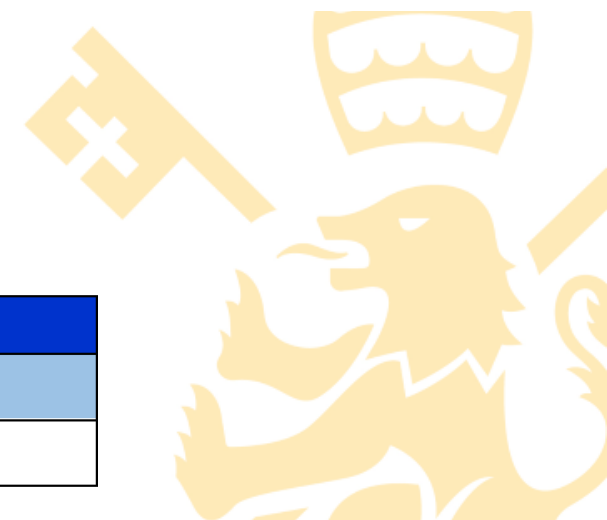
≈ 500.000 ton cemento/año

TIR		Tarifa eléctrica [€/MWh]							
		50	75	100	125	150	175	200	225
Temperatura [°C]	100	11,21%	18,28%	24,52%	30,43%	36,19%	41,87%	47,52%	53,15%
	110	10,97%	17,98%	24,16%	30,00%	35,68%	41,28%	46,85%	52,40%
	120	10,56%	17,47%	23,55%	29,27%	34,82%	40,30%	45,73%	51,15%
	130	10,08%	16,89%	22,85%	28,43%	33,85%	39,17%	44,46%	49,72%

