



Ricerca di Sistema elettrico

Selezione delle configurazioni di sistemi solari a concentrazione idonei alla fornitura di calore di processo per diversi settori applicativi industriali ed elaborazione di schemi concettuali di integrazione

M. D'Auria, M. Lanchi, R. Liberatore

Selezione delle configurazioni di sistemi solari a concentrazione idonei alla fornitura di calore di processo per diversi settori applicativi industriali ed elaborazione di schemi concettuali di integrazione

M. D'Auria, M. Lanchi, R. Liberatore (ENEA)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – 1^a annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: Progetto 1.9 Solare Termodinamico

Linea di attività: LA 1.32 - *Calore di processo per applicazioni industriali: analisi delle tecnologie solari a concentrazione potenzialmente idonee a diversi livelli termici*

Responsabile del Progetto: Alberto Giaconia, ENEA

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 PROCESSI ENDOTERMICI NEL SETTORE INDUSTRIALE	8
2.1 SETTORE SIDERURGICO	13
2.2 SETTORE CARTA	15
2.3 SETTORE VETRO	17
2.4 SETTORE CERAMICA	19
2.5 SETTORE CEMENTO	21
2.6 SETTORE CHIMICO	23
2.7 SETTORE ALIMENTARE	25
3 OFFERTA TECNOLOGICA DEGLI IMPIANTI CST	27
3.1 INTRODUZIONE	27
3.1.1 <i>Torre solare</i>	29
3.1.2 <i>Collettori parabolici lineari</i>	30
3.1.3 <i>Collettore lineare Fresnel</i>	32
3.1.4 <i>Mappatura tecnologica dei sistemi CST</i>	34
4 INTEGRAZIONE TRA TECNOLOGIA CST E IMPIANTI INDUSTRIALI	36
4.1 INTEGRAZIONE A LIVELLO DI FORNITURA CON VAPORE	38
4.2 INTEGRAZIONE A LIVELLO DI FORNITURA CON FLUIDI TERMOVETTORI LIQUIDI	40
4.3 INTEGRAZIONE A LIVELLO DI PROCESSO CON SCAMBIATORE DI CALORE ESTERNO	42
4.4 INTEGRAZIONE A LIVELLO DI PROCESSO CON SCAMBIATORE DI CALORE INTERNO	46
4.5 INTEGRAZIONE A LIVELLO DI PROCESSO CON FORNITURA DI VAPORE A BASSA PRESSIONE	47
5 CASI APPLICATIVI DI INTEGRAZIONE A MEDIA/ALTA TEMPERATURA	49
5.1 SETTORE DEL VETRO	52
5.2 SETTORE DELLA CERAMICA	54
5.3 SETTORE DEL GESSO	57
5.4 SETTORE CHIMICO	60
5.4.1 <i>Steam Reforming del metano</i>	60
5.4.2 <i>Cracking</i>	63
5.5 SETTORE ALIMENTARE	66
5.5.1 <i>Processo di separazione - Deodorizzazione olio</i>	66
5.5.2 <i>Processo di cottura - Prodotti da forno</i>	70
5.5.3 <i>Maltificazione</i>	72
6 CONCLUSIONI	74
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	75
8 APPENDICE: CASI APPLICATIVI DI INTEGRAZIONE A BASSA TEMPERATURA	78

Sommario

Il consumo di energia del settore industriale ha un significativo impatto sul fabbisogno energetico totale: è stato infatti stimato che il consumo energetico dell'industria rappresenti circa il 32% dell'energia globalmente richiesta e di questa quota circa il 26% è attribuibile ai consumi elettrici, mentre il restante 74% è riferibile ai consumi termici.

Attualmente l'utilizzo dell'energia solare per l'alimentazione termica dei processi industriali è prevalentemente limitato alle basse temperature (<150 °C, tecnologie a collettori piani), ed è frenato da ragioni economiche (costi di installazione e operativi, elevati tempi di recupero dell'investimento) e dalla ridotta flessibilità di funzionamento dei sistemi solari termici. Ad oggi poche centinaia di grandi impianti solari termici asserviti alle industrie sono installati nel mondo e vengono utilizzati principalmente per il preriscaldamento dell'acqua di alimentazione nelle caldaie a vapore.

Per le applicazioni a medio/alta temperatura, che rappresentano una consistente quota del consumo termico dell'industria (circa il 70%) e che pertanto costituiscono un mercato molto vasto e di grande interesse per il solare termico a concentrazione (*Concentrated Solar Thermal, CST*), non esistono soluzioni tecnologiche consolidate. Pur potendo garantire produzione affidabile e flessibile di calore, il solare a concentrazione deve infatti adattare la propria offerta tecnologica ad un mercato eterogeneo, con diverse temperature e modalità di funzionamento dei processi, differenti carichi termici e taglie di impianto; la sfida risiede, pertanto, nello sviluppo di tecnologie solari a concentrazione modulari, espandibili e integrabili, e nell'identificazione di specifiche strategie di gestione ed esercizio, al fine di assicurare stabilità di funzionamento del processo e ridotti costi operativi e di manutenzione.

Obiettivo del presente lavoro è la selezione di specifiche tecnologie solari integrabili a processi industriali operativi nell'intervallo di temperatura 200-600 °C e l'identificazione di possibili combinazioni tra i diversi sottosistemi ed elementi di impianti CST (collettori solari, fluidi termovettori, unità di accumulo di energia termica, interfaccia con l'utenza industriale, ecc.) e i processi endotermici di maggiore interesse. In particolare, da una approfondita analisi sui principali processi endotermici operativi nell'intervallo di temperatura 200-600 °C, sono state selezionate le operazioni unitarie più significative, potenzialmente idonee ad accoppiamento con impianti CST: ricottura (settore vetro), atomizzazione (settore ceramica), calcinazione (settore gesso), reforming e cracking (settore petrolchimico), deodorizzazione oli, cottura, maltazione (settore alimentare). Per ciascun processo industriale sono stati elaborati schemi concettuali di integrazione con il CST, esaminando le seguenti opzioni tecnologiche: sistemi lineari (parabolici o Fresnel) utilizzando i) olio diatermico come fluido termovettore per temperature medio-basse, ii) miscele di sali fusi basso-fondenti per temperature medie, iii) miscele di sali fusi tipo "Solar Salt" per applicazioni ad alta temperatura. Gli schemi di integrazione sviluppati nell'ambito del presente lavoro, in cui sono proposte anche specifiche tecnologie di accumulo termico, saranno oggetto di futuro approfondimento ed analisi, al fine di valutare i costi associati all'alimentazione termica solare di processi endotermici significativi e rappresentativi del tessuto produttivo nazionale.

1 Introduzione

La domanda globale di energia elettrica/termica è in continuo aumento, sia a causa dei crescenti consumi dei paesi industrializzati, sia per effetto dell'incremento demografico nei paesi in via di sviluppo. Il consumo di energia da parte del settore industriale ha un impatto determinante sul bilancio energetico mondiale: è stato stimato che il fabbisogno energetico dell'industria rappresenti circa il 32% di tutta l'energia globalmente richiesta (Figura 1). Di questa quota circa il 26% è attribuibile ai consumi elettrici dell'industria mentre il restante 74% è riferibile a consumi termici [1]. Inoltre il 30% del calore richiesto dall'industria è associato a processi con livelli termici inferiori a 150 °C, il 22% è riferito a processi con temperature comprese tra 150 e 400 °C, e il restante 48% riguarda processi con temperature superiori a 400 °C [1].

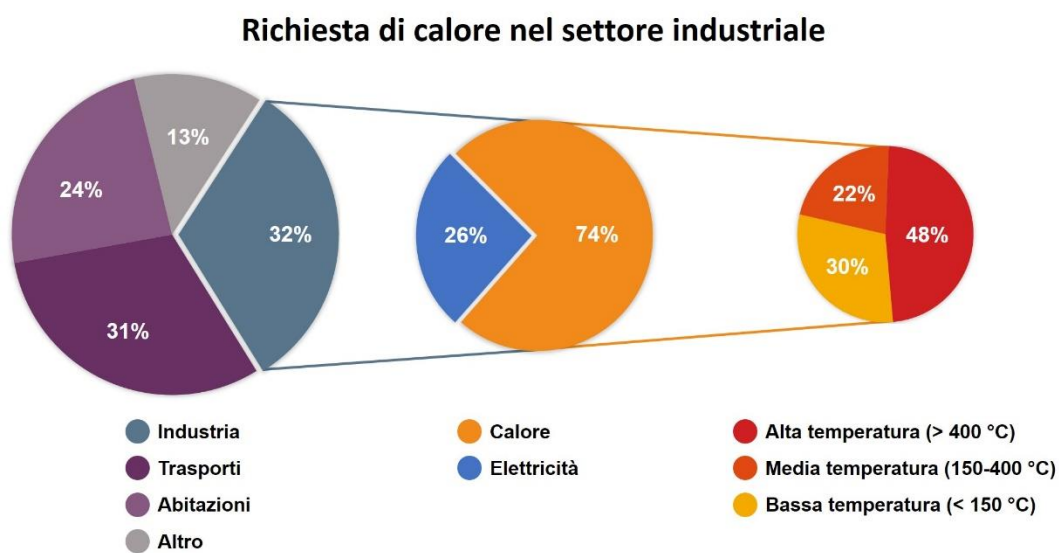


Figura 1. Consumi energetici (elettrici e termici) nel settore industriale, e consumo del calore di processo a diversi livelli termici [1].

Riguardo allo specifico contesto europeo, un quarto del consumo totale di energia è attribuibile al settore industriale (Figura 2), che richiede il 60% di elettricità ed il 40% di calore [2]. Da analisi condotte dal Joint Research Center della Commissione Europea [3] la domanda europea di calore industriale è per la maggior parte riferibile a processi ad alta temperatura (Figura 3).

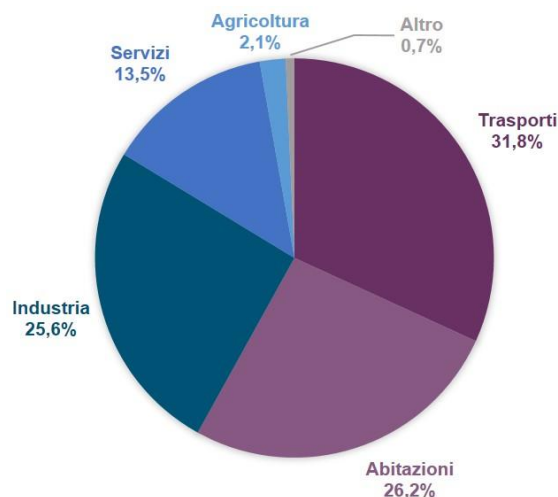


Figura 2. Consumi energetici finali per Paesi europei [2].

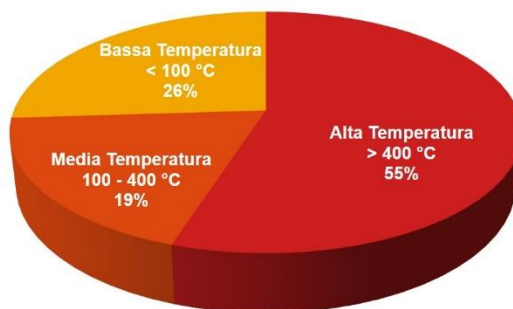


Figura 3. Suddivisione della richiesta utile di calore per Paesi europei [2].

Attualmente l’energia termica per i processi industriali viene prodotta attraverso la combustione di materia fossile in caldaie e forni, causando il rilascio di ingenti quantità di anidride carbonica, pari a circa un terzo delle emissioni globali. Al problema ambientale si somma il problema del reperimento delle risorse fossili, sempre più urgente a causa delle instabilità geopolitiche e della necessità di garantire sicurezza nell’approvvigionamento energetico.

È ormai riconosciuta la necessità di attuare misure di politica energetica finalizzate al contenimento dei consumi di energia e all’utilizzo di sistemi energetici alternativi, più efficienti e più rispettosi dell’ambiente: in quest’ottica, soprattutto nell’ultimo decennio, si è assistito ad un importante sviluppo di iniziative scientifiche e tecnologiche mirate a sostenere il processo di transizione verso un’economia energetica basata su fonti pulite e rinnovabili. L’energia solare, eolica, idraulica e geotermica rappresentano delle alternative sostenibili per ridurre o, persino, annullare la dipendenza da risorse fossili convenzionali.

L’energia solare può soddisfare una parte considerevole del fabbisogno di calore dell’industria, sia attraverso il ricorso alla tecnologia solare termica per applicazioni a bassa temperatura (<100 °C, ad es. processi di lavaggio), sia attraverso l’impiego della tecnologia solare a concentrazione per le applicazioni a medio/alta temperatura (>200 °C, ad es. processi che richiedono l’uso di vapore quali pastorizzazione ed essiccazione). Le industrie tessili, alimentari e dei laterizi sono realtà tipicamente presenti anche nei Paesi in via di sviluppo in cui l’energia solare è largamente disponibile; questa pertanto può essere utilizzata per alimentare processi come l’essiccazione, il candeggio, l’evaporazione, il lavaggio, la sterilizzazione e la pastorizzazione [4]. Nelle applicazioni a bassa temperatura il calore può essere prodotto attraverso l’utilizzo di collettori piani o collettori a tubi evacuati che utilizzano la radiazione solare globale, ma negli ultimi anni sono stati commercializzati nuovi collettori piani ad alto vuoto con riflettori CPC a bassa concentrazione per migliorare le prestazioni termiche del sistema e raggiungere temperature di esercizio fino a 160 °C [5].

Livelli di temperatura più elevati, fino a 550 °C, possono essere raggiunti attraverso l'utilizzo dei collettori parabolici lineari e collettori Fresnel (tecnologia solare a concentrazione), che riflettono e concentrano la radiazione solare diretta (DNI) su un tubo ricevitore attraversato da un fluido termovettore.

Attualmente l'utilizzo dell'energia solare per l'alimentazione termica dei processi industriali è limitato alle basse temperature (tecnologie a collettori piani), ed è frenato da ragioni economiche (costi di installazione e operativi, elevati tempi di recupero dell'investimento) e dalla ridotta flessibilità di funzionamento dei sistemi solari termici. Infatti poche centinaia di grandi impianti solari termici asserviti alle industrie sono installati nel mondo e vengono utilizzati principalmente per il preriscaldamento dell'acqua di alimentazione nelle caldaie a vapore. Per i collettori piani, il costo di investimento di impianto è compreso tra 250-1000 €/kW in Europa e tra 200-300 €/kW in Sudafrica e India, mentre il costo del calore prodotto varia tra 2.5 a 8 c€/kWh [6].

Per le applicazioni a medio/alta temperatura, che rappresentano una consistente quota del consumo termico dell'industria (circa il 70%, come desumibile da Figura 1) e che pertanto costituiscono un mercato molto vasto e di grande interesse per il solare a concentrazione termico (CST), non esistono soluzioni tecnologiche consolidate. Pur potendo garantire produzione affidabile e flessibile di calore, il solare a concentrazione deve infatti adattare la propria offerta tecnologica ad un mercato eterogeneo, con diverse temperature e modalità di funzionamento dei processi, differenti carichi termici e taglie di impianto; la sfida risiede, pertanto, nello sviluppo di tecnologie solari a concentrazione modulari, espandibili e integrabili, e nell'identificazione di specifiche strategie di gestione ed esercizio, al fine di assicurare stabilità di funzionamento del processo e ridotti costi operativi e di manutenzione.

Obiettivo del presente lavoro è dunque la selezione di specifiche tecnologie solari integrabili a diversi processi industriali operativi nell'intervallo di temperatura 200-600 °C, e l'identificazione di possibili combinazioni tra i diversi sottosistemi ed elementi di impianti CST (collettori solari, fluidi termovettori, unità di accumulo di energia termica, interfaccia con l'utenza industriale, ecc.) e i corrispondenti macrosettori applicativi industriali. Nel lavoro sono presentati diversi schemi concettuali di integrazione in considerazione del livello termico dei processi, esaminando le seguenti opzioni tecnologiche: sistemi lineari (parabolici o Fresnel) utilizzando i) olio diatermico come fluido termovettore per temperature medio-basse, ii) miscele di sali fusi basso-fondenti per temperature medie, iii) miscele di sali fusi tipo "Solar Salt" per applicazioni ad alta temperatura.

2 Processi endotermici nel settore industriale

Da una approfondita ricognizione sui consumi termici dell'industria europea [2] emerge che la quota maggiore della richiesta di calore ad alta temperatura è riconducibile alle industrie metallurgiche (ferro, acciaio, alluminio), alle industrie minerarie non metalliche (in particolare l'industria del cemento) e ad alcuni processi dell'industria chimica (Figura 4). Il fabbisogno termico a bassa e media temperatura è invece riferibile all'industria alimentare, delle bevande, del tabacco, della carta, della verniciatura e tessile. Riguardo l'industria tessile, la capacità produttiva in Europa è diminuita drasticamente negli ultimi anni ma tale settore rappresenta un'applicazione ad alta potenzialità per il solare a concentrazione in altre regioni, come la Cina e il Sud-Est asiatico.

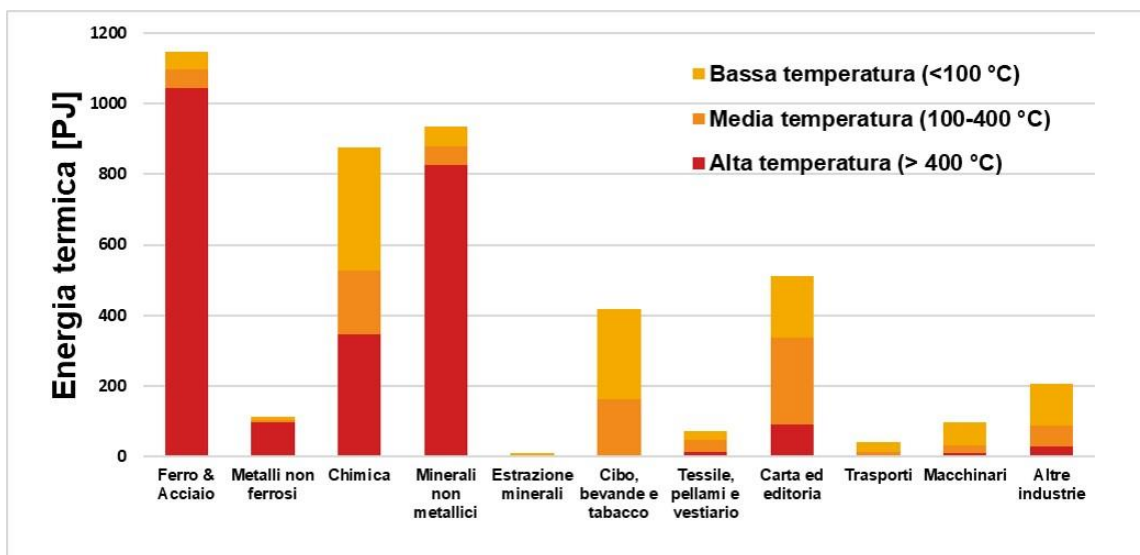


Figura 4. Analisi della richiesta utile di calore nei Paesi europei per diversi livelli di temperatura e per i principali settori industriali [2].

I consumi specifici di energia in termini di calore e di elettricità suddivisi per processo sono reperibili in diversi lavori di review [7-8]. Per i processi ad alta intensità energetica vengono tipicamente utilizzate tecnologie commerciali consolidate, quindi l'aliquota di calore nel consumo specifico di energia per ciascun processo non varia in maniera sensibile con la localizzazione del sito industriale.

In Tabella 1 si riportano i consumi specifici di energia per diversi processi del settore industriale e manifatturiero, espressi in GJ/t di materiale prodotto, la ripartizione percentuale dei consumi specifici destinati alla fornitura di calore di processo e i livelli di temperatura come frazione percentuale della richiesta termica totale. Si noti che la colonna "Aliquota" indica la percentuale del vettore di energia (combustibile ed elettricità) utilizzato per fornire calore.

A ciascun settore industriale possono essere associati i processi endotermici di riferimento, caratterizzati da condizioni operative sostanzialmente omogenee, quali livelli termici e fluidi termovettori/di processo, come riportato in Tabella 2.

Nei paragrafi seguenti viene riportata una descrizione sintetica dei principali processi coinvolti nelle lavorazioni dei diversi settori industriali, fornendo maggiori dettagli sulla distribuzione dei flussi energetici (termici ed elettrici), sui livelli di temperatura in gioco e sui consumi (termici ed elettrici) relativi alle aziende presenti in Italia.

Tabella 1. Consumi specifici di energia, quota di utilizzo e livelli di temperatura per diversi processi del settore industriale e manifatturiero [7-8].

Settore	Processo	Consumo specifico di energia [GJ/t]		Aliquota per calore [%]		Livello di temperatura [%]			
		Combustibile	Elettricità	Combustibile	Elettricità	<100 °C	100 – 200 °C	200 – 500 °C	>500 °C
Ferro e acciaio	Sinterizzazione	2.2	0.1	100	0	0	0	20	80
	Altoforno	11.6	0.6	100	0	1	1	1	97
	Forno ad arco elettrico	1.0	2.3	100	95	1	0	0	99
	Acciaio laminato	2.4	0.6	100	10	0	0	0	100
	Forno a coke	3.2	0.1	100	0	0	0	0	100
	Riduzione della fusione (smelting reduction)	15.0	0.4	100	0	0	0	0	100
	Riduzione diretta	15.0	0.4	100	0	0	0	20	80
Metalli non ferrosi	Alluminio, primario	5.2	53.6	100	5	0	0	0	100
	Alluminio, secondario	9.0	1.7	100	30	28	0	30	42
	Estrusione di alluminio	4.2	4.8	100	30	0	0	100	0
	Fonderie di alluminio	7.2	5.6	100	30	0	0	0	100
	Laminazione di alluminio	3.3	2.2	100	30	0	0	100	0
	Rame, primario	8.0	2.8	100	20	0	0	0	100
	Rame, secondario	4.0	2.3	100	0.10	0	0	0	100
	Rame, ulteriori trattamenti	2.0	3.8	100	15	0	0	100	0
	Zinco, primario	1.0	15.9	100	1	0	0	0	100
	Zinco, secondario	1.0	0.6	100	1	0	0	100	0
Carta	Carta	5.5	1.9	100	1	5	88	5	2
	Pasta chimica	12.7	2.3	100	1	0	100	0	0
	Pasta meccanica	2.0	7.9	100	1	100	0	0	0
	Fibre riciclate	0.5	0.9	100	1	0	100	0	0

Settore	Processo	Consumo specifico di energia [GJ/t]		Aliquota per calore [%]		Livello di temperatura [%]			
		Combustibile	Elettricità	Combustibile	Elettricità	<100 °C	100 – 200 °C	200 – 500 °C	>500 °C
Vetro	Contenitori in vetro	5.8	1.4	100	4	2	19	19	60
	Vetro piano	10.9	3.3	100	0	2	21	43	34
	Fibra di vetro	4.9	1.8	100	20	2	19	19	60
	Altro vetro	11.5	5.1	100	17	2	22	22	54
Ceramica	Casalinghi, sanitari	24.2	4.8	100	1	30	0	0	70
	Ceramiche tecniche e altro	12.1	3.2	100	1	30	15	15	40
	Piastrelle, lastre, refrattari	5.5	0.9	100	1	7	11	7	75
Cemento	Calcinazione del clinker, secca	3.5	0.1	100	0	0	0	10	90
	Calcinazione del clinker, semisecca	4.0	0.2	100	0	0	0	10	90
	Calcinazione del clinker, umida	5.5	0.2	100	0	0	0	10	90
	Preparazione del calcare	0	0.1	0	0	100	0	0	0
	Gesso	1.0	0.2	100	0	0	50	30	20
	Macinazione del cemento	0	0.2	0	0	100	0	0	0
	Macinazione della calce	0	0.2	0	0	100	0	0	0
	Mattoni	1.4	0.2	100	0	20	0	0	80
	Calcara (forno da calce)	3.7	0.1	100	0	0	0	0	100
Alimentare	Zucchero	4.5	0.7	100	0	10	60	0	30
	Latticini	1.6	0.5	100	5	90	10	0	0
	Birra	1.0	0.4	100	5	55	45	0	0
	Lavorazione della carne	2.0	1.5	100	5	40	60	0	0
	Pane e prodotti da forno	2.4	1.4	100	45	20	33	47	0
	Amido	3.1	1.4	100	10	100	0	0	0

Settore	Processo	Consumo specifico di energia [GJ/t]		Aliquota per calore [%]		Livello di temperatura [%]			
		Combustibile	Elettricità	Combustibile	Elettricità	<100 °C	100 – 200 °C	200 – 500 °C	>500 °C
Sostanze chimiche	Acido adipico	26.9	1.4	100	0	0	50	25	25
	Ammoniaca	11.3	0.5	100	0	0	0	0	100
	Carburo di calcio	6.1	8.3	100	95	0	0	0	100
	Carbon black	64.8	1.8	100	0	0	0	0	100
	Cloro, diaframma	0	10.7	0	0	0	0	0	0
	Cloro, membrana	1.9	10.0	100	0	0	100	0	0
	Cloro, mercurio	0	12.8	0	0	0	0	0	100
	Etilene	35.9	-	100	0	0	0	0	100
	Metanolo	15.0	0.5	100	0	0	0	0	100
	Policarbonato	12.9	2.7	100	0	0	100	0	0
	Polietilene	0.6	2.0	100	0	0	100	0	0
	Polipropilene	0.8	1.1	100	0	0	100	0	0
	Polisolfoni	24.5	3.1	100	0	0	100	0	0
	Carbonato di sodio	11.3	0.3	100	0	30	40	0	30
	TDI (diisocianato di toluene)	26.7	2.8	100	5	0	100	0	0
Biossido di titanio	34.2	3.3	100	0	0	30	23	47	
Plastica	Estrusione	1.6	3.0	100	20	20	50	30	0
	Stampaggio ad iniezione	3.9	7.3	100	20	20	50	30	0
	Soffiaggio	2.9	5.3	100	20	20	50	30	0

Tabella 2. Principali processi endotermici dell'industria: Intervalli di temperature operative e fluidi termovettori [9-11].

INDUSTRIA	PROCESSO/I	TEMPERATURE [°C]	FLUIDO TERMOVETTORE
ALIMENTARE, LAVORAZIONE DEL LATTE E PRODUZIONE DI BEVANDE	COTTURA	70-120	VAPORE, ACQUA
	PASTORIZZAZIONE	60-150	VAPORE
	STERILIZZAZIONE	100-140	VAPORE
	TEMPRA	40-80	VAPORE
	ESSICCAZIONE, DISIDRATAZIONE	40-100	ARIA
	LAVAGGIO, PULIZIA	40-80	VAPORE, ARIA
	TRATTAMENTO TERMICO	60-80	ACQUA
	DEODORAZIONE OLIO	200-240	VAPORE
	COTTURA PRODOTTI DA FORNO	150-320	ARIA
	MALTAZIONE	80-90	ARIA
TESSILE	CANDEGGIO, TINTURA	60-90	ACQUA
	ASCIUGATURA, DISGRASSATURA	100-130	VAPORE
	STIRATURA	120-140	VAPORE
	FISSAGGIO	160-180	VAPORE
	STAMPA	40-130	ACQUA, VAPORE
POLPA E CARTA	CANDEGGIO	120-150	ACQUA
	DISINCHIOSTRAZIONE	60-90	VAPORE
	ESSICCAZIONE	90-200	ARIA, VAPORE
	PREPARAZIONE POLPA	120-170	ACQUA PRESSURIZZATA
	RISCALDAMENTO ACQUA ALIMENTAZIONE CALDAIA	60-90	ACQUA
CHIMICO E FARMACEUTICO	DISTILLAZIONE	100-200	ACQUA
	EVAPORAZIONE	110-170	VAPORE
	ESSICCAZIONE	120-170	ARIA, VAPORE
	ADDENSAMENTO	130-140	VAPORE
	STEAM REFORMING	800-1000	VAPORE
	CRACKING	420-540	VAPORE
AUTOMOBILE	PRETRATTAMENTO	40-50	ACQUA
	VERNICIATURA		
	COTTURA VERNICI	175-225	VAPORE
	ASCIUGATURA VERNICI	150-175	ARIA
PRODUZIONE DI PRODOTTI IN PELLE, GOMMA, PLASTICA E VETRO	PRE-CONCIA	40-60	ACQUA
	CONCIA AL CROMO	60-80	ACQUA
	ESSICAMENTO E FINITURA	70-100	ARIA
	ESSICCAZIONE (GOMMA)	50-130	ARIA
	PRE-RISCALDAMENTO	50-70	ACQUA
	PREPARAZIONE	120-140	VAPORE
	DISTILLAZIONE	140-150	VAPORE
	ESTRUSIONE	140-160	VAPORE
	ESSICCAZIONE (PLASTICA)	180-200	ARIA
	LAMINAZIONE	100-180	ARIA
CERAMICA	ESSICCAZIONE FIBRA VETRO	150-175	ARIA
	RICOTTURA VETRO FLOAT	500-600	ARIA
FONDERIE	ATOMIZZAZIONE	500-600	ARIA
	ESSICCAZIONE	80-160	ARIA
PRODUZIONE CEMENTO E GESSO	INDURIMENTO, RICOTTURA, TEMPRA, RINVENIMENTO, FORGIATURA, LAMINAZIONE	700-1500	ARIA
	CALCINAZIONE DELLA CALCE	600-1200	ARIA
	CALCINAZIONE DEL GESSO ESSICCAZIONE CARTONGESSO	450-600 180-300	ARIA ARIA

2.1 Settore siderurgico

La produzione di acciaio attualmente si basa su due cicli di fabbricazione che si differenziano per le materie prime impiegate:

- minerali e carbon fossile per il ciclo integrale (28% della produzione);
- rottame ferroso per il ciclo a forno elettrico (72% produzione).

Il ciclo integrale prevede un complesso processo di preparazione e trattamento delle materie prime, che costituisce la fase preliminare all'invio nell'altoforno, e consente di ottenere la ghisa greggia come prodotto intermedio e gli acciai come prodotti finiti.

Nel ciclo integrale, il carbon fossile viene trasformato in *coke metallurgico* attraverso un processo termico di distillazione eseguito nelle cokerie. Esso costituisce un componente indispensabile per il processo chimico di riduzione dell'ossido di ferro in ferro metallico nell'altoforno. I minerali di pezzatura fine vengono trasformati in materiale adatto alla carica attraverso l'impianto di *agglomerazione* dove avviene il processo di sinterizzazione. I minerali vengono lavati, macinati e portati alla pezzatura adatta al processo chimico che nell'altoforno trasforma il minerale di ferro in una lega ferro-carbonio, la ghisa, con un tenore di carbonio intorno al 4-5%. Segue poi un processo di *affinazione* che abbassa il contenuto di carbonio e di impurezze (principalmente zolfo e fosforo). I forni di affinazione si basano prevalentemente sul processo di conversione con ossigeno, grazie al quale gli elementi come il carbonio, il silicio, il fosforo e il manganese vengono completamente o in parte ossidati mediante l'insufflazione di ossigeno puro attraverso una lancia introdotta dall'alto (processo LD), mentre le reazioni di ossidazione esotermiche forniscono al processo il calore necessario per portare il bagno di ghisa liquida alla temperatura necessaria per le successive operazioni.

Il ciclo di produzione dell'acciaio attraverso il forno elettrico risulta essere più compatto rispetto al ciclo integrale, poiché si fa direttamente uso di rottami di acciaio senza l'utilizzo di impianti e macchinari finalizzati alla produzione della ghisa e alla trasformazione di questa in acciaio. Di conseguenza, la tecnologia del forno elettrico si è affermata grazie alla minore complessità del ciclo produttivo, alla capacità di adattarsi con rapidità e flessibilità agli orientamenti del mercato, nonché alla enorme disponibilità di rottame di acciaio. Il ciclo rottame consente di produrre acciai di qualità medio-bassa ma è più compatto e meno energivoro del ciclo integrale.

Successivamente alla produzione dell'acciaio fuso e alla sua affinazione per sottrazione e/o aggiunta di particolari elementi chimici, la produzione siderurgica prevede il colaggio e la solidificazione in forme predeterminate (semilavorati), e infine la lavorazione dei semilavorati per deformazione plastica (*laminazione*) e la loro trasformazione in prodotti semi-finiti, che nella pratica rappresentano il materiale di partenza per le industrie utilizzatrici.

In Figura 5 è rappresentato un sintetico diagramma di flusso delle fasi di produzione dell'acciaio e in Tabella 3 si riportano le temperature di processo, i consumi specifici elettrici e quelli termici per le diverse fasi.

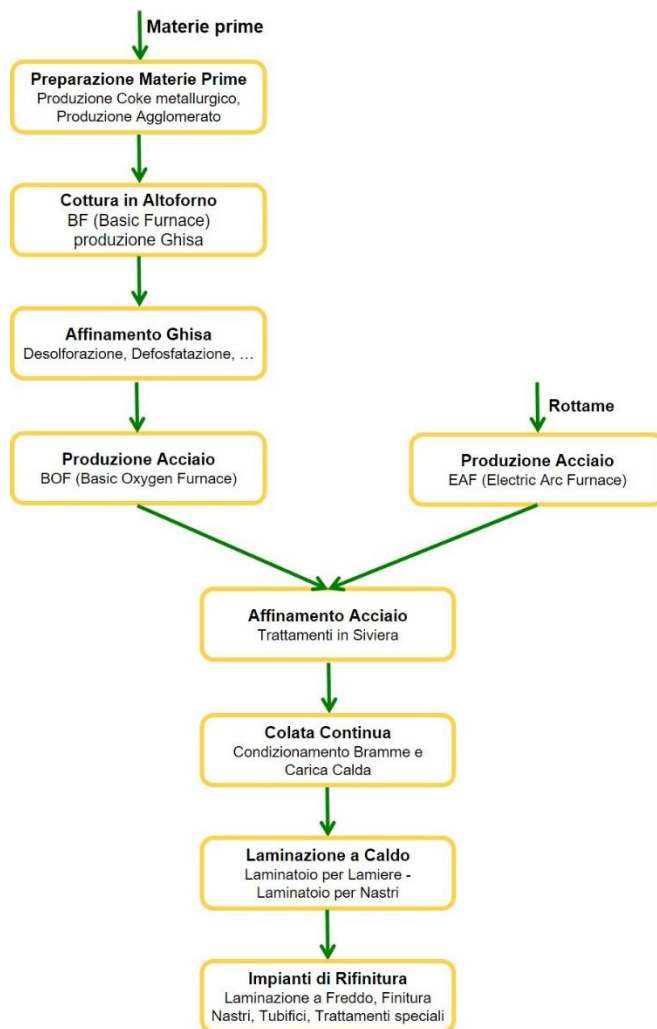


Figura 5. Diagramma di flusso del processo di produzione dell'acciaio [12].

Tabella 3. Consumi specifici del settore della siderurgia in Italia [13].

Fase	Temperatura [°C]	Consumo specifico elettrico [kWh _e /t]	Consumo specifico termico [kWh _t /t]
Produzione coke	900-1200	56	942
Produzione agglomerato	1000-1400	42	444
Cottura in altoforno	1600-1800	172	3517
Cottura in BOF	1700-1750	58	67
Forno EAF	1800-3000	508	197
Laminazione a caldo	1100-1250	122	333

A causa degli elevati livelli termici operativi delle operazioni di trasformazione nel settore siderurgico, l'alimentazione termica da solare a concentrazione è realizzabile solo con tecnologie puntuali (torre centrale) utilizzanti materiali e componenti ad altissime prestazioni, e pertanto molto costose e non commerciabili nell'immediato futuro.

2.2 Settore carta

Il processo produttivo di una cartiera può essere schematizzato come in Figura 6, dove si evidenzia la successione semplificata delle principali operazioni di trasformazione e la distribuzione delle risorse energetiche.

Per la produzione di vapore è in gran parte impiegato gas naturale, tipicamente in impianti cogenerativi e in alcuni casi nei generatori di vapore di stabilimento. Indicativamente i consumi termici di uno stabilimento per la produzione della carta sono da attribuirsi alla preparazione dell'impasto (20%) e alla fabbricazione del foglio (80%). In particolare il vapore è distribuito alle diverse utenze di stabilimento per i seguenti usi di processo:

- riscaldamento dell'impasto e della cassa di afflusso al fine di agevolare la fase iniziale di drenaggio e facilitare l'allontanamento dell'acqua in macchina continua;
- essiccazione del foglio umido nella sezione della seccheria, che è la più energivora dal punto di vista termico;
- riscaldamento delle sostanze ed additivi nei trattamenti superficiali al fine di facilitarne l'adesione al foglio e la successiva asciugatura ad aria.

La prima operazione in cartiera è la macerazione del materiale fibroso nella vasca di un apposito macchinario, denominato *pulper* (o spappolatore), contenente acqua; tale operazione ha lo scopo di separare il materiale fibroso in fibre allo stato elementare. L'acqua impiegata in questa fase generalmente viene riciclata dalla macchina continua a temperature di 40-60 °C.