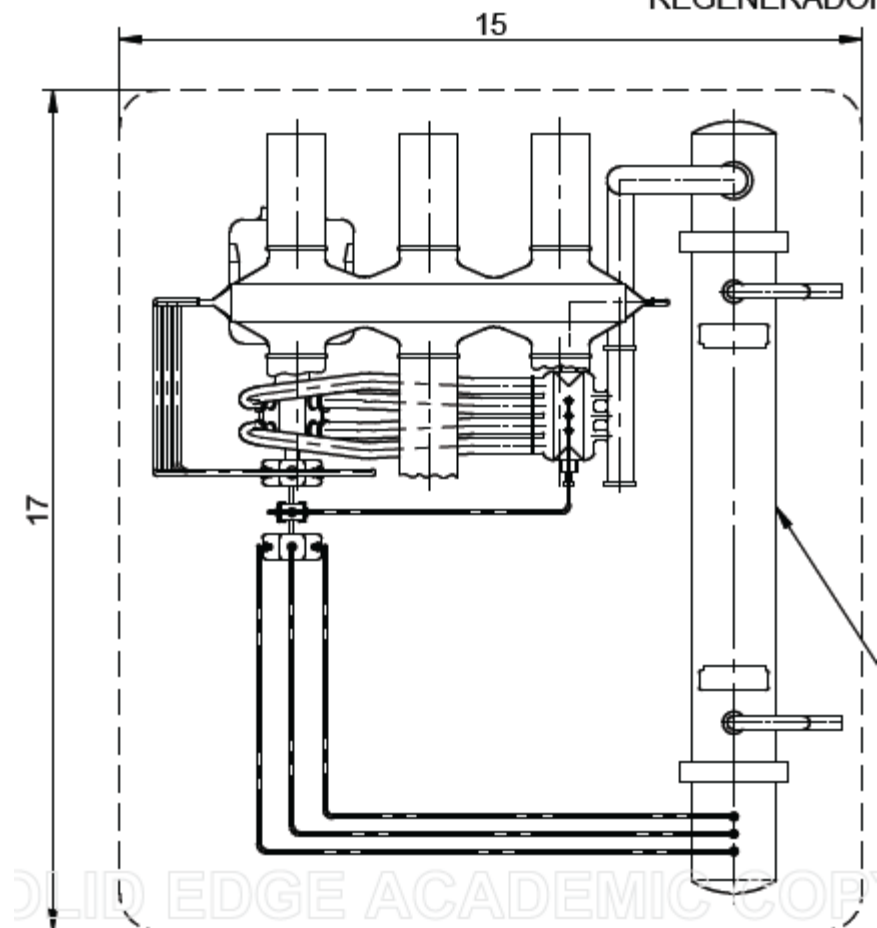
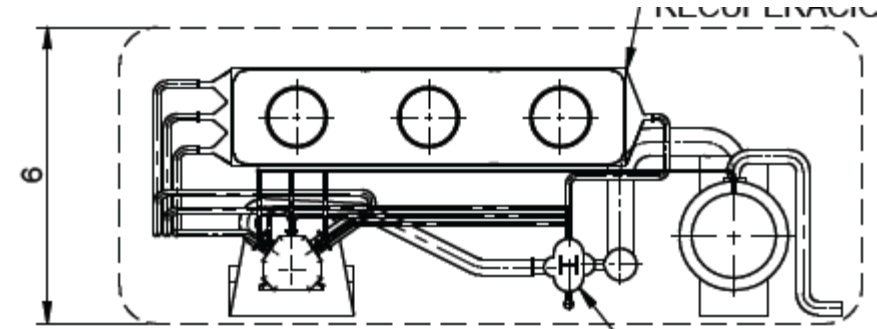
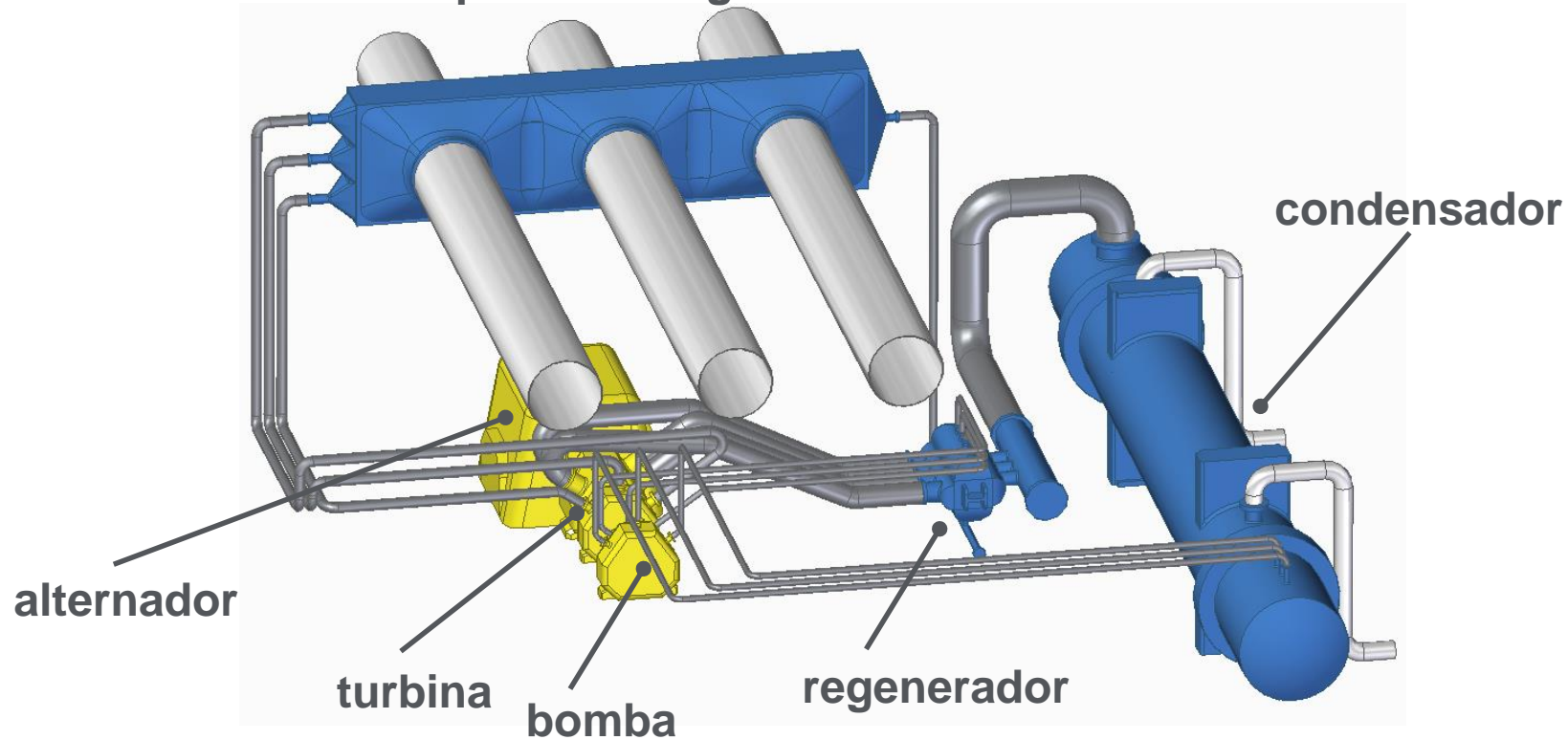
- LCOE entre 60 y 65 €/MWh
- Actualmente la tarifa es de 90 €/MWh, lo que daría una TIR de, 23,6% y un retorno de 5,9 años.