Durante la fase di essiccamento è necessario fornire calore per l'evaporazione dell'acqua, e circolazione d'aria, per la rimozione del vapore prodotto. La fase di essiccazione si svolge nella seccheria, costituita da una serie di cilindri riscaldati con vapore saturo: qui l'acqua residua trattenuta per capillarità dai fogli viene eliminata per evaporazione. Per evitare che il nastro di carta sia sottoposto a shock termici, la seccheria è suddivisa in più settori, ciascuno con temperatura crescente rispetto ai precedenti. Nei primi settori la temperatura dei cilindri essiccatori è mantenuta attorno a 60-70 °C con temperature della carta attorno a 30 °C. Nei settori intermedi la temperatura dei cilindri è attorno a 90-100 °C fino ad arrivare ai 120-140 °C nelle sezioni finali, con temperatura del foglio attorno a 90 °C. In questa fase, inoltre, è necessario garantire la circolazione di aria calda secca per rimuovere il vapore prodotto ed asciugare progressivamente il foglio di carta. L'aria prelevata dall'esterno viene riscaldata ad alta temperatura per mezzo di bruciatori a gas naturale e insufflata tra i cilindri. L'umidità residua della carta viene pertanto rimossa e le cappe di asciugatura, che racchiudono la seccheria, aspirano ed espellono le *fumane* (l'insieme dei fumi di combustione e aria umida).

Altri impieghi di vapore si hanno in corrispondenza dei servizi ausiliari (depurazione acque, trattamento scarti) e dei servizi generali (riscaldamento e acqua calda sanitaria); si tratta tuttavia di consumi marginali rispetto a quelli sopra elencati e quindi generalmente trascurabili.

Per quanto riguarda il consumo di energia elettrica, nell'industria della carta esso è attribuibile al funzionamento dei motori di stabilimento (compressori, pompe, agitatori, tele essiccatrici, le presse, i rulli di seccheria, i sistemi per il vuoto, gli avvolgitori ecc.).

I fabbisogni energetici nel processo produttivo dipendono sensibilmente dalla materia prima di partenza, dalla tecnologia utilizzata e dal tipo di prodotto finito. Relativamente alla materia prima utilizzata, la principale distinzione riguarda l'impiego di legno per la produzione di polpa vergine (eventualmente con l'aggiunta di polpa di recupero) o l'utilizzo di carta da macero. La produzione di pasta-carta a partire da legno comporta un fabbisogno energetico complessivo di circa 4300 kWh/t, mentre nel caso della carta da macero tale apporto si riduce significativamente (circa 1300 kWh/t).

Per quanto riguarda la produzione di carta o cartone a partire da fibra vergine, sono necessari da 500 a 1300 kWh/t di energia elettrica, fino anche a 2000 kWh/t per alcune tipologie di impasti e prodotti finali, oltre che 1300-3000 kWh/t di calore. Per quanto riguarda la produzione da carta da macero (o fibra secondaria), il fabbisogno di energia elettrica varia da circa 900 kWh/t a 1500 kWh/t, mentre il fabbisogno

di energia termica varia da circa 1100 kWh/t a circa 2300 kWh/t. In Figura 6 si riportano i fabbisogni di energia elettrica e di calore per alcune tipologie di prodotti finali per l'industria della carta.

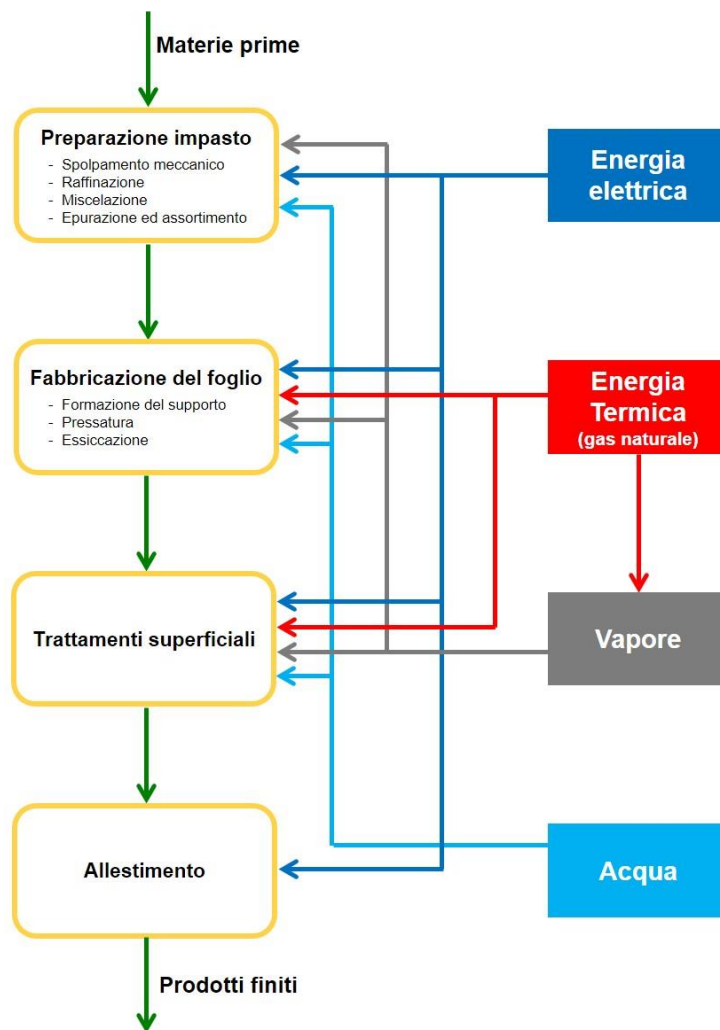


Figura 6. Flussi di materiali ed energia nel layout produttivo di una cartiera tipo [12].

Tabella 4. Consumi specifici di energia elettrica e termica per la produzione di carta e cartone per tonnellata di prodotto [12].

Prodotto	Energia elettrica [kWh _e /t]	Energia termica [kWh _t /t]
Carta e cartone, da fibra vergine	500 – 1300	1300 – 3000
Carta e cartone, da macero	900 – 1500	1100 – 2300
Carta e cartone ondulato	600	1230
Carta usi igienico sanitari	670	1730
Carta da parati	315	910
Altro	465	1290

2.3 Settore vetro

L'industria del vetro è uno dei settori industriali caratterizzati da elevati consumi energetici e per la sua produzione vengono utilizzati essenzialmente i seguenti vettori energetici:

- gas metano;
- energia elettrica;
- olio combustibile;
- gasolio per autotrazione;
- altro (gas tecnici, vapore...)

Nelle varie fasi di lavorazione per la produzione del vetro l'utilizzo dell'energia non è costante e questo è principalmente valido per l'energia termica derivante dall'uso di combustibili fossili. Infatti, il maggior consumo di calore (70-80% del totale fabbisogno termico) è attribuibile alla fusione e formatura, in cui la miscela vetrificabile viene riscaldata fino a raggiungere temperature di circa 1500-1600 °C per poter essere formata. Questa fase avviene all'interno di forni normalmente alimentati con gas metano o con olio combustibile a basso tenore di zolfo. La restante aliquota (circa 20%) dei consumi termici viene impiegata durante la fase di **ricottura**, che consiste in un raffreddamento controllato allo scopo di eliminare le tensioni introdotte nella massa vetrosa durante il processo di formatura. Il vetro all'interno del forno di ricottura (alimentato di solito a metano) viene portato ad una temperatura di 550 °C e raffreddato lentamente. L'energia elettrica viene utilizzata prevalentemente per la fase di preparazione della miscela vetrificabile e per quella di ricottura. Ovviamente essa viene impiegata anche per l'alimentazione di macchine operatrici (compressori, ventilatori e aspiratori), di dispositivi di movimentazione e per l'illuminazione degli ambienti. Complessivamente l'energia elettrica rappresenta un 20-30% dell'energia totale utilizzata per la produzione del vetro. La Figura 7 mostra uno schema semplificato con le distribuzioni dei flussi energetici nelle diverse fasi del processo con una indicazione percentuale dei consumi. Nella produzione italiana del vetro vengono utilizzati prevalentemente impianti alimentati con bruciatori a gas metano mentre per basse capacità produttive e per vetri speciali si adoperano i forni elettrici.

I consumi energetici specifici del vetro, relativi alla fusione di una tonnellata di vetro, variano sensibilmente in relazione alla tipologia di prodotto. In Tabella 5 sono riportati i dati relativi al consumo energetico complessivo del ciclo di produzione (fusione, lavorazione ed attività secondarie), espresso per tonnellata di vetro fuso, per le varie tipologie di vetro, mentre in Tabella 6 si riportano le temperature e le stime dei consumi nelle principali fasi di lavorazione.

Un fattore importante per ridurre la quantità delle materie prime, il consumo di energia e le emissioni di gas serra è rappresentato dal riciclo del rottame di vetro e, a seconda della tipologia da produrre, l'utilizzo del rottame nella miscela vetrificabile varia dal 20 al 90%. L'uso del rottame al posto delle materie prime minerali consente un risparmio di energia nella preparazione della miscela vetrificabile. Infatti essendo il rottame di vetro un semi-lavorato, ciò comporta una riduzione della temperatura di fusione inferiore rispetto a quella richiesta per la fusione della miscela vetrificabile costituita da sole materie prime minerali, passando da 1500-1600 °C a circa 1000 °C. Inoltre, con l'impiego del rottame di vetro al posto delle materie prime si riduce la quantità di anidride carbonica derivante dalla decomposizione dei carbonati presenti nella miscela vetrificabile tradizionale.

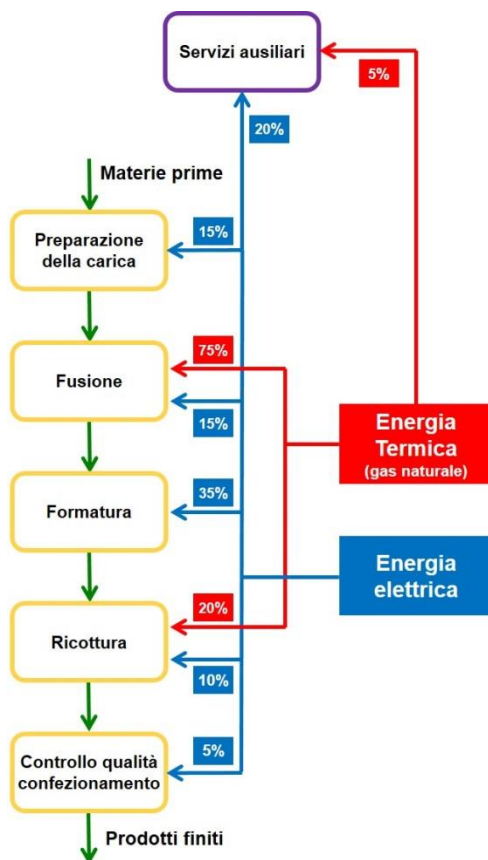


Figura 7. Schema a blocchi del processo di produzione del vetro cavo con la distribuzione dei flussi energetici [12].

Tabella 5. Consumi energetici specifici per tipologia di vetro [12].

Tipologia vetro	Consumo energetico [GJ/t]
Vetro cavo	4 – 10
Vetro cavo per uso domestico	6 – 18
Vetro piano	5 – 10
Vetro borosilicato (tubo e cavo)	4 – 15
Vetro borosilicato (lana e filato)	15 – 30
Vetro al piombo	13 – 28

Tabella 6. Consumi specifici di energia elettrica e calore per singola fase produttiva [12].

Fase	Temperatura [°C]	Energia elettrica [MJ/t]		Gas Naturale [Sm ³ /t]	
		min	max	min	max
Preparazione miscela	Ambiente	23.4	26.0	0	0
Fusione	1400-1600	288.0	612.0	105	135
Ricottura	500-600	46.8	90.0	10	50
Finitura e Imballaggio	Ambiente	21.6	54.0	1	3

2.4 Settore ceramica

L'industria della ceramica e dei materiali refrattari, con un consumo di gas metano pari a 1.5 miliardi di metri cubi all'anno e un fabbisogno di energia elettrica di 1800 GWh/anno, si attesta come il quarto settore industriale per consumi energetici.

Il processo produttivo di uno stabilimento ceramico può essere schematizzato come in Figura 8, dove si evidenziano le varie fasi di trasformazione del prodotto con la corrispondente distribuzione delle risorse. Il processo produttivo per la realizzazione di piastrelle di ceramica è attualmente abbastanza consolidato, eccetto alcune varianti che possono essere introdotte in funzione del tipo di prodotto finito desiderato. Nella produzione italiana delle piastrelle di ceramica la voce energia incide complessivamente per il 20% sul costo di produzione, di cui la maggior parte della spesa energetica è riconducibile al consumo di gas naturale utilizzato come fonte principale per la produzione di energia termica. L'energia termica viene impiegata principalmente nell'atomizzatore, negli essiccatoi e nel forno di cottura. Gli elevati consumi di gas naturale rilevati nel settore ceramico sono dovuti in parte al fatto che a volte è impossibile fermare determinati impianti anche quando la produzione è sospesa: ad esempio, in caso di vuoto di produzione, il forno di cottura non viene mai spento ma si riduce soltanto la temperatura di qualche centinaio di gradi centigradi in attesa della ripresa del flusso produttivo.

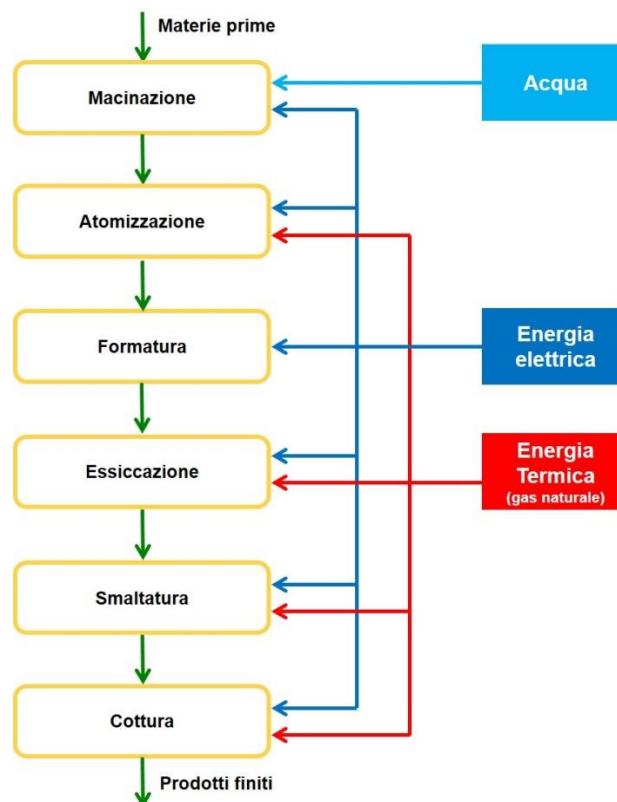


Figura 8. Ciclo produttivo delle piastrelle ceramiche con i flussi delle risorse [12].

In Tabella 7 si riportano gli intervalli di temperatura, i consumi specifici di energia elettrica ed energia termica (gas naturale), le ripartizioni percentuali tra energia elettrica e termica per le fasi più energivore del processo produttivo: da questi valori si evince che le maggiori aliquote dell'energia termica sono imputabili rispettivamente ai forni di cottura, all'atomizzazione e all'essiccazione, mentre i maggior consumi elettrici si hanno nelle fasi di macinazione e di formatura.

Tabella 7. Consumi energetici e ripartizione percentuale tra energia elettrica e termica per le varie fasi nel processo produttivo di piastrelle ceramiche [12].

Fase	Temperatura [°C]	Energia elettrica		Energia termica	
		[%]	[kWh/m ²]	[%]	[Sm ³ /m ²]
Macinazione	Ambiente	100	2.2-5.0	0	0
Atomizzazione	500-600	10-15	0.3-0.6	85-90	1.9-3.0
Formatura	Ambiente	100	0.4-0.93	0	0
Essiccazione	80-160	14-28	0.4-1.35	72-86	0.23-3.4
Cottura	900-1200	7-11	0.22-0.66	89-93	1.16-2.7

Partendo dalle materie prime, nella prima fase di macinazione l'obiettivo è produrre una polvere idonea alla successiva fase di pressatura. Il risultato è un composto dotato di un contenuto d'acqua pari a circa il 30-40%, che viene dapprima inviato ad apposite vasche dotate di agitatori e successivamente all'atomizzatore. Nella fase di **atomizzazione** un essiccatoio a spruzzo (spray dry) provoca l'istantanea evaporazione di gran parte dell'acqua dal materiale grazie ad un forte getto di aria calda (500-600 °C) [17]. L'energia termica consumata prevalentemente in questa seconda fase viene utilizzata per far evaporare l'acqua dal materiale. Generalmente l'atomizzatore funziona con un combustore alimentato a gas naturale oppure, nel caso ci sia un impianto di cogenerazione all'interno dello stabilimento, si può sfruttare il calore dei gas di scarico della turbina a gas. Successivamente alla fase di formatura, in cui si compatta l'impasto precedentemente macinato secondo una determinata forma tramite estrusione o pressatura, occorre rimuovere dal prodotto pressato l'acqua presente in eccesso (fase di **essiccazione**). In questa fase, viene utilizzata prevalentemente energia termica sotto forma di aria calda con temperature di 80-160 °C.

Durante la fase di cottura la piastrella subisce un ciclo termico che consiste in un pre-riscaldamento, la cottura e un raffreddamento. In questa fase il supporto e lo smalto della piastrella vengono cotti in forni a rulli ad alta temperatura (circa 1200 °C) in modo da conferire al prodotto finito le necessarie caratteristiche meccaniche di resistenza. Il reparto di cottura è la fase in cui si rilevano i maggiori consumi termici del processo produttivo.

2.5 Settore cemento

La base principale del cemento è costituita da un semilavorato che prende il nome di “clinker”. Esso si ottiene trattando ad elevate temperature materiali che contengono carbonato di calcio e alte percentuali di silicato di alluminio e ferro: calcari, argille e calcari marnosi.

In Figura 9 sono schematizzate le principali fasi del processo ed i relativi consumi specifici, elettrici e termici. Le fasi indicate sono esclusivamente quelle energivore, trascurando le altre, che sono importanti ai fini del processo ma non del bilancio energetico. Naturalmente la fase più energivora dal punto di vista dei consumi termici è la cottura, con un consumo di 3600 MJ/t di clinker prodotto, mentre dal punto di vista dei consumi elettrici è la macinazione del cotto, con 41.8 kWh/t di cemento prodotto. In Tabella 8 vengono riportate le temperature, la suddivisione dei consumi specifici (elettrici e termici) e le percentuali dei due vettori energetici nelle varie fasi di processo. I dati sui consumi specifici sono ricavati da [14].

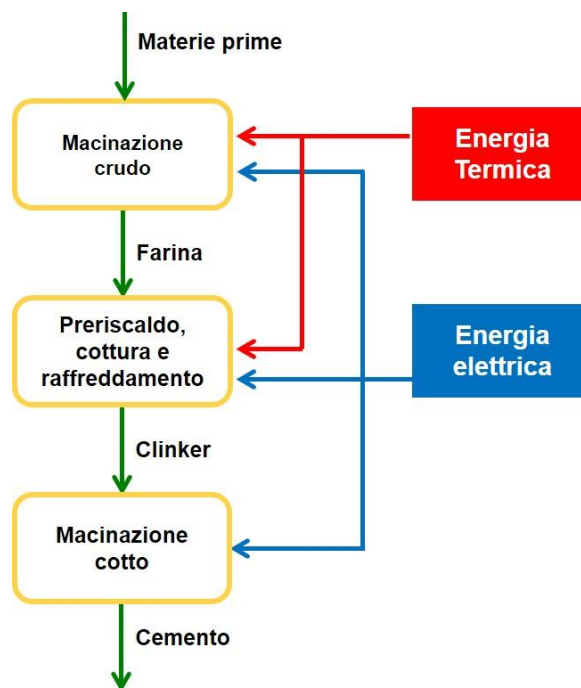


Figura 9. Schema a blocchi delle principali fasi di produzione del cemento e consumi specifici [14].

Tabella 8. Consumi elettrici e termici percentuali riferiti a ciascuna fase di processo [14].

Fase	Temperatura [°C]	Energia elettrica		Energia termica	
		[kWh/t]	[%]	[MJ/t]	[%]
Macinazione crudo	600-750	30.8	28.0	84.0	2.2
Cottura clinker	1400-1500	24.2	22.0	3600.0	96.8
Macinazione cotto	Ambiente	41.8	38.0	0.0	0.0
Usi di processo	NA	13.2	12.0	36.0	1.0
Totale		110	100	3720	100

Le materie prime, caratterizzate da un alto tasso di umidità, vengono contemporaneamente macinate ed essiccate in speciali mulini: l'aria calda, prodotta appositamente o recuperata da cogenerazione, permette di ridurre il contenuto di umidità fino ad essiccare la miscela. Per ottenere l'omogeneità desiderata la farina viene sottoposta ad una successiva agitazione pneumatica e/o meccanica (*macinazione a crudo*).

Segue poi la fase di *cottura*, che consiste in un riscaldamento progressivo della miscela ottenuta fino a raggiungere una temperatura di circa 1500 °C, ed è molto importante perché è la fase in cui si determinano le caratteristiche del prodotto. Essa consiste in un preriscaldamento, dove il materiale raggiunge la temperatura di 850 °C, in cui avvengono la disidratazione e la decomposizione dei prodotti argillosi ed inizia la fase di decarbonatazione del calcare, in cui si elimina l'anidride carbonica. Raggiunta la temperatura di 1450 °C si completa la decarbonatazione e avviene la sinterizzazione, cioè la trasformazione da polvere a materiale compatto, contenente gli ossidi di calcio, silicio, alluminio e ferro presenti nella farina: a queste temperature il materiale diventa clinker da cemento, di forma granulare e colore scuro. Mediante l'immissione di aria fredda il clinker viene sottoposto ad un repentino raffreddamento da 1200 °C a 100-150 °C. Infine per ottenere i vari tipi di cemento il clinker viene macinato in polvere fine e mescolato con altri componenti (come pozzolana naturale, cenere volante, loppa basica d'altoforno, calcare).

Per la ricostruzione dei consumi energetici del settore si fa riferimento ai dati forniti da AITEC all'interno della relazione annuale 2016 [15]. Per il 2016 i consumi elettrici del settore della produzione del cemento si attestano sui 2.3 TWh. Per soddisfare i fabbisogni di energia termica vengono utilizzati prevalentemente combustibili fossili, come:

- carbone (fossile e pet-coke), che copre circa l'81% della richiesta termica;
- combustibili solido secondario (CSS) da rifiuti non pericolosi urbani e speciali, che coprono circa il 16%;
- olio combustibile denso, 1%;
- metano, 1%;
- altro (pneumatici e fanghi biologici essiccati).

2.6 Settore chimico

L'industria chimica si compone di diversi sottosettori e presenta al contempo una molteplicità di processi di produzione e una grande diversificazione di prodotti. Inoltre, differentemente dagli altri settori industriali, i combustibili fossili vengono utilizzati non solo per la fornitura di calore, ma anche come materia prima: l'aliquota di idrocarburi utilizzati come materia prima dell'industria chimica rappresenta il 40-50% del totale.

All'interno del settore chimico è possibile distinguere tre principali macro-categorie:

- La chimica di base, sottosettore costituito da un numero limitato di grandi produttori e che produce i costituenti fondamentali della filiera.
- La chimica fine e specialistica, macro-categoria molto articolata che fornisce a tutti gli altri settori industriali beni intermedi fortemente differenziati.
- La chimica dei detersivi e cosmetici, destinata al consumatore finale che offre oltre ad alcune tipologie di pitture e vernici, è destinata al consumatore finale e rappresenta il restante 15% del mercato di settore.

Nel mercato italiano del settore chimico questi tre macro-categorie rappresentano rispettivamente il 43%, il 42% e il 15% della produzione totale. Di seguito si riporta una sintetica descrizione dei principali prodotti e processi chimici.

Petrolchimica. Il sottosettore petrolchimico è rivolto alla produzione di composti organici dell'industria chimica, che serve a soddisfare la richiesta per la produzione di molti prodotti di consumo e industriali. In particolare, il sottosettore petrolchimico è caratterizzato da una grande varietà di prodotti e pertanto i processi di produzione variano da un prodotto all'altro, differenziandosi nel diverso utilizzo di materie prime e delle attrezzature. Di conseguenza, i consumi energetici sono eterogenei e tipicamente il combustibile costituisce anche la stessa materia prima. Dal punto di vista energetico i due processi più importanti del sottosettore sono il *cracking* (vapore, catalitico o visbreaking) e il *reforming*. Il primo costituisce il processo in cui grandi molecole di idrocarburi vengono scomposte in unità più piccole, mentre il reforming, mediante l'impiego di calore, pressione e/o catalizzatore, converte miscele di idrocarburi di una frazione petrolifera in miscele di idrocarburi diversi.

Inorganica di base. L'industria della chimica inorganica produce una grande varietà di prodotti, molti dei quali sono utilizzati come reagenti o materie prime nelle industrie farmaceutiche, elettroniche e della high-tech e nella preparazione di specialità inorganiche (principalmente catalizzatori e pigmenti). Analogamente al sottosettore petrolchimico, l'energia consumata varia in modo significativo per la produzione dei prodotti inorganici. In questo sottosettore i processi per la produzione di ammoniaca e di cloro sono quelli che richiedono i consumi di energia più elevati.

Polimeri. I polimeri sono macromolecole costituite dall'unione di molecole semplici (i monomeri), unite a catena. Essi si ottengono attraverso due tipi di reazione di polimerizzazione: la poliaddizione e la policondensazione. A seconda del prodotto, durante la fase di reazione, al fine di costituire le catene di monomeri, i legami chimici che tengono insieme i monomeri vengono alterati utilizzando combinazioni di calore, pressione e catalizzatori. Le materie prime più utilizzate nella produzione di polimeri sono etilene e propilene che generano rispettivamente polietilene (PE) e polipropilene (PP).

Prodotti chimici di consumo. Nel sottosettore dei prodotti chimici di consumo rientra la produzione di saponi, detersivi e profumi, caratterizzata da una vasta gamma di operazioni di lavorazione e confezionamento. Le fasi principali per la produzione del sapone sono: i) la saponificazione, che consiste nell'idrolisi di un estere, in condizioni basiche a 80 °C; ii) l'essiccazione; iii) l'amalgamazione, in cui i granuli di sapone sono miscelati con gli altri ingredienti (fragranza e coloranti); iv) la laminazione, per fondere e creare una consistenza uniforme; v) il taglio per realizzare la forma finale. Analogamente al sapone, i detersivi vengono prodotti attraverso le fasi di agglomerazione, di essiccazione a spruzzo e di miscelazione a secco. La produzione dei profumi è caratterizzata da due fasi principali: l'estrazione e la miscelazione. L'estrazione consiste nella rimozione di oli dalle sostanze vegetali mediante distillazione a

vapore o estrazione con solvente ed è quella più energivora. Segue poi la miscelazione in cui gli oli raccolti vengono miscelati con altre sostanze sulla base di formule predeterminate.

Chimica fine e specialistica. Questo sottosettore riguarda principalmente la produzione di vernici e pesticidi. Le vernici sono costituite generalmente da resine, pigmenti e agenti additivi e la prima fase del processo consiste nella miscelazione di questi componenti per la produzione di una pasta. Tale fase varia a seconda della destinazione d'uso della vernice: in ambito industriale, la pasta viene solitamente processata in una fresatrice (un cilindro di grandi dimensioni che movimentata minuscole particelle di sabbia o silice) per macinare le particelle di pigmento, rendendole più piccole e disperdendole; per uso commerciale, la vernice viene preparata agitando la miscela e mescolando il pigmento nel solvente all'interno di un serbatoio di dispersione ad alta velocità. Dalla reazione chimica di due o più materie prime (organiche o inorganiche) in presenza di solventi, catalizzatori e reagenti è possibile ottenere i pesticidi e questa reazione può avvenire in uno o più passaggi. Nel secondo caso, dopo la reazione seguono le fasi di frazionamento, separazione, essiccazione.

In Tabella 9 si riportano i consumi elettrici e termici in GWh, relativi all'anno 2016, per i sottosectori dell'industria chimica italiana. Il petrolchimico e il sottosettore "inorganica di base" coprono il 72% dell'energia totalmente consumata.

Tabella 9. Consumi di energia elettrica e termica del 2016 per i sotto-settori dell'industria chimica italiana [12].

Sotto-settore	Consumi elettrici [GWh_e]	Consumi termici [GWh_t]
Fabbricazione di gas industriali	743.74	3270.27
Fabbricazione di coloranti e pigmenti	587.16	2581.79
Fabbricazione di altri prodotti chimici di base inorganici	782.88	3442.39
Fabbricazione di altri prodotti chimici di base organici	2152.92	9466.58
Fabbricazione di fertilizzanti e composti azotati	665.45	2926.03
Fabbricazione di materie plastiche in forme primarie	2036.59	8973.44
Fabbricazione di gomma sintetica in forme primarie	977.49	4279.77
Fabbricazione di agrofarmaci e di altri prodotti chimici per l'agricoltura	306.03	1298.87
Fabbricazione di pitture, vernici e smalti, inchiostri da stampa e adesivi sintetici (mastici)	270.50	816.27
Fabbricazione di saponi e detergenti, di prodotti per la pulizia e la lucidatura	179.92	537.51
Fabbricazione di profumi e cosmetici	227.54	679.80
Fabbricazione di esplosivi	131.33	537.36
Fabbricazione di colle	156.60	644.95
Fabbricazione di oli essenziali	197.00	806.19
Fabbricazione di prodotti chimici nca	1090.06	4460.94
Fabbricazione di fibre sintetiche e artificiali	240.30	320.20

2.7 Settore alimentare

Il settore alimentare, analogamente all'industria chimica, si distingue dagli altri comparti industriali per la molteplicità dei processi di lavorazione e la grande diversificazione dei prodotti.

La quota di energia associata alla produzione di beni alimentari dipende dal tipo di alimento (animale o vegetale), dalle tecniche e tecnologie di coltivazione, di trasformazione e di trasporto: per ogni chilogrammo di bene alimentare il consumo di energia varia da un minimo di circa 0.5 kWh a un massimo di 61 kWh [16]. In Tabella 10 si riportano i consumi energetici (elettrici e termici) per i principali sotto-settori dell'industria agro-alimentare.

Tabella 10: Consumi energetici relativi ai sotto-settori dell'industria alimentare [12].

Sotto-settore	Consumo specifico elettrico [kWh_e/t]	Consumo specifico termico [kWh_t/t]
Lavorazione e conservazione di carne e produzione di prodotti a base di carne	302	388
Lavorazione e conservazione di pesce, crostacei e molluschi	37	44
Lavorazione e conservazione di frutta e ortaggi	152	526
Produzione di olii e grassi vegetali e animali	51	170
Industria lattiero-casearia	151	318
Lavorazione delle granaglie, produzione di amidi e di prodotti amidacei	54	34
Produzione di prodotti da forno e farinacei	354	748
Produzione di altri prodotti alimentari	232	503
Produzione di prodotti per l'alimentazione degli animali	35	62

Tuttavia, partendo dalla materia prima fino ad arrivare al prodotto finito, è possibile individuare le varie fasi di lavorazione tipicamente presenti negli stabilimenti di prodotti alimentari e definirne una sequenza logica: in Figura 10 si riporta un diagramma di flusso generale di tutti i processi di lavorazione dell'industria alimentare, adattabile per i vari sotto-settori e prodotti. Ovviamente, nonostante questa classificazione, non è possibile definire i consumi specifici energetici per i vari sotto-processi se non in maniera approssimativa, data la numerosità dei processi e la variabilità delle tecnologie utilizzate. In maniera indicativa il 33% dei consumi di energia è attribuibile alle principali operazioni, quali riscaldamento, essiccazione, refrigerazione, surgelazione, sterilizzazione e sanificazione. La richiesta energetica per i processi ausiliari (generazione di calore, vapore, aria compressa e freddi) si attesta intorno al 50% dei consumi totali mentre la restante aliquota è mediamente distribuita su tutti gli altri sottoprocessi.

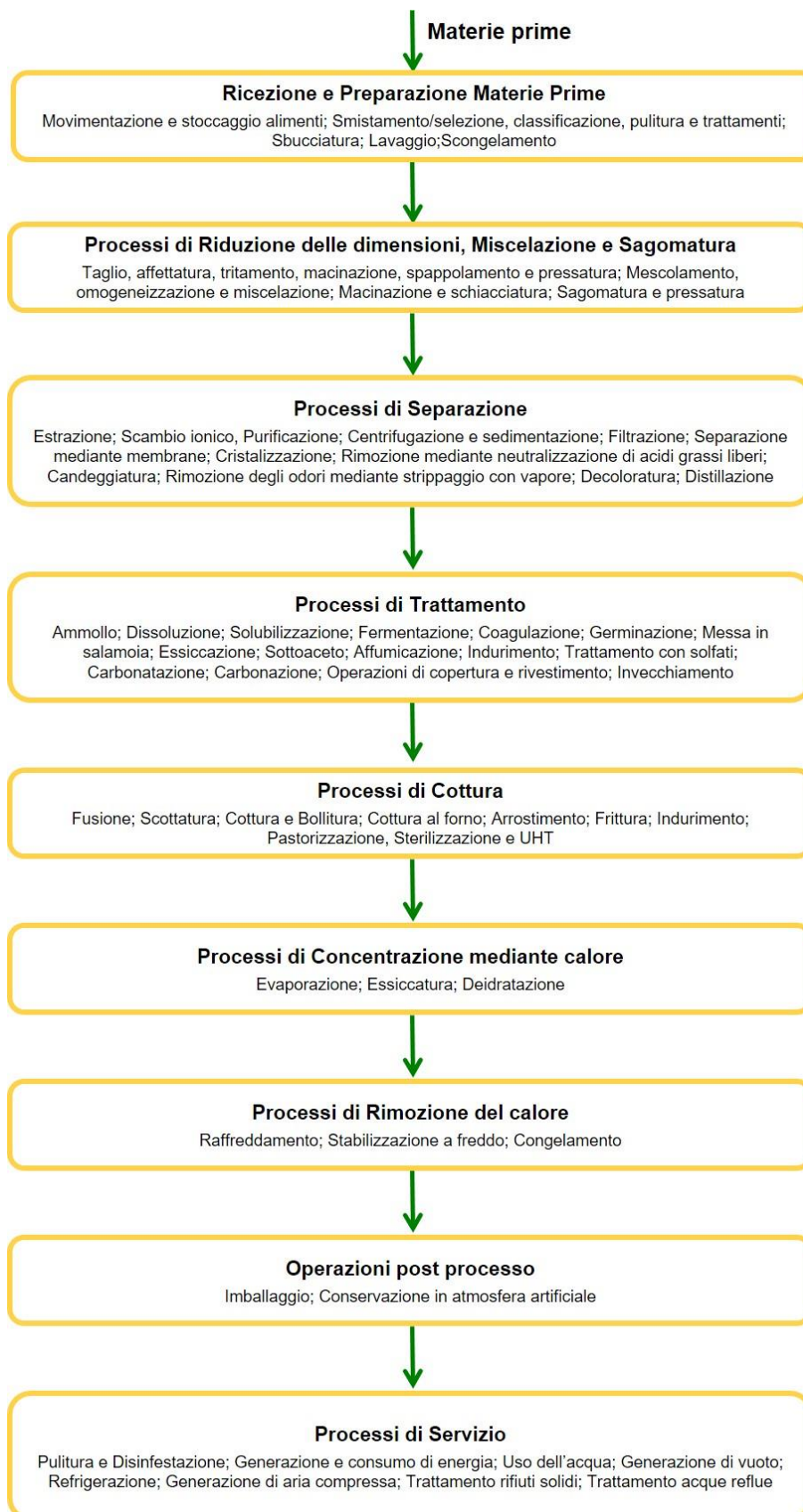


Figura 10. Diagramma di flusso dei sotto-processi tipicamente presenti negli stabilimenti di produzione alimentare secondo un percorso logico di processo dalla materia prima al prodotto finito [12].

3 Offerta tecnologica degli impianti CST

La produzione di calore da tecnologia CST (Concentrated Solar Thermal) per l'alimentazione di processi cogenerativi è una prospettiva applicativa già validata a livello sperimentale e pronta per la commercializzazione [9-11], sia in termini di trigenerazione (elettricità, calore e refrigerazione) che di multigenerazione (servizi energetici quali elettricità, calore, refrigerazione e dissalazione). La produzione di calore da CST per l'alimentazione termica di processi industriali, soprattutto ad alta temperatura, è invece un settore applicativo nuovo, che conta poche verifiche sperimentali ma notevoli prospettive di sviluppo.

In particolare, per utenze che richiedono calore a bassa temperatura (<200 °C), l'utilizzo di sistemi a concentrazione può essere di fatto limitata agli impianti di cogenerazione o multigenerazione, in cui il calore è un sottoprodotto del processo termodinamico mediante il quale si ottiene la generazione elettrica. A questi livelli termici, in assenza di cogenerazione o poligenerazione, pur essendo possibile impiegare sistemi a inseguimento del sole e concentrazione, è consolidato l'impiego di tecnologie solari basate su "impianti solari termici" che utilizzano semplici ed economici pannelli piani, senza concentrazione o con fattori di concentrazione molto bassi [6].

La concentrazione con inseguimento diviene invece necessaria per sistemi a media temperatura (200-400 °C) e ovviamente per sistemi ad alta temperatura (400-550 °C). Con la concentrazione della radiazione solare è possibile ottenere calore anche a temperature superiori (fino a 800-1200 °C) per applicazioni di chimica solare, a carattere ancora sperimentale: ad esempio produzione di idrogeno da scissione dell'acqua o di altri combustibili sintetici per via termochimica.