PR [años]		Tarifa eléctrica [€/MWh]							
		50	75	100	125	150	175	200	225
Temperatura [°C]	100	13,8	8,0	5,7	4,4	3,5	3,0	2,6	2,3
	110	14,1	8,2	5,8	4,4	3,6	3,0	2,6	2,3
	120	14,7	8,5	5,9	4,6	3,7	3,1	2,7	2,4
	130	15,3	8,8	6,2	4,7	3,8	3,2	2,8	2,4

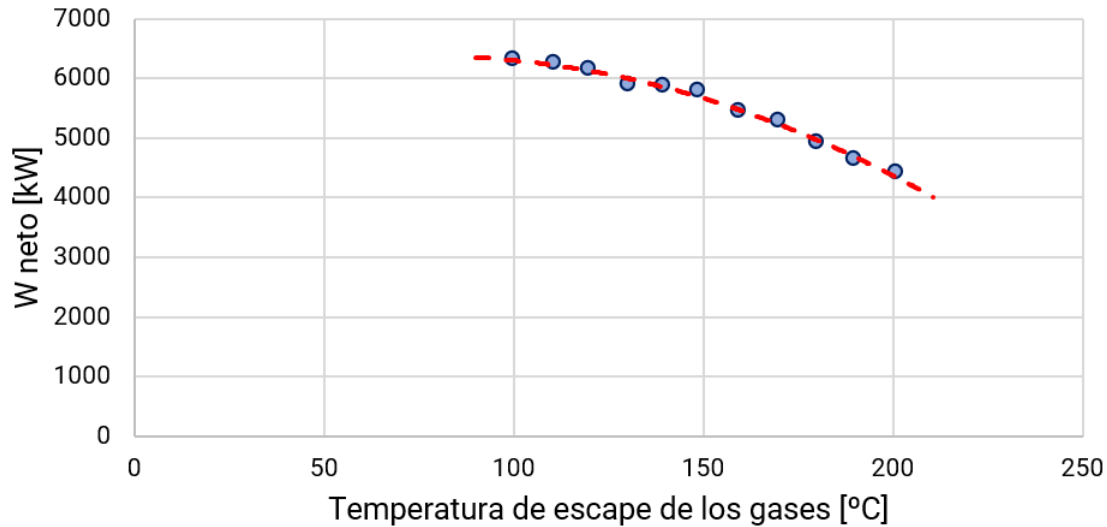
Emisiones evitadas [ton CO ₂ /año]			
100°C	110°C	120°C	130°C
2719	2538	2255	1965



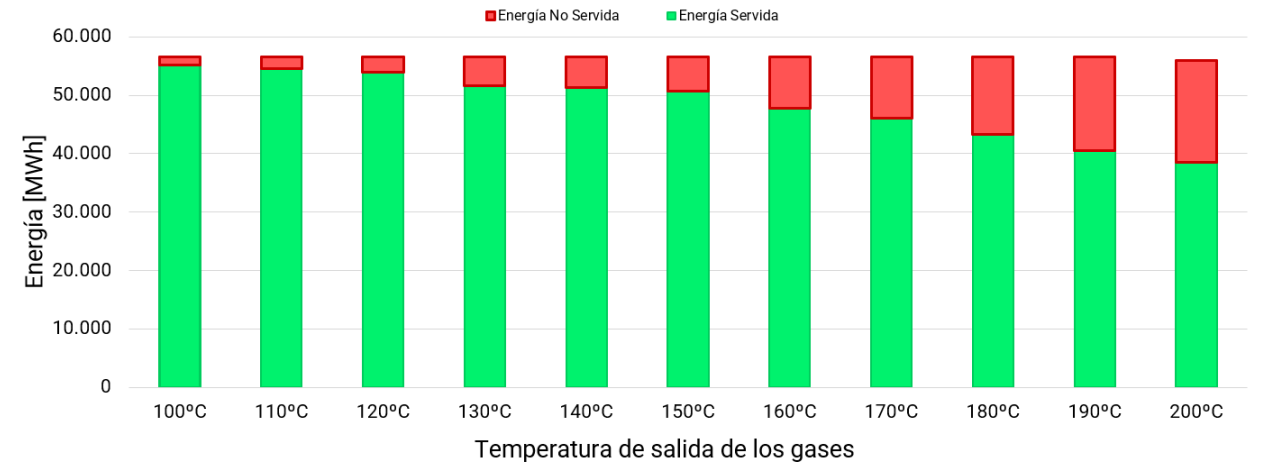
Recuperador de gases



Potencia - Temperatura



Energía cubierta por el ORC



- Rango de variación: > 100 °C por condensaciones ácidas; < 200 °C por aprovechamiento de calor
- Producción entre **6,3 y 4,4 MWe** (rango mucho mayor que en experiencias europeas)
- Cobertura de la demanda de la fábrica entre **75 y 95%**

LCOECD [€/MWh]		Coste del combustible alternativo [€/MWht]										
		5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
Escenario	120°C	62,44	70,41	78,38	86,35	94,31	102,28	110,25	118,22	126,19	134,16	142,13
	150°C	64,21	72,76	81,31	89,85	98,40	106,94	115,49	124,03	132,58	141,13	149,67
	190°C	70,93	81,64	92,34	103,05	113,75	124,46	135,16	145,87	156,57	167,28	177,98

Precio medio actual de combustibles alternos: 4,55 €/MWht

- LCOECD: coste de generación eléctrica + combustion para el secado de crudo
- Para no incrementar emisiones el combustible para el secado del crudo ha de ser biomásico