Di seguito vengono descritte con maggior dettaglio le principali caratteristiche tecniche e i campi di applicazione delle tecnologie CST/CSP utilizzabili per la fornitura di calore di processo/elettricità. Le due tecnologie sono equivalenti in termini di campo solare e stoccaggio termico, ossia nella conversione della radiazione solare in calore, ma differiscono nell'output di processo (calore/elettricità).

3.1 Introduzione

Nella tecnologia solare a concentrazione per la generazione elettrica (CSP, Concentrated Solar Power) la radiazione solare diretta viene riflessa, concentrata e convertita in calore ad alta temperatura. L'energia termica viene poi trasformata in elettricità attraverso l'impiego di cicli termodinamici: nella maggior parte dei sistemi odierni, l'energia del sole viene trasferita ad un fluido termovettore (HTF) che alimenta un generatore di vapore integrato in un ciclo Rankine, in analogia alle centrali termiche convenzionali. Lo step intermedio di produzione di calore consente non solo di generare elettricità, ma anche di alimentare termicamente processi cogenerativi, per usi industriali e civili, e di programmare la produzione di energia elettrica mediante sistemi di accumulo termico (*thermal energy storage*, TES) tecnologicamente maturi, in un'ottica di generazione dispacciabile, ad oggi non perseguibile attraverso altre tecnologie energetiche rinnovabili [18]. Infatti, grazie alla disponibilità di soluzioni commerciali per l'accumulo termico, il solare a concentrazione è una tecnologia intrinsecamente flessibile, che può supportare nel prossimo futuro una maggiore penetrazione nel mix energetico anche delle fonti rinnovabili non programmabili come eolico e fotovoltaico (PV).

Le aree geografiche che presentano elevati valori di radiazione solare diretta costituiscono la cosiddetta "Sun Belt" [19], cioè la fascia della superficie terrestre ad elevato irraggiamento solare annuo, idonea all'installazione degli impianti solari a concentrazione. A questa zona appartiene la parte meridionale ed occidentale degli Stati Uniti, l'America Centrale e Meridionale, i Paesi europei dell'area mediterranea, i Paesi del Nord Africa, il Sud Africa, il Medio Oriente, l'Iran e le pianure desertiche dell'India, del Pakistan, dell'ex Unione Sovietica, la Cina e l'Australia. I Paesi del Nord Africa e il Medio Oriente, oltre a registrare i picchi massimi di irraggiamento solare annuo, possiedono vaste aree territoriali desertiche e quindi inadatte all'utilizzo in agricoltura o alla pastorizia, e si pongono pertanto come candidate ideali per

l'installazione di grandi impianti solari. In Italia sono chiaramente favorite la fascia meridionale e le isole maggiori, ma anche nel centro-nord si possono individuare zone idonee per specifiche applicazioni.

Nell'ultimo decennio il settore del solare a concentrazione ha conosciuto rilevanti progressi in termini di incremento dell'affidabilità, efficienza impiantistica e riduzione dei costi. Tali progressi sono stati raggiunti sia attraverso l'esercizio degli impianti commerciali esistenti e la costruzione di nuove installazioni, sia attraverso lo sviluppo di soluzioni tecnologiche innovative per i componenti di impianto (collettori/ricevitori/sistemi di accumulo). Attualmente, a livello mondiale, la capacità installata equivalente degli impianti CSP è pari a 5.5 GW [20], di cui 61% localizzati in Spagna e 18% negli USA [3] mentre la capacità degli impianti in via di realizzazione e in via di progettazione è pari a 1.2 e 2.7 GW rispettivamente [20].

L'esperienza operativa mostra che questi impianti, tipicamente realizzati in 1-3 anni (dipendentemente dalla taglia), possono essere eserciti per oltre 30 anni. Generalmente, in circa 6 mesi di operatività, restituiscono l'energia consumata per la loro costruzione [19]. L'utilizzo di terreno associato all'impianto dipende da molti fattori, ma può essere stimato indicativamente pari a circa 2 ettari per MW_e installato.

La maggior parte degli impianti è dotata di sistema di accumulo termico, con capacità di accumulo equivalente variabile da 3 a 15 ore (ore di produzione a pieno carico), come nel caso di Gemasolar, un impianto da 20 MW_e con fattore di capacità pari al 74%, situato nei pressi di Siviglia in Spagna, che in estate può lavorare continuativamente anche per l'intera giornata.

Dal punto di vista impiantistico, la tecnologia CSP comprende quattro varianti correlate al tipo di sistema di captazione solare:

- collettore parabolico lineare (PT);
- collettore lineare Fresnel (FR);
- torre solare (ST);
- disco parabolico (SD).

In Tabella 11 sono riportati alcuni valori caratteristici di concentrazione, taglia media, efficienza globale (di picco e media annua), e temperatura associabile alle varie tipologie di impianti CSP. L'efficienza globale è intesa come il rapporto tra la produzione elettrica netta e la radiazione solare diretta raccolta.

Tabella 11. Caratteristiche tecniche delle diverse tipologie di impianti CSP [19, 21].

Sistema	Fattore di concentrazione	Taglia	Efficienza globale di picco	Efficienza globale media annua	Temperatura massima	Temperatura ottimale
	[adim]	[MW]	[%]	[%]	[°C]	[°C]
Parabolico lineare	70-80	1-700	24-28	12-16	750-850	350-450
Fresnel lineare	25-100	1-700	20	9-11	600-900	300-450
Torre solare	300-1000	1-200	22-24	16-18	1250-1750	600-900
Disco Parabolico	300-2000	0.001-0.03	24-26	13-16	1250-2100	600-1000

È chiaro che solo le prime tre tecnologie elencate in Tabella 11 sono idonee, per taglia applicativa, alla fornitura di calore a processi industriali e verranno pertanto descritte brevemente nel prosieguo del lavoro.

3.1.1 Torre solare

Le centrali solari a torre, chiamate anche a “ricevitore centrale”, prevedono l'utilizzo di un campo di specchi (eliostati) che individualmente focalizzano la radiazione su un ricevitore, posizionato sulla sommità di una torre solare, nel quale circola un fluido termovettore che assorbe la radiazione concentrata (Figura 11). Ogni eliostato insegue lo spostamento apparente del sole muovendosi su due assi. Il concentratore è costituito da un elevato numero di eliostati a formare una superficie riflettente di migliaia di metri quadrati (campo solare); i raggi solari che colpiscono ogni eliostato vengono riflessi su un punto focale, fisso nel tempo, che equivale al punto focale del paraboloide. I fluidi termovettori potenzialmente utilizzabili sono gas, vapore, sali fusi o olio diatermico.

I principali vantaggi di questa tipologia di sistema sono di seguito elencati:

- l'energia solare viene raccolta e concentrata su un ricevitore unico direttamente collegato all'unità di stoccaggio, riducendo la lunghezza e l'estensione del circuito che trasporta l'energia termica dal campo solare alle unità di accumulo;
- i rapporti di concentrazione sono compresi nel range 300-1500, garantendo elevate efficienze di trasformazione dell'energia solare in elettricità;
- le considerevoli dimensioni di impianto (solitamente superiori ai 10 MW_e installati) favoriscono l'economia di scala.

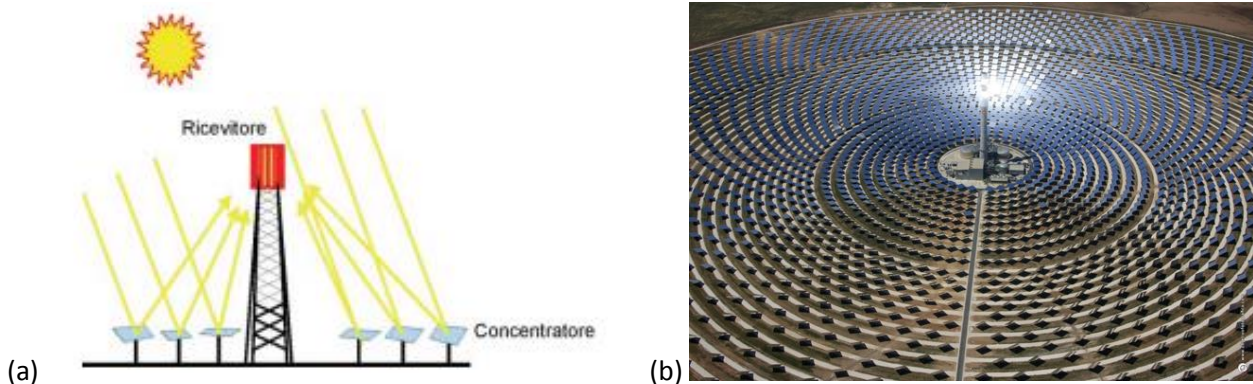


Figura 11. Schema concettuale di un sistema a ricevitore centrale (a) [22] e impianto di concentrazione Gemasolar (Torresol) (b).

I ricevitori degli impianti a torre sono sistemi complessi, con geometrie e design variabili dipendentemente dalle applicazioni. Tra di essi una tipologia spesso utilizzata è quella volumetrica, nella quale la radiazione concentrata, dopo aver attraversato una finestra di quarzo, viene assorbita da un materiale poroso che trasferisce il calore al fluido termovettore. Talvolta il ricevitore è dotato di concentratore secondario (spesso un CPC, concentratore parabolico composito) per accrescere il fattore di concentrazione e per schermare il sistema posto intorno e dietro il ricevitore. La tecnologia a ricevitore centrale è caratterizzata da elevati fattori di concentrazione (circa 1000 contro i 25-100 dei Fresnel e i 70-80 dei parabolici lineari) e pertanto da elevate temperature operative, a fronte però di un maggiore uso del terreno, soprattutto in riferimento al caso dei Fresnel (2.5 volte superiore).

Come precedentemente menzionato, gli impianti solari a ricevitore centrale possono impiegare, come fluido termovettore, vapore acqueo (Direct Steam Generation-DSG), olio diatermico, sali fusi o gas ad alta temperatura, inclusa l'aria.

Il DSG elimina la necessità di uno scambiatore tra il fluido di trasferimento primario (es. sali fusi) e il ciclo termodinamico per la produzione di energia elettrica, ma rende lo stoccaggio termico più difficile.

Dipendentemente dal fluido termovettore impiegato e dalla tipologia di ricevitore adottata, le massime temperature operative sono comprese nel range 250-300 °C (vapore acqueo), 250-390 °C (olio diatermico), 290-565 °C (sali fusi) e 300-1000 °C (gas).

Il livello di temperatura del circuito primario determina ovviamente le condizioni operative e le efficienze di trasformazione della parte convenzionale dell'impianto di generazione di potenza.

Gli impianti a torre sono spesso dotati di sistema di accumulo termico: allo stato attuale le migliori prestazioni sono state ottenute utilizzando sali fusi come fluido termico e come materiale di accumulo a 565 °C, come nel già citato impianto Gemasolar (Spagna).

Accumuli termici realizzati in materiale ceramico sono stati proposti per le alte temperature, tipicamente in accoppiamento con aria come fluido termovettore, come nell'installazione sperimentale del DLR a Juelich (Germania), in cui un letto di materiale inerte può garantire una continuità operativa di circa 3 h al power block. Questo impianto ha una potenza pari a 1.5 MW_e ed è costituito da 2153 eliostati di 8 m² l'uno. La torre, in questo caso, è alta 60 m e il ricevitore ad aria è composto da elementi ceramici. Il ciclo di potenza accoppiato è del tipo Rankine a vapore. Tale piattaforma sperimentale è stata spesso utilizzata per le attività dimostrative di progetti europei in ambito termochimico, quali HYCYCLES e SOL2HY2, focalizzati sulla produzione di idrogeno dall'acqua, che hanno visto anche la partecipazione e il contributo tecnico da parte di ENEA.

Al momento, tra i più importanti sistemi installati a torre si possono annoverare il PS10 e il PS20, impianti dimostrativi situati in Spagna, con capacità di 11 e 20 MW_e rispettivamente. Entrambi sono dotati di un accumulo termico a vapore di 30 minuti, per assicurare continuità di produzione elettrica anche in condizioni di radiazione variabile.

L'impianto Ivanpah, realizzato in California, ha una potenza pari a 370 MW_e. Il campo solare ha una superficie di 14·10⁶ m², con 173500 specchi suddivisi in tre unità.

Tipicamente i grandi impianti hanno campi solari molto estesi e costosi, fortemente distanziati dalla torre centrale. Ciò comporta maggiori perdite ottiche, maggior assorbimento atmosferico e alte deviazioni angolari dovute ad imperfezioni del sistema di inseguimento.

L'efficienza globale di conversione della radiazione solare in energia termica dipende dai seguenti parametri:

1. efficienza ottica (53-57%), che include gli effetti dell'angolo di incidenza, errore nell'inseguimento della radiazione, accuratezza geometrica degli specchi per focalizzare la luce sul ricevitore, ombreggiamento che una fila di specchi produce sulle altre, riflettività dello specchio, pulizia degli specchi, ombreggiamento del ricevitore, trasmittanza della finestra del ricevitore, assorbimento del ricevitore;
2. efficienza termica del ricevitore (70-85%), associata alle perdite per irraggiamento e per convezione. Queste ultime sono riducibili attraverso l'utilizzo di una coibentazione efficace mentre le perdite per radiazione, che sono una funzione della temperatura superficiale del ricevitore elevata alla quarta potenza, possono essere limitate attraverso l'impiego di rivestimenti selettivi;
3. perdite delle tubazioni (0.96-0.97), dipendenti dalla temperatura del fluido e dalla superficie delle tubazioni esposta alle condizioni ambientali [23].

A questi termini di efficienza va sommato il contributo del sistema di accumulo, le cui perdite termiche sono comprese nel range 0.5-1.0%.

3.1.2 Collettori parabolici lineari

La tecnologia di tipo parabolico lineare (Trough) è la più matura nell'ambito dei sistemi di produzione energetica a concentrazione solare, e conta più del 90% della capacità CSP al momento installata.

Tale tecnologia si basa sull'utilizzo di specchi parabolici che concentrano i raggi del sole su tubi ricevitori localizzati sulla linea focale. I tubi ricevitori sono dotati di un rivestimento selettivo (coating) per massimizzare l'assorbimento di energia e minimizzare le perdite per reirraggiamento e di una camicia esterna in vetro sotto vuoto per ridurre le perdite per convezione verso l'ambiente.

Il calore solare è assorbito dal fluido termovettore (olio diatermico, sali fusi, aria, gas, etc.) che scorre all'interno del tubo ricevitore ed è trasferito, mediante scambiatore, ad un generatore di calore per la produzione di vapore surriscaldato. Il ciclo termodinamico in accoppiamento è pertanto del tipo Rankine a vapore.

Specchi e ricevitori inseguono il percorso apparente del sole lungo un solo asse, in genere da Est ad Ovest. Il collettore solare, costituito essenzialmente da una serie di specchi e dal tubo ricevitore, può raggiungere i 100 m di lunghezza, con un'apertura curva di 5-6 metri. Ad esso tipicamente si associa un incremento di temperatura del fluido termovettore di circa 50-60 °C. Pertanto occorre una serie di collettori interconnessi (stringa o loop) per ottenere un aumento di temperatura di circa 200-300 °C.

Riguardo le temperature operative, i livelli termici massimi ottenibili sono 390 e 550 °C nel caso di utilizzo di olio diatermico e sale fuso, rispettivamente. La maggior parte degli impianti entrati in funzione nell'ultimo decennio impiegano olio diatermico come fluido termovettore e sali fusi come materiale di accumulo termico. Tuttavia l'utilizzo del sale fuso come fluido termovettore, tecnologia sviluppata da ENEA e applicata per l'Archimede Solar Plant (5 MW_e) nel 2010 [24], per l'impianto dimostrativo PCS del CR ENEA Casaccia (250 kW_t del 2003), per l'impianto Archimede Solar Energy del 2014 (2 MW_t) a Massa Martana (Perugia) [25] e per l'impianto MATS da 5 MW_t inaugurato nel 2018 (Borg El Arab, Egitto, Figura 12a) [26-27], comporta vantaggi, oltre che dal punto di vista ambientale, anche in termini di efficienza di conversione calore-elettricità, e di minori volumi di stoccaggio termico.

L'impianto MATS, realizzato nell'ambito di un progetto europeo coordinato da ENEA (VII FP, GA No. 268219), oltre a generare 1 MW_e di energia elettrica produce 250 m³ al giorno di acqua dissalata, tramite un impianto di distillazione a multiplo effetto. Inoltre l'impianto è dotato di un generatore di vapore integrato nel serbatoio di accumulo di calore, che è di tipo termocline ed usa sali fusi binari come HSM (Heat Storage Media).

I principali impianti al momento operativi hanno capacità produttive variabili tra 14 e 80 MW_e ed efficienza globale di conversione, intesa come rapporto tra l'energia elettrica netta prodotta e l'energia termica solare massima disponibile (prodotto della DNI per la superficie del campo solare), compresa nel range 14-17%.

Oltre all'impianto SEGS, costituito da 9 unità per un totale di 354 MW_e, operativo dal 1980, i principali e più recenti impianti parabolici lineari includono 2 unità da 70 MW_e negli USA (Nevada Solar One e MNGSEC in Florida), circa 30 unità da 50 MW_e in Spagna e diverse unità più piccole in altri paesi.

Vale qui la pena menzionare anche i tre impianti Andasol da 50 MW_e di ACS/Cobra e Marquesado Solar, e i 2 (sempre da 50 MW_e) (Valle I e II) della Torresol Energy, tutti installati in Spagna, che usano olio diatermico come fluido termovettore e sale fuso come materiale per l'accumulo termico. Questi impianti hanno sistemi di accumulo della durata di circa 7.5 ore, con un fattore di capacità fino al 40%.

Altri grandi impianti recentemente entrati in funzione, che utilizzano olio diatermico come fluido termovettore, sono il Mojave Project, senza accumulo (250 MW_e, in California, sviluppato da Abengoa, con un'occupazione totale di 7.13 km²), il Solana Project, Figura 12, in Arizona (280 MW_e, sviluppato da Abengoa con una superficie specchi di 2.2 km² e 7.8 km² di occupazione totale), che utilizza sali fusi come materiale di stoccaggio (6h), lo Shams1 (100 MW_e) realizzato da Abengoa e Masdar negli Emirati Arabi da 0.627 km² di superficie specchi e 2.2 km² di occupazione totale, senza accumulo termico, e il Godawari Solar Project (50 MW_e) realizzato in India dalla Godawari Green Energy, senza stoccaggio termico, con un campo specchi di circa 0.4 km² ed un'occupazione totale di 1.5 km². In particolare nei primi tre impianti viene utilizzato il Therminol VP1, mentre nell'ultimo Dowtherm A.