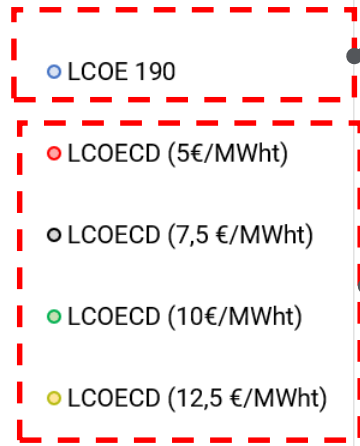
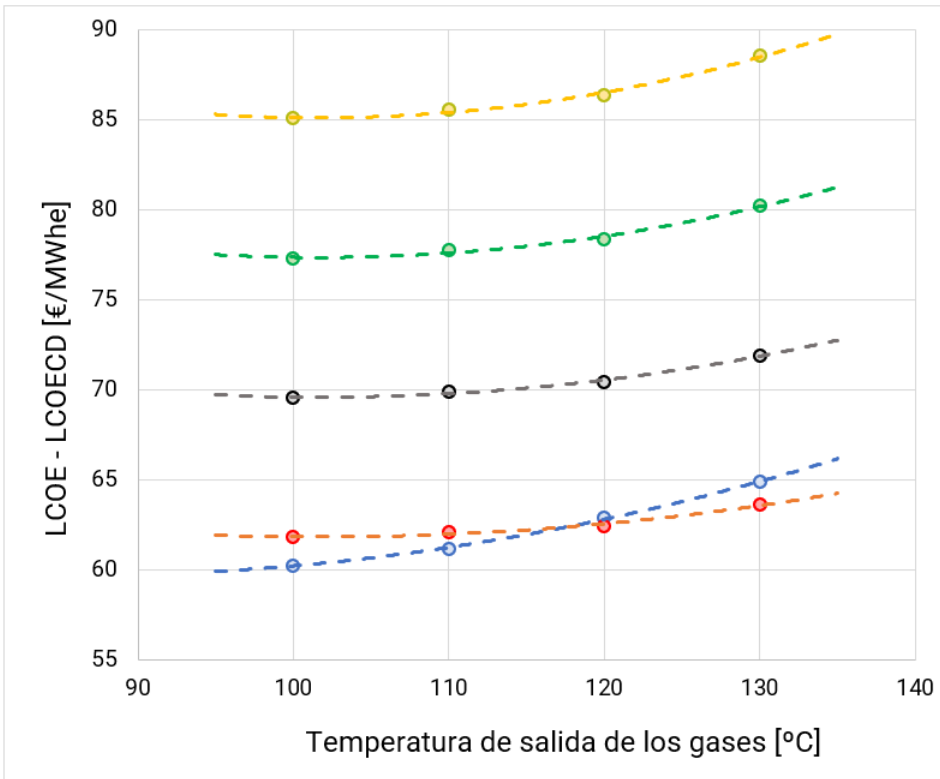
- Combustibles alternos habituales:

- CDR
- Neumáticos
- Aceites usados
- Lodos de EDAR
- **Harinas cárnicas**
- Madera, serrín, restos de poda
- Disolventes
- Orujillo

Para mantener la lucha contra Alcance 1

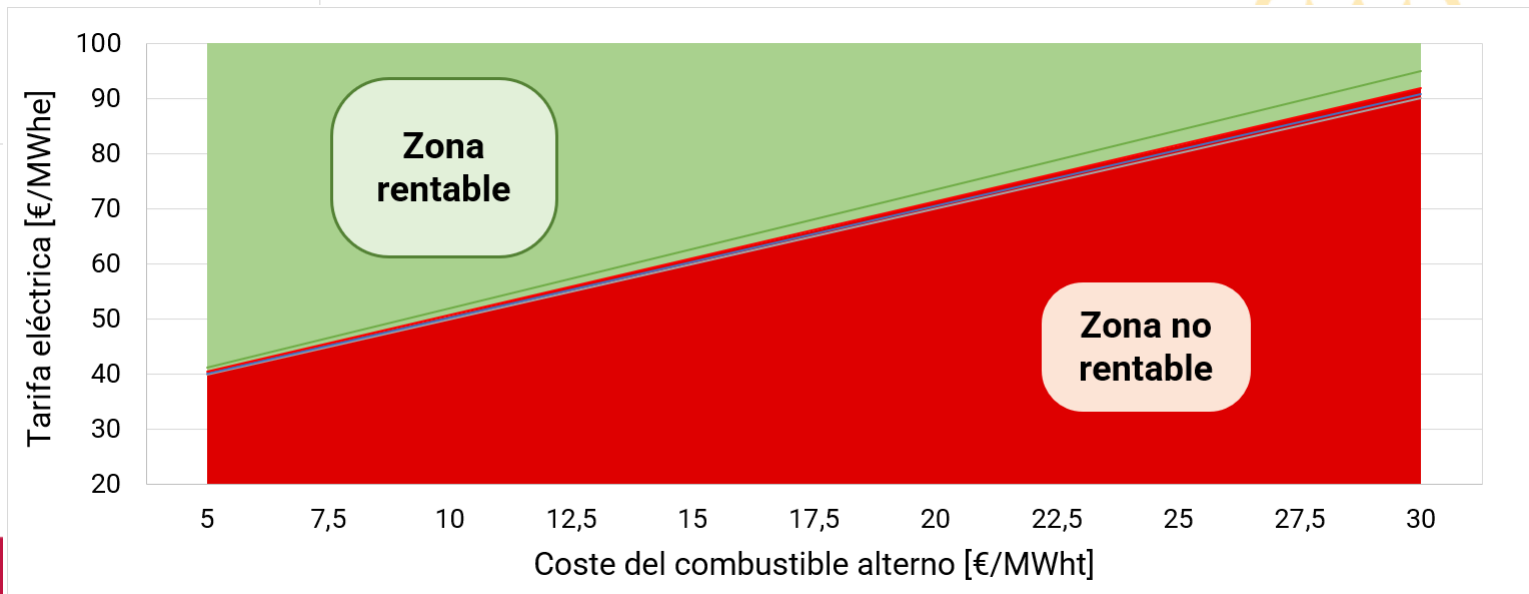
Resultados 330 °C

≈ 500.000 ton cemento/año



Escenario 190 °C

Escenario 330 °C

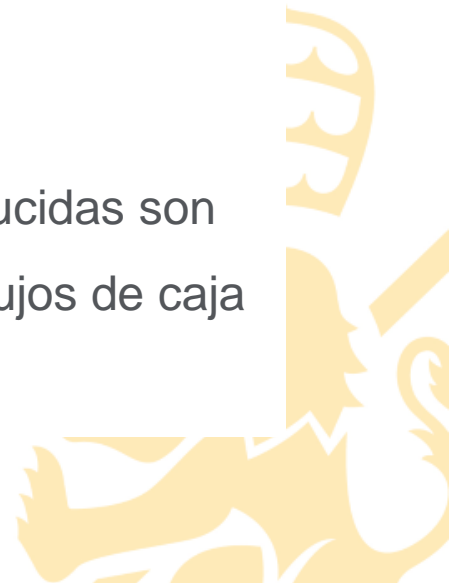


Emisiones evitadas [ton CO ₂ /año]												
Tipo de combustible		100°C	110°C	120°C	130°C	140°C	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C	200°C
	Coque de petróleo	-39.661	-39.695	-40.035	-40.288	-40.607	-40.980	-41.253	-41.442	-41.850	-42.571	-42.514
	Aceites usados	-27.821	-27.872	-28.153	-28.439	-28.689	-28.993	-29.319	-29.524	-29.948	-30.602	-30.635
	Neumáticos	-19.189	-19.253	-19.491	-19.800	-20.000	-20.254	-20.618	-20.836	-21.270	-21.876	-21.976
	CDR	-10.253	-10.329	-10.523	-10.857	-11.005	-11.207	-11.611	-11.841	-12.286	-12.841	-13.010
	Harinas animales	8.911	8.806	8.707	8.321	8.284	8.194	7.705	7.448	6.978	6.531	6.215

- El combustible alternativo para el secado de crudo determina el ahorro de emisiones de CO₂
- Para un ahorro neto se requiere un combustible biomásico puro

Conclusiones

- El escenario 330 °C, pese a ser viable económicamente y generar más electricidad requiere:
 - Modificación importante de las infraestructuras
 - Combustible adicional de harinas cárnicas para no perder en Alcance 1
- El escenario 190 °C supone:
 - Generación eléctrica comparable con proyectos europeos
 - Mantener las infraestructuras
 - No demandar combustible adicional
 - Rentabilidad razonable
- **La opción del escenario 190 °C sería la recomendable.** Si bien las emisiones reducidas son de Alcance 2 (suministro eléctrico), evitables con PPAs renovables, permite liberar flujos de caja para otras inversiones en Alcances 1 y 3



REFERENCIAS

- [Serrat, L., Recuperación de calores residuales en una cementera mediante ciclo de Rankine orgánico \(ORC\). Trabajo fin de máster \(Director: Linares, J.I.\), Comillas-ICAI, 2023](#)
- [Navarro, J., La recuperación de calores residuales como medida de descarbonización en la industria cementera, en Seminario sobre La descarbonización de la industria cementera. Propuesta de soluciones. Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética, 2023.](#)



Gracias por su atención

linares@comillas.edu