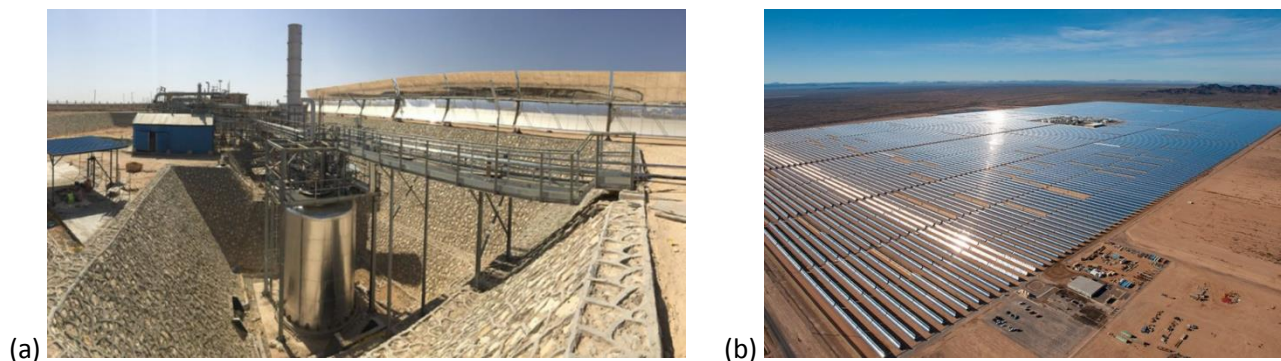


Figura 12: Immagini dell'impianto MATS (Egitto) con un particolare sull'accumulo termico (a) e del Solana Solar plant (Arizona) (b).

Infine è doveroso menzionare l'impianto DEWA, attualmente in fase di realizzazione negli Emirati Arabi Uniti, con una potenza globale di circa 700 MW_e, costituito da collettori parabolici lineari e una torre alta 260 metri, con accumulo fino 15 ore. L'impianto è in fase finale di realizzazione ed il costo previsto dell'energia elettrica prodotta è pari a 7.3 c\$/kWh, con un investimento di circa 3.87 miliardi di USD (dollari americani) su una vita utile di impianto di 35 anni.

Al momento sono commercialmente disponibili anche i cosiddetti sistemi "mini-trough", utilizzati per campi solari di dimensioni inferiori ai 1000 m². Questa tecnologia è caratterizzata dall'utilizzo modulare di collettori di piccola taglia (lunghezza dei collettori: 20-40 m) e dalle molteplici possibilità di installazione, anche sui tetti, senza rinunciare alla precisione del sistema di inseguimento. Le applicazioni di solar cooling o sfruttamento del calore di processo (1 m² di specchi può produrre fino a 1000 kWh termici l'anno [28]) sembrano essere le promettenti prospettive di applicazione.

3.1.3 Collettore lineare Fresnel

Un'evoluzione del collettore parabolico lineare è il cosiddetto Fresnel, dove il concentratore è sostituito da segmenti di specchi piani o leggermente curvi, disposti secondo il principio della lente di Fresnel, ossia con il sezionamento della superficie continua di una lente convenzionale in un insieme di superfici aventi discontinuità (Figura 13). Questo accorgimento permette una riduzione di spessore e quindi di peso e volume del concentratore. Nel collettore Fresnel il tubo ricevitore, posizionato lungo l'asse focale, è fisso e pertanto la movimentazione riguarda solo il concentratore, a differenza del collettore parabolico lineare. La circolazione del fluido termovettore all'interno del tubo ricevitore non richiede l'utilizzo di tubi flessibili nel collegamento tra i singoli collettori e tra i collettori e le tubazioni della rete di distribuzione. Il tubo ricevitore è in genere costituito da un tubo in acciaio protetto all'esterno da un tubo di vetro, che di norma non è mantenuto sottovuoto. Il tubo ricevitore è dotato di un concentratore (riflettore) secondario, per recuperare parte della radiazione dispersa a causa delle inferiori prestazioni ottiche di questo tipo di sistema di concentrazione. Gli specchi (o riflettori primari) sono in grado di ruotare lungo l'asse longitudinale in modo da inseguire il moto del sole e mantenere la radiazione solare costantemente riflessa sul tubo ricevitore. Essi possono essere montati in prossimità del terreno per ridurre gli effetti dell'azione del vento e permettere un più facile lavaggio e manutenzione. Queste caratteristiche li rendono particolarmente adatti per applicazioni termiche a bassa e media temperatura.

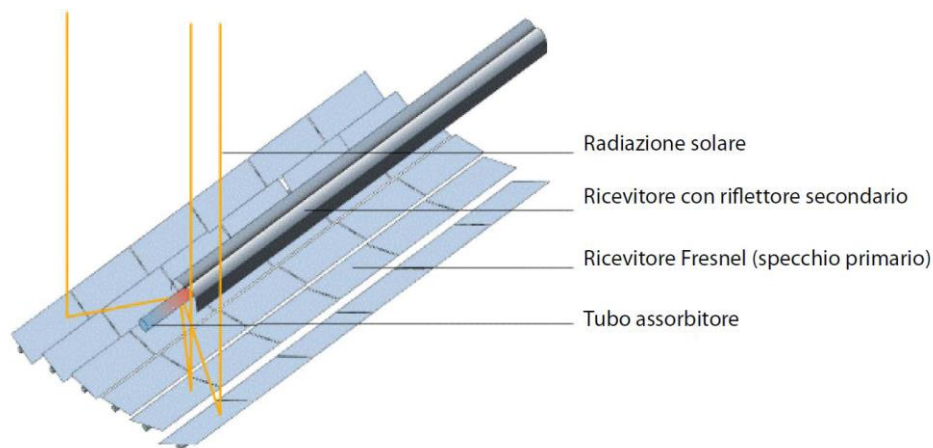


Figura 13 - Schema di funzionamento del collettore Fresnel [29].

Gli impianti Fresnel possono rappresentare una valida alternativa rispetto agli impianti a collettori parabolici lineari grazie alle seguenti caratteristiche: l'effetto ombra tra concentratori vicini è trascurabile e, non dovendo distanziare le file di collettori, si può ottenere un miglior sfruttamento del terreno (70% contro il 33% dei parabolici lineari); i costi di installazione sono inferiori per il minore impegno di materiali e la minore precisione ottica. Per contro il loro rendimento medio è inferiore a quello degli impianti a collettori parabolici lineari a causa della minore efficienza dei collettori (tubo ricevitore non isolato sotto vuoto, ridotta efficienza ottica del sistema di concentrazione) e del minore rendimento del ciclo termodinamico (temperature operative inferiori). In aggiunta, l'effetto coseno è presente oltre che nelle perdite longitudinali anche in quelle trasversali e le righe di specchi paralleli generano maggiori perdite per l'effetto di ombreggiamento. Tipicamente i fattori di concentrazione di tali collettori variano tra 25 e 40, contro i 50-100 dei sistemi lineari. I collettori possono essere molto lunghi, anche 800-1000 m; ciò permette la riduzione dei cambi di direzione dei flussi di acqua/vapore con conseguente abbattimento delle perdite di carico nei tubi.

La posizione stabile del tubo ricevitore e delle sezioni di specchi rende la distribuzione della radiazione sul tubo ricevitore abbastanza costante; inoltre gran parte della radiazione colpisce il tubo ricevitore nella parte bassa, aspetto vantaggioso per la generazione diretta di vapore, perché la fase liquida fluisce nella semi-sezione inferiore del tubo.

L'assenza del vuoto nell'involucro di vetro permette di raggiungere pressioni elevate all'interno del tubo ricevitore, che per esempio può operare fino a 50-60 bar, ben al di sopra delle pressioni operative consentite negli impianti parabolici lineari. Per tali caratteristiche, spesso si utilizza acqua pressurizzata come fluido termovettore, con produzione diretta di vapore all'interno del tubo ricevitore, per applicazioni fino a 270 °C e 40 bar, anche se sono state realizzate esperienze con produzione di vapore fino a 450 °C [30]. Per temperature superiori a 270 °C, tipicamente si utilizza olio diatermico e, più recentemente, miscele di sali fusi, in impianti attualmente in costruzione.

A dispetto dei molti vantaggi della generazione diretta di vapore (uso di acqua come fluido termico, assenza di fluidi intermedi, tipo olio o sali fusi, temperature operative fino a circa 450 °C, assenza di scambiatori per l'accoppiamento dei sistemi di generazione di vapore e di assorbimento di calore), il limite principale di questa tecnologia è l'impossibilità di realizzare grandi volumi di accumulo.

Per rispondere alla problematica dell'accumulo, nell'ambito del progetto europeo ORC-PLUS coordinato da ENEA (Horizon2020, Innovation Action nr. 657690), è stata sviluppata e realizzata, sia su scala pilota, sia su scala commerciale (per un impianto da 1 MW_e a Ben Guerir (Marocco)), un'interessante tecnologia di accumulo termico di tipo termoclino, ossia basata sulla stratificazione termica del mezzo di accumulo all'interno del serbatoio. In particolare sono state sperimentate due diverse tipologie di accumulo termoclino: una con olio diatermico (Paratherm NF) e magnetite, ed un'altra con sali fusi ternari composti da NaNO₃, KNO₃ e Ca(NO₃)₂.

Per i collettori lineari Fresnel l'efficienza termica totale, intesa come rapporto tra la potenza termica prodotta dal campo solare e quella intercettata dalla superficie riflettente, si attesta su valori compresi tra il 29 e il 34%. Considerando un'efficienza di trasformazione da termico ad elettrico pari a 37.7% [31], l'efficienza globale di impianto, intesa come rapporto tra la potenza elettrica generata e quella incidente sul campo specchi, è tipicamente compresa nel range 11-13% [22].

Riguardo alla capacità di impianto, al momento i sistemi installati presentano una taglia tipica compresa tra i 5 e i 30 MW_e. A questo riguardo si può menzionare l'impianto di Puerto Errado 2, in Spagna, con una potenza elettrica installata di 30 MW_e. È comunque opportuno segnalare, anche per i collettori Fresnel, l'esistenza di opportunità in piccola scala, come nel caso dei "mini trough" e con le medesime potenzialità applicative.

3.1.4 Mappatura tecnologica dei sistemi CST

Al fine di consentire un matching rapido tra le principali opzioni tecnologiche CST e le possibili applicazioni per la fornitura di calore/vapore all'industria, in Tabella 4 viene fornita, per differenti livelli termici e taglie dell'utenza industriale, la combinazione tecnologica CST più idonea in termini di tipologia di collettori solari, fluido termovettore (HTF) e mezzo di accumulo (HSM).

Riguardo ai fluidi termovettori, nel caso di applicazioni a bassa temperatura può essere conveniente l'uso di olii paraffinici (meno tossici degli oli aromatici), mentre a media temperatura, per piccole utenze, è opportuno ricorrere all'uso di oli aromatici, stabili fino a 400 °C e usualmente impiegati nel trasporto convenzionale del calore industriale; a medio/alta temperatura, soprattutto nel caso di grandi impianti, le miscele di sali fusi (binarie o ternarie) risultano molto promettenti, grazie alla loro elevata stabilità termica e sostenibilità ambientale.

Riguardo ai materiali per l'accumulo, in linea di principio è sempre preferibile adottare l'opzione dello stoccaggio termico diretto, in cui il fluido termovettore coincide con il mezzo di accumulo. Nell'ottica di ridurre il costo dello stoccaggio termico, un approccio che riscuote ampio interesse consiste nella realizzazione di sistemi di tipo "termoclino", potenzialmente idonei al raddoppio della densità di energia stoccata attraverso l'utilizzo di un solo serbatoio in sostituzione dei due impiegati negli attuali sistemi commerciali. Questo tipo di sistemi TES sfrutta la tendenza del fluido di accumulo a stabilire una stratificazione termica nel serbatoio, ottenendo di fatto due strati distinti: uno ad alta temperatura nella zona superiore ed uno a bassa temperatura nella zona inferiore, separati da una zona di transizione tra le due temperature, detta appunto termoclina. ENEA ha sviluppato sistemi innovativi di questo tipo utilizzando come HSM miscele binarie di nitrati, quali il solar salt, o ternarie, quale l'Hitec XL (15 %wt di NaNO₃, 43 %wt di KNO₃ e 42 %wt di Ca(NO₃)₂), dipendentemente dalle temperature operative e dalle applicazioni. A tal proposito è utile menzionare i seguenti progetti realizzativi: i) MATS, nell'ambito del quale è stato sviluppato ed installato un sistema di accumulo termoclino con sali solari e generatore di vapore integrato da 18 MWh_t [27]; ii) ORC-PLUS, nell'ambito del quale sono stati realizzati due prototipi di accumulo termoclino, uno di piccola taglia con due scambiatori coassiali integrati, avente sali ternari (HiTECH XL) come HSM, installato nel CR ENEA Casaccia [32-34], ed un altro di taglia medio/grande (20 MWh_t), avente olio (Delcoterm Solar E15) come HSM, installato a Ben Guerir (Marocco); STS-MED, nell'ambito del quale è stato sviluppato un sistema di accumulo termoclino avente sali fusi ternari come HSM, installato in due differenti taglie prototipali nel CR Casaccia e a Palermo [35]. Per grandi utenze e grandi capacità di accumulo, l'opzione di accumulo più affidabile è comunque il sistema a doppio serbatoio, testato nell'ambito del sopra menzionato Progetto Archimede [24] e ormai consolidato a livello commerciale.

Nel caso di temperature operative inferiori a 400 °C, un promettente sistema di accumulo di tipo indiretto, attualmente in fase di studio presso i Laboratori ENEA, prevede l'utilizzo di materiale a basso costo e facile reperibilità, il calcestruzzo, eventualmente potenziato attraverso l'aggiunta di materiale a cambiamento di fase (PCM). Quest'ultimo infatti integra al calore sensibile del calcestruzzo una quota di calore latente

associato alla transizione di fase, al fine di incrementare la densità di energia accumulata e stabilizzare la temperatura a cui viene rilasciato il calore, come può essere richiesto da una utenza a temperatura fissa.

Nel prosieguo del lavoro verranno analizzati con maggior dettaglio diversi esempi applicativi di accoppiamento tra impianti solari e utenze industriali, evidenziando le specifiche tecniche (i livelli termici operativi, i profili di carico termico, la possibilità di recupero del calore, etc.) e le interfacce di integrazione.

Tabella 12. Matching tra principali opzioni tecnologiche CST e fornitura di calore/vapore all'industria

Temperatura [°C]	Applicazione	Taglia	Tecnologia	HTF	HSM
LT (< 150)	Raffrescamento /calore di processo	Piccola (<1 MW)	mini Fresnel/ mini trough	Acqua/olio paraffinico	Acqua/Vapore; olio in serbatoi termoclini, calcestruzzi, PCM
	Calore di processo	Media (1-10 MW)	Fresnel/ Trough	Acqua/olio paraffinico	Acqua/Vapore; olio in serbatoi termoclini , calcestruzzi, PCM
MT (150-400)	Calore di processo	Piccola	mini Fresnel/ mini Trough	Olio paraffinico/ aromatico	Olio in serbatoi termoclini, calcestruzzi, PCM
		Media	Fresnel/ Trough	Sali fusi	Sali fusi in serbatoio termocline con scambiatori integrati
				Olio	Olio in serbatoio termoclini con scambiatori integrati
	Produzione vapore	Piccola	Fresnel	Acqua	
				Sali fusi	Sali fusi in serbatoio termocline con generatore di vapore integrato
		Media	Fresnel/ Trough	Olio	Olio in serbatoio termocline con generatore di vapore integrato
HT (400-600)	Produzione calore e/o vapore	Media e grande (10-20 MW)	Fresnel/ Trough/ Torri solari	Sali fusi	Doppio serbatoio a sali fusi (scambiatore esterno)
		Grande	Fresnel/ Trough	Olio	Doppio serbatoio a sali fusi (scambiatore esterno)
HHT (> 600)	Produzione chemicals	Piccola, media/grande	Torri solari	Aria/gas	Materiali ceramici

4 Integrazione tra tecnologia CST e impianti industriali

I parametri più rilevanti per la definizione della strategia di integrazione tra utenza industriale e impianti CST sono i livelli termici operativi, i profili di carico termico su base giornaliera, settimanale e annuale, il fabbisogno termico nominale, il fabbisogno termico in avvio e in arresto, la presenza di eventuali impianti di riscaldamento convenzionali, la temperatura di mandata e di ritorno del fluido termovettore utilizzato, la possibilità di recupero del calore.

Il profilo di carico ovviamente influisce sulle dimensioni degli stoccaggi termici e, in linea generale, un processo con produzione costante e continuativa, richiedendo volumi di accumulo noti, risulta più facilmente integrabile con impianti CST. Molte aziende manifatturiere non producono la domenica (o anche il sabato), e pertanto lo stoccaggio di un impianto solare deve essere dimensionato per accumulare il calore raccolto in una intera giornata.

Altro importante fattore è la presenza di circuiti/impianti di riscaldamento pre-esistenti, che devono essere integrati con la tecnologia solare. Ad esempio, mentre l'integrazione del calore solare in un circuito di servizio di acqua calda può essere realizzata al meglio con un solo scambiatore di calore aggiuntivo, la fornitura del calore solare direttamente ad una unità di processo, quale un reattore o un separatore, può implicare soluzioni più complicate.

La sfida principale nello sviluppo di soluzioni di integrazione tra la tecnologia CST e i processi industriali è l'identificazione di componenti, interfacce e configurazioni impiantistiche standard che possano essere applicate a sistemi produttivi già esistenti, eterogenei nei livelli termici e nelle operazioni unitarie, senza richiedere interventi di "revamping" di impianto significativi e costosi. A questo scopo è stata proposta in letteratura una classificazione sistematica delle soluzioni di integrazione CST/utenze industriali, tenendo conto del tipo di fornitura termica richiesta dal processo, del fluido termovettore e delle apparecchiature in uso nel processo [4, 36]

Le soluzioni di accoppiamento tra l'impianto solare e l'utenza industriale possono essere innanzitutto distinte in base al punto di integrazione del calore solare: al *livello di fornitura* il calore solare viene utilizzato per riscaldare il fluido di servizio, mentre al *livello di processo* il calore viene direttamente integrato nel processo, riscaldando l'apparecchiatura o il fluido di processo.

Nello specifico, facendo riferimento alla Figura 14, si possono distinguere le seguenti principali modalità di integrazione:

- A1: Riscaldamento dell'acqua di reintegro a livello di fornitura;
- A2a: Riscaldamento della rete di distribuzione del fluido di servizio sulla linea di ritorno;
- A2b: Riscaldamento della rete di distribuzione del fluido di servizio sulla linea di fornitura;
- A3: Riscaldamento dell'accumulo del fluido di servizio;
- B1: Riscaldamento diretto delle apparecchiature di processo (reattori, separatori);
- B2: Riscaldamento del fluido di processo;
- B3: Riscaldamento dell'accumulo del fluido di processo;

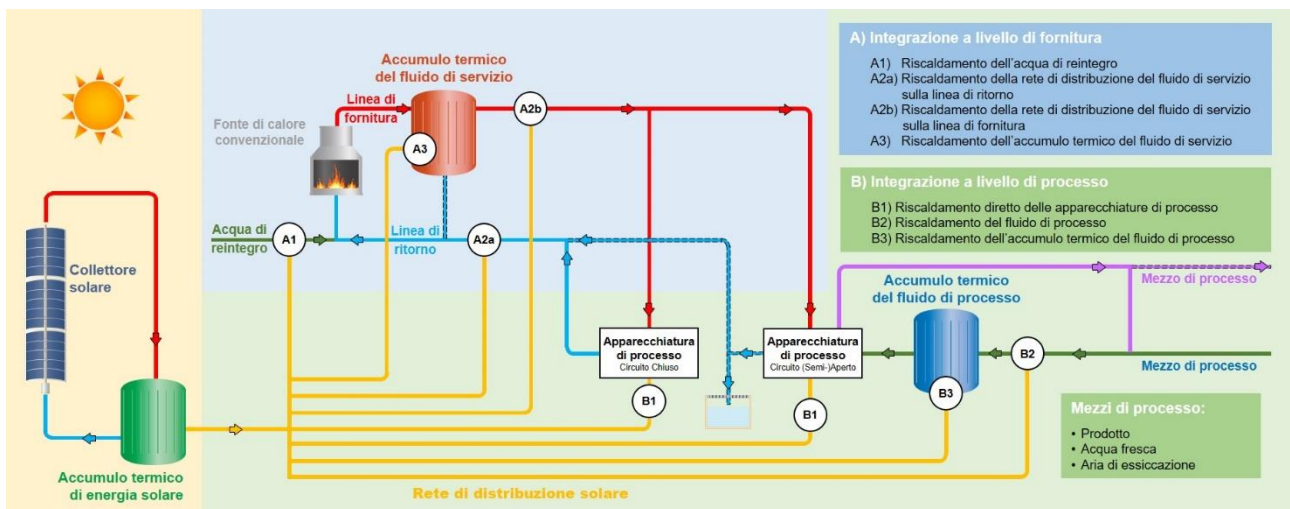


Figura 14. Possibili punti di integrazione per il calore solare di processo [36].

A livello di fornitura si può effettuare un'ulteriore distinzione in base al fluido di servizio, che può essere vapore d'acqua o fluido liquido (acqua calda, fluidi sintetici e oli termici). In linea di principio, le ipotesi di integrazione per fluidi termovettori liquidi sono valide anche per l'aria. Ovviamente i diversi fluidi utilizzati per la trasmissione del calore comportano differenze nel tipo di scambiatore di calore richiesto.

In particolare, se si utilizza il vapore come fluido convenzionale di scambio termico, è possibile integrare il calore solare in tre differenti modalità (Tabella 13): SL_1 (integrazione in parallelo, riscaldamento dell'acqua di alimentazione della caldaia o riscaldamento dell'acqua di reintegro), SL_2 e SL_3 (entrambi integrazione in serie). L'integrazione in parallelo può essere realizzata direttamente oppure indirettamente (ad esempio con olio diatermico o acqua pressurizzata). I concetti di integrazione in serie per il riscaldamento dell'acqua di alimentazione della caldaia o dell'acqua di reintegro differiscono principalmente per il corrispondente livello di temperatura e per le potenziali misure di recupero del calore da adottare. Riguardo invece ai fluidi termovettori liquidi, oltre all'integrazione in parallelo (SL_4) e in serie (SL_5) del calore solare in circuiti convenzionali di fornitura di calore, esiste anche la possibilità del riscaldamento di sistemi di accumulo (SL_6).

A livello di processo, come precedentemente menzionato, è possibile distinguere tre diversi punti di integrazione: processi reattivi o di separazione termica (B1), (pre)riscaldamento di fluidi termovettori (B2), riscaldamento/mantenimento della temperatura in sistemi di accumulo (bagni, macchinari o serbatoi, B3).

In maggiore dettaglio, all'interno della prima categoria, e in particolare per i "processi di separazione termica", si utilizzano tipicamente essiccatori a convezione e a contatto che alimentano la maggior parte degli impianti di essiccazione nell'industria, e gli evaporatori impiegati per la distillazione e la rettifica in ambito chimico e petrolchimico. Per la categoria "(pre)riscaldamento di fluidi termovettori" si distinguono due apparecchiature di riscaldamento, ossia scambiatori di calore esterni e scambiatori con iniezione diretta di vapore. Infine, per i processi di "riscaldamento/mantenimento della temperatura di serbatoi", sono tipicamente utilizzati scambiatori di calore interni (tra cui camicie e serpentine di riscaldamento, tubi, scambiatori di calore a piastre, resistenze elettriche) ma anche scambiatori esterni.

Pertanto, in base al carico termico e all'impianto di riscaldamento utilizzato, a livello di processo è possibile individuare quattro modalità di integrazione per il calore solare, elencate in Tabella 13. La prima ipotesi (PL_1) prevede l'introduzione di uno scambiatore di calore esterno alimentato da energia solare per riscaldare un prodotto o un fluido di processo, un circuito intermedio di acqua calda o una sostanza in ingresso al processo. La seconda opzione (PL_2) prevede l'introduzione di uno scambiatore di calore esterno alimentato da energia solare per riscaldare o mantenere la temperatura di bagni, macchinari o serbatoi di accumulo. Nella terza configurazione (PL_3) si introduce uno scambiatore di calore all'interno di

bagni, macchinari o serbatoi, mentre l'ultima opzione (PL_4) prevede l'iniezione di vapore a livello di processo a temperatura ridotta (sotto vuoto o a bassa pressione).

Tabella 13. Ipotesi di integrazioni per applicazioni del calore solare di processo industriale [4].

Livello di integrazione	Distinzione		Ipotesi di integrazione del calore solare	
Livello di fornitura	Mezzo per il trasferimento di calore	Vapore	SL_1	Integrazione in parallelo (diretta o indiretta) del calore solare
			SL_2	(Pre)riscaldamento solare dell'acqua di alimentazione della caldaia
			SL_3	(Pre)riscaldamento solare dell'acqua di reintegro
		Liquido	SL_4	Integrazione in parallelo (diretta o indiretta) del calore solare
			SL_5	Incremento sul ricircolo solare
			SL_6	Riscaldamento solare di accumuli o cascami termici
Livello di processo	Attrezzatura di riscaldamento convenzionale	Scambiatore di calore esterno	PL_1	Riscaldamento solare di prodotto, del circuito intermedio dell'acqua calda o dei flussi di ingresso
			PL_2	Riscaldamento solare di bagni, macchinari o serbatoi.
		Scambiatore di calore interno	PL_3	Riscaldamento solare di bagni, macchinari o serbatoi.
		Fornitura di vapore	PL_4	Fornitura di vapore solare sotto vuoto o a bassa pressione

In generale, l'integrazione del calore solare a livello di fornitura è meno complessa rispetto a quella a livello di processo, sia per le temperature in gioco (tipicamente più basse), sia per la maggiore flessibilità operativa dei circuiti di servizio.

Di seguito si descrivono le diverse ipotesi di integrazione sopra menzionate con la presentazione di schemi di processo semplificati.

4.1 Integrazione a livello di fornitura con vapore

Il livello di temperatura richiesto per l'integrazione in parallelo del calore solare (generazione di vapore) è solitamente superiore a 150 °C. Per l'integrazione con produzione diretta di vapore (SL_1_PD), l'acqua di alimentazione della caldaia alimenta in parallelo anche il campo solare, dove viene prodotta una miscela acqua-vapore, successivamente inviata ad un separatore: l'acqua viene reimpressa nel circuito del collettore, mentre il vapore viene inviato alla linea del vapore a servizio dell'utenza industriale (Figura 15). In questo modo la caldaia a vapore funziona a carico ridotto durante le ore di operatività dell'impianto solare, con un risparmio nel consumo di combustibile fossile e una riduzione significativa delle emissioni. La perdita di efficienza della caldaia a vapore associata al funzionamento a carico ridotto dipende ovviamente dal rapporto tra la capacità dell'impianto solare e la capacità della caldaia, dal carico tipico e dalle prestazioni della caldaia a vapore (ambito di modulazione).

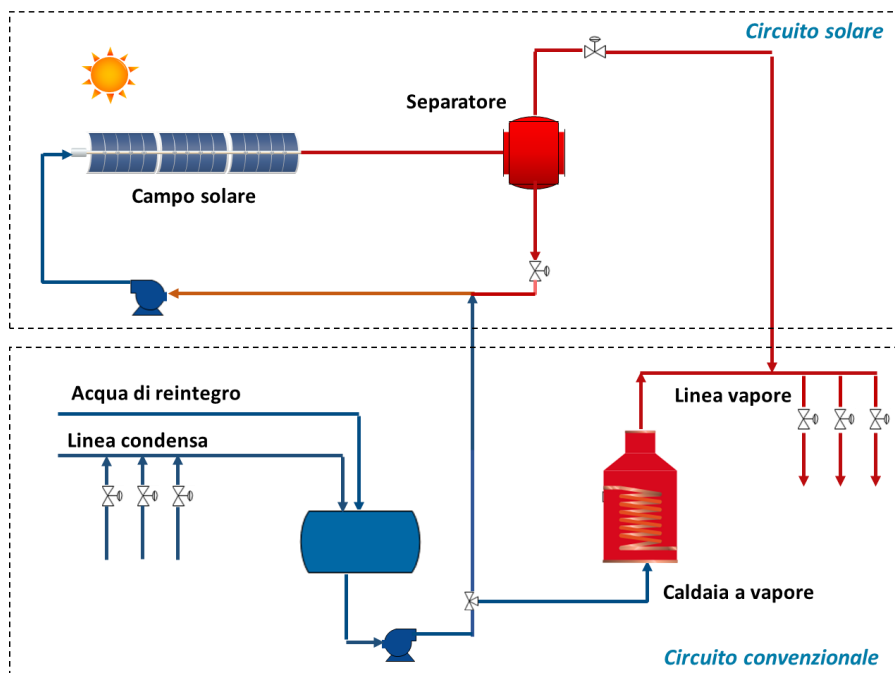


Figura 15. Integrazione a livello di fornitura per la produzione diretta di vapore (SL_1_PD) [36].

Per quanto riguarda l'integrazione con produzione indiretta di vapore (SL_1_PI), la configurazione è simile a quella precedente (Figura 16): in questo caso il fluido termovettore nell'impianto solare è principalmente olio diatermico (o acqua pressurizzata) che alimenta un generatore di vapore che opera alla stessa pressione della linea vapore dell'utenza industriale.

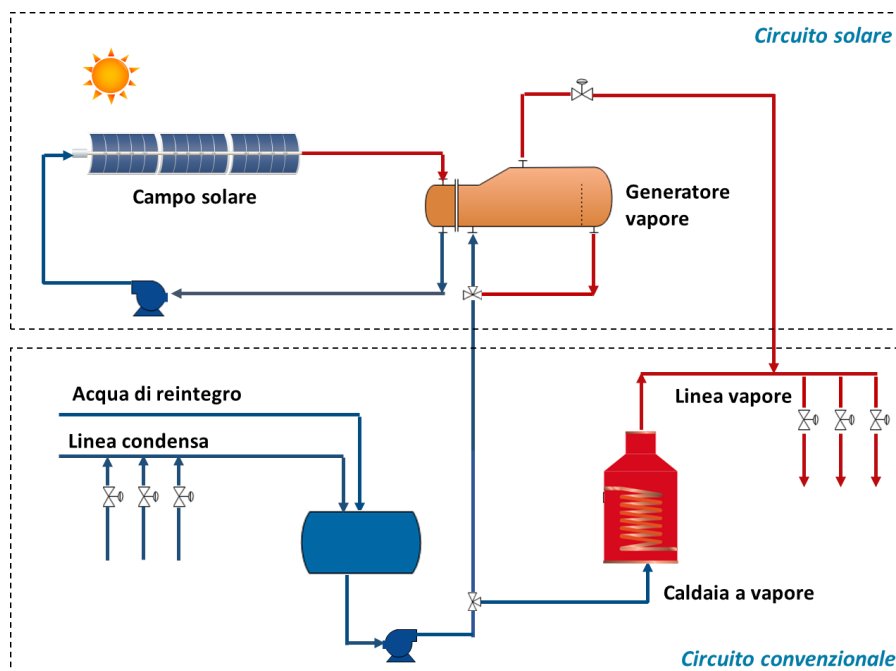


Figura 16. Integrazione a livello di fornitura per la produzione indiretta di vapore (SL_1_PI) [36].

Lo schema di integrazione in serie per il riscaldamento dell'acqua di alimentazione della caldaia (SL_2) è rappresentato in Figura 17. La temperatura dell'acqua di alimentazione della caldaia dipende dalla

pressione della linea vapore e si aggira solitamente nell'intervallo 160-220 °C (pari a 6-23 bar). Tipicamente l'acqua di alimentazione della caldaia può essere preriscaldata da un economizzatore con un incremento di temperatura di circa 30 °C: il salto entalpico rimanente può essere fornito dal calore solare.

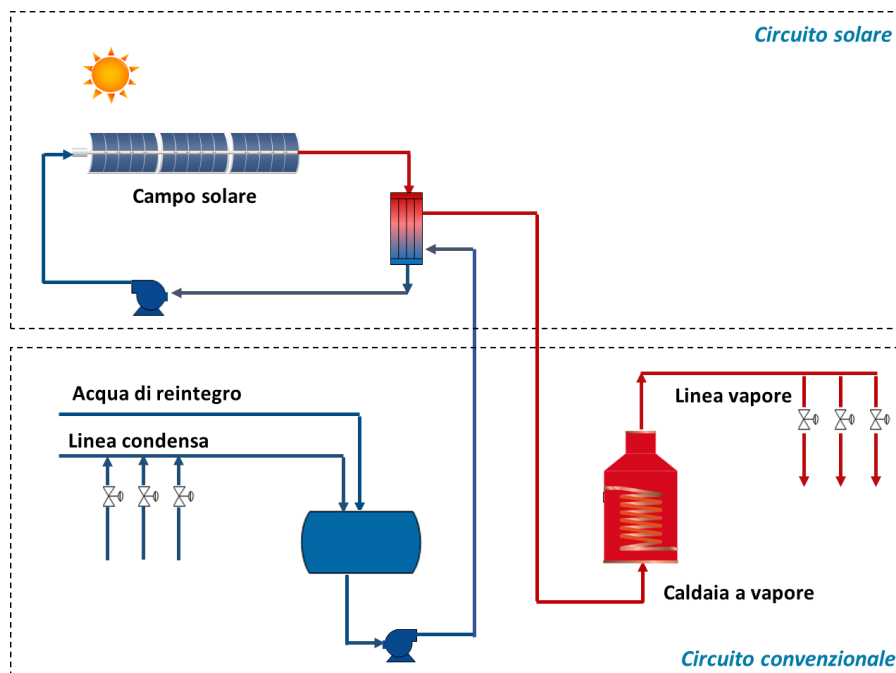


Figura 17. Integrazione a livello di fornitura per il preriscaldamento dell'acqua di alimentazione della caldaia (SL_2) [36].

Come precedentemente menzionato un'ulteriore ipotesi di integrazione per i sistemi a vapore consiste nel preriscaldamento dell'acqua di reintegro (SL_3); tuttavia la presenza di possibili recuperi termici all'interno dei processi industriali, anche nella stessa caldaia a vapore, rende tale soluzione poco proficua e competitiva in termini di costo.

4.2 Integrazione a livello di fornitura con fluidi termovettori liquidi

Come precedentemente riportato in Tabella 13, per i fluidi termovettori liquidi l'integrazione a livello di fornitura può essere effettuata attraverso il riscaldamento della linea di mandata (configurazione in parallelo o in serie), o mediante il riscaldamento di accumuli inseriti nel circuito convenzionale dei fluidi servizio. La principale applicazione di questi sistemi riguarda i circuiti dell'acqua calda ma le modalità di integrazione sono analoghe per i fluidi termovettori sintetici e gli olii termici, tipicamente utilizzati a livelli termici compresi nell'intervallo 250-400 °C.

Per l'integrazione in parallelo nei circuiti di acqua calda (SL_4), il riscaldamento del fluido può avvenire in maniera diretta o indiretta: nel primo caso l'acqua circola direttamente nel campo solare (Figura 18), mentre nel secondo caso viene riscaldata attraverso uno scambiatore di calore intermedio. Talvolta nell'industria sono utilizzati anche circuiti di riscaldamento combinati che adottano il vapore come fluido termovettore primario per produrre acqua calda. Invece nel caso di utenze con esigua richiesta di vapore a bassa pressione può essere utilizzata acqua calda come fluido termovettore primario per la produzione di vapore attraverso un piccolo tamburo.

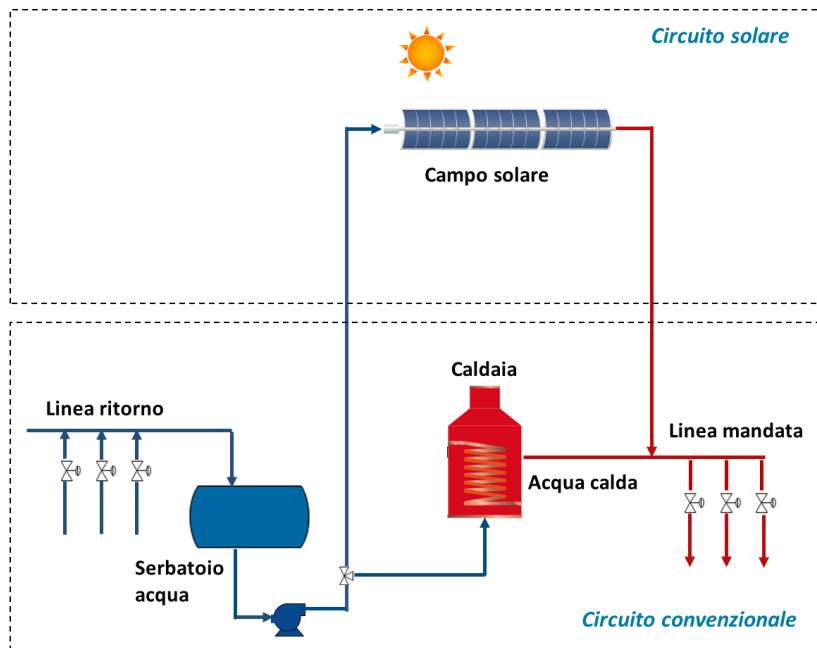


Figura 18. Integrazione diretta in parallelo a livello di fornitura con fluido termovettore liquido (SL_4_FD) [36].

Lo schema di integrazione in serie tra impianto solare e circuito di acqua calda (SL_5) è illustrato in Figura 19: in questo caso il fluido termovettore è pre-riscaldato dall'impianto solare e la caldaia convenzionale, oltre a fornire un ulteriore salto entalpico, stabilizza e regola la temperatura del fluido sulla linea di mandata. Tale configurazione di impianto può non essere ottimale ai fini dell'efficienza di funzionamento della caldaia, soggetta in questo modo a variazioni significative di carico e temperatura del fluido in ingresso.

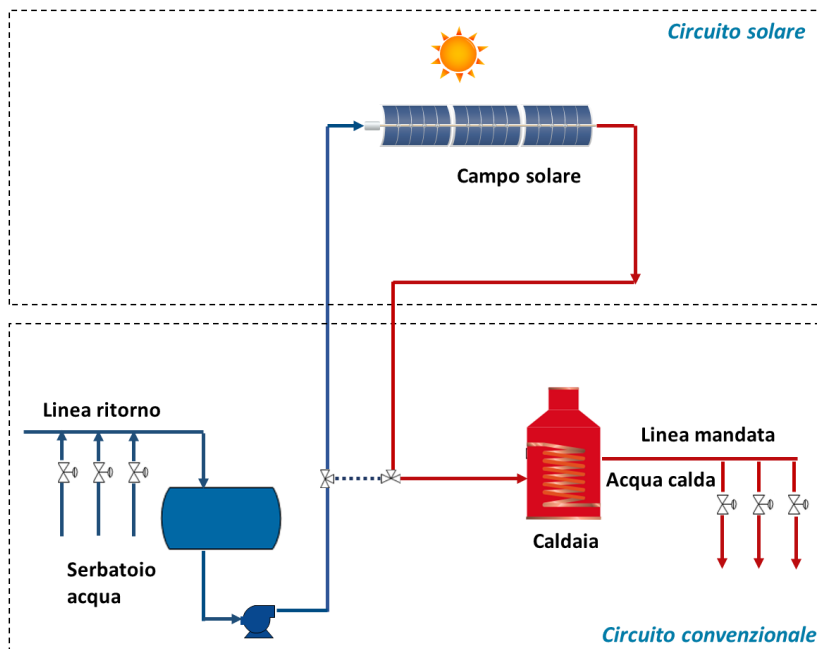


Figura 19. Integrazione in serie a livello di fornitura con fluido termovettore liquido (SL_5) [36].

Riguardo il riscaldamento dei sistemi di accumulo, è possibile identificare diverse modalità di integrazione con la fonte solare, anche in relazione alla tipologia di accumulo considerata: serbatoi a volume fisso o variabile, piccoli buffer, ecc. Il riscaldamento del serbatoio può essere di tipo indiretto, attraverso scambiatori di calore esterni che possono servire più serbatoi e scambiatori interni per sistemi piccoli e compatti (Figura 20a), o diretto, attraverso il contatto diretto tra vapore e fluido freddo (Figura 20b).

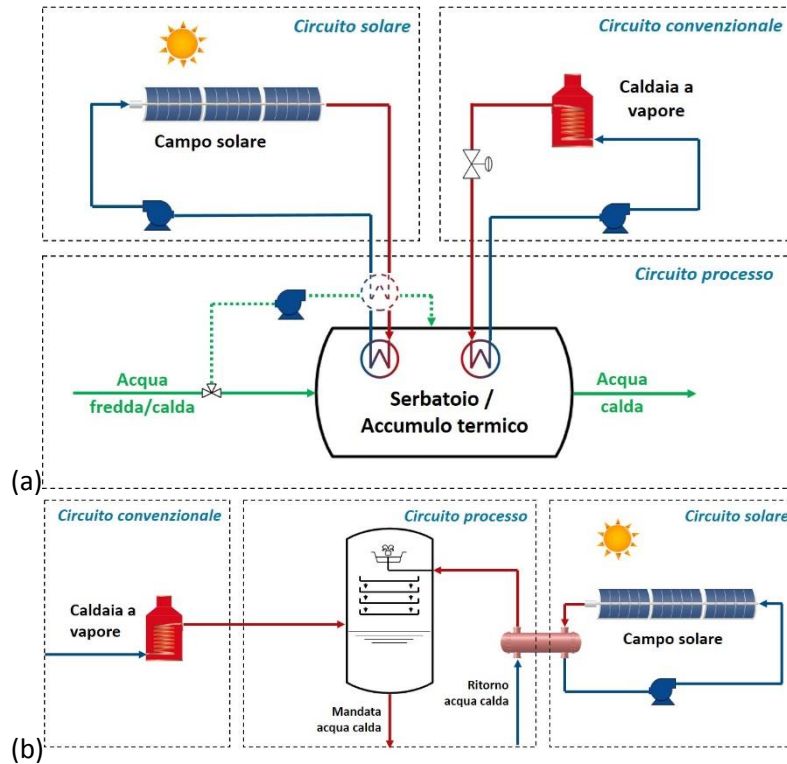


Figura 20. Integrazione a livello di fornitura del calore solare (SL_6): a) serbatoi con scambiatore interno o esterno; serbatoi con riscaldamento a contatto diretto fluido/vapore [36].

4.3 Integrazione a livello di processo con scambiatore di calore esterno

La soluzione di integrazione più semplice a livello di processo prevede l'introduzione di uno scambiatore di calore esterno in quattro diverse possibili configurazioni: integrazione in serie per il riscaldamento del fluido di processo (PL_1_PP), integrazione in serie per il riscaldamento del circuito intermedio dell'acqua calda (PL_1_CI), integrazione per il riscaldamento dei flussi di mandata (PL_1_FM) e integrazione per il riscaldamento di bagni, macchinari o serbatoi (PL_2).

La configurazione di integrazione PL_1_PP è fondamentalmente la più semplice, con lo scambiatore di calore supplementare "solare" installato in serie allo scambiatore di calore convenzionale per riscaldare un prodotto o un mezzo di processo (ad es. acqua, liscivia, succo di frutta, ecc.). L'integrazione in serie può prevedere un by-pass a monte dello scambiatore in modo che solo una parte dell'intero flusso del prodotto o del fluido di processo venga riscaldato, conseguendo una riduzione delle dimensioni dello scambiatore di calore e della pompa. In Figura 21a viene rappresentati uno schema generale di integrazione in serie a livello di processo per il riscaldamento solare di fluidi di processo con scambiatore di calore esterno e in Figura 21b una possibile applicazione specifica in un processo di sterilizzazione con autoclave.

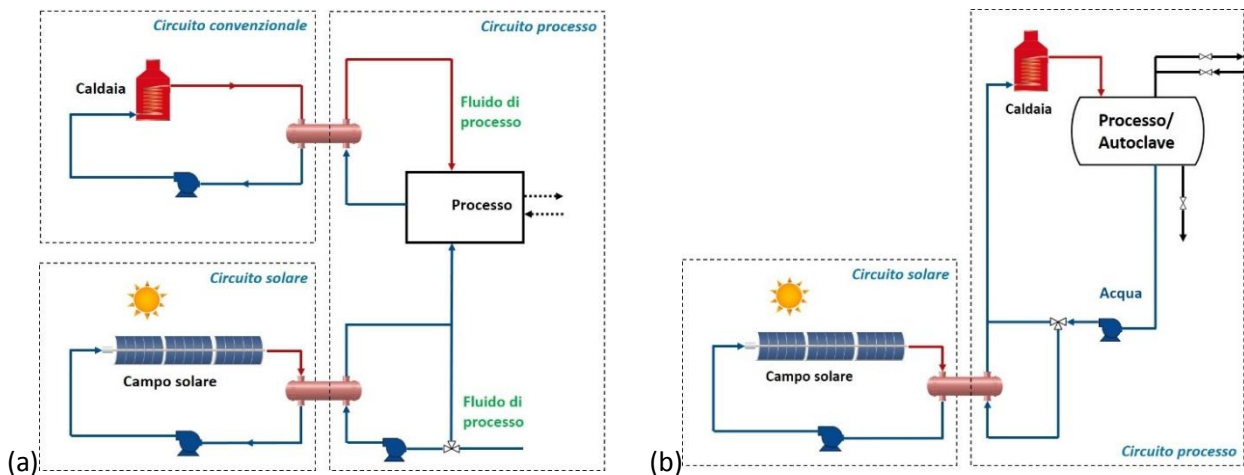


Figura 21. Integrazione in serie a livello di processo per il riscaldamento solare di fluidi di processo con scambiatore di calore esterno (PL_1_PP): (a) Schema generale di integrazione; (b) ipotesi di configurazione in un processo di sterilizzazione con autoclave [36].

Nell'ambito del settore alimentare e delle bevande, il fluido termovettore convenzionale viene tipicamente utilizzato per riscaldare un flusso intermedio di acqua calda a contatto con il processo (ad esempio pastorizzazione del latte). In questi casi può essere applicato il concetto di integrazione PL_1_CI, equivalente a PL_1_PP, anche se il riscaldamento intermedio del circuito d'acqua è sicuramente più semplice del riscaldamento "solare" dei fluidi di processo. Se un processo viene riscaldato attraverso l'utilizzo di una linea di acqua calda di servizio, i concetti di integrazione PL_1_CI e SL_5 possono essere combinati: il ritorno della linea di acqua viene preriscaldato attraverso l'energia solare (Figura 22a). In Figura 22b viene riportato un possibile schema di integrazione in un processo di pastorizzazione con scambiatore di calore a piastre.

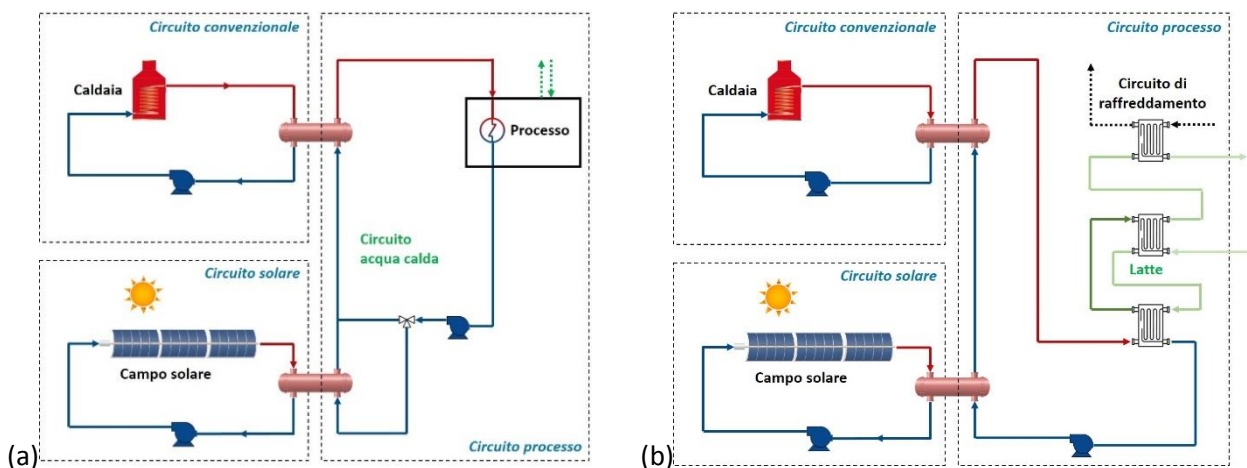


Figura 22. Integrazione in serie a livello di processo per il riscaldamento del circuito intermedio dell'acqua calda con uno scambiatore di calore esterno (PL_1_CI): (a) Schema generale di integrazione; (b) schema di integrazione per un processo di pastorizzazione con scambiatore di calore a piastre multizona e zona di riscaldamento esterno [36].

Riguardo il riscaldamento solare dei flussi in ingresso, molti processi richiedono l'immissione in continuo o in batch di materia prima/acqua/aria; ad esempio l'acqua dolce viene tipicamente reintrodotta nei processi per compensare le perdite per evaporazione, mentre l'aria per le operazioni di essiccazione. In Figura 23a

viene mostrato lo schema di integrazione generico del tipo PL₁_FM, mentre in Figura 23b è rappresentato lo schema per un'applicazione specifica (processo di scottatura per la macellazione dei polli). Il bagno di scottatura per la macellazione dei polli viene riscaldato convenzionalmente mediante iniezione diretta di vapore ma, a causa dello scarico dell'acqua e delle perdite per evaporazione, una quantità significativa di acqua dolce deve essere reintegrata e può essere preriscaldata dall'energia solare.

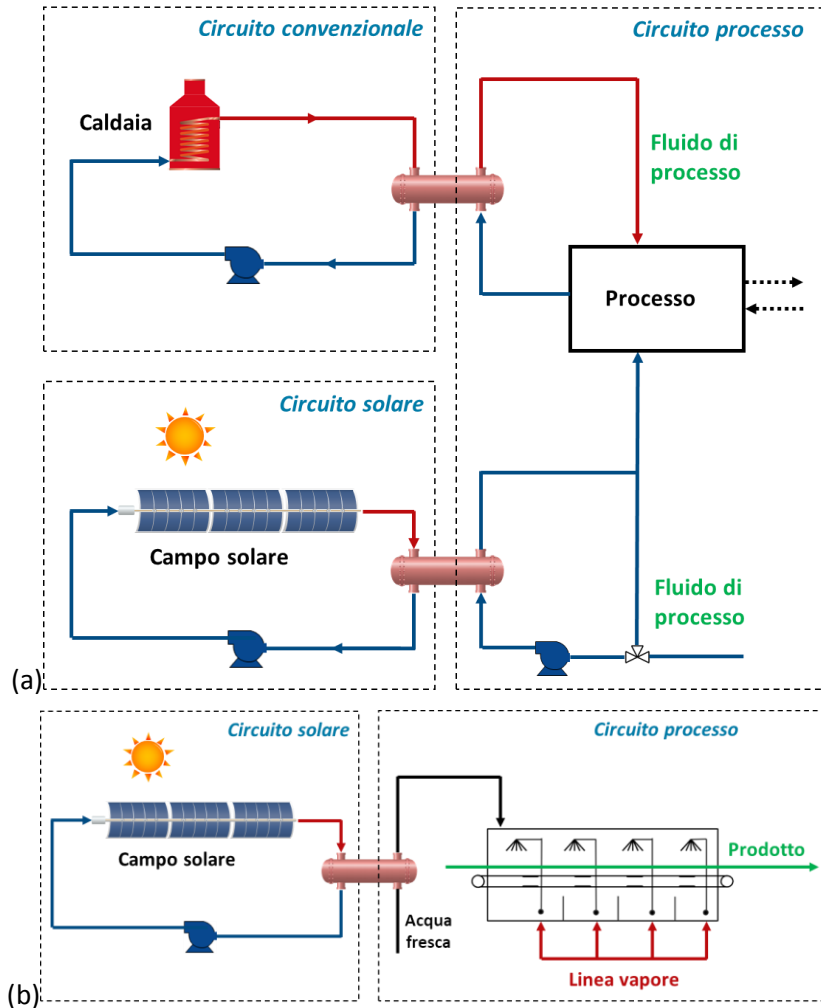


Figura 23. Integrazione a livello di processo per il riscaldamento dei flussi di materia in ingresso (PL₁_FM): (a) schema generale di integrazione con scambiatore esterno; (b) ipotesi di integrazione per un processo specifico (scottatura per la macellazione dei polli) [36].

L'ultima ipotesi di integrazione si riferisce al riscaldamento di bagni, macchinari o serbatoi tramite uno scambiatore di calore esterno aggiuntivo (PL₂). Pertanto, il prodotto o l'intermedio di processo viene prelevato dal bagno, dal macchinario o dal serbatoio, riscaldato dall'energia solare e ricircolato. In Figura 24a viene mostrato uno schema generale di integrazione e in Figura 24b una schema specifico per un processo di galvanostegia.

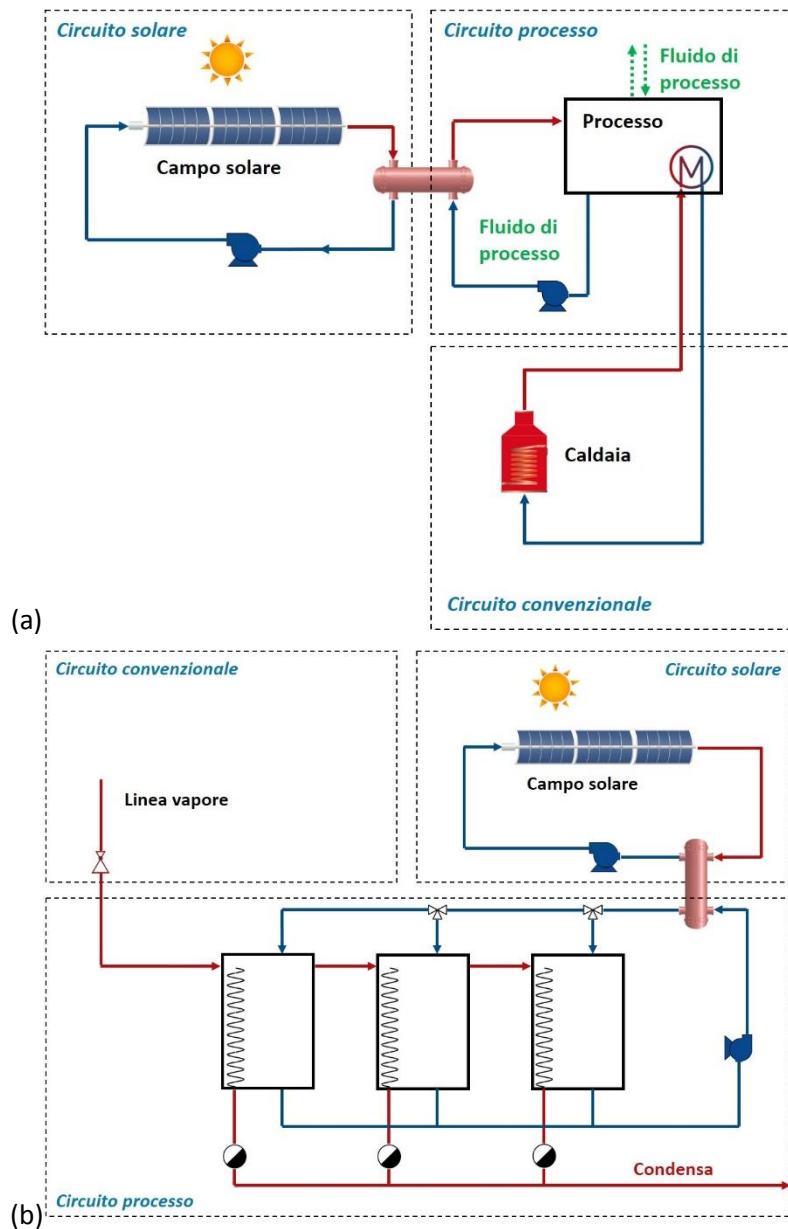


Figura 24. Integrazione a livello di processo il riscaldamento di bagni, macchinari o serbatoi tramite uno scambiatore di calore esterno aggiuntivo (PL_2): (a) schema generale di integrazione; (b) schema specifico di integrazione in un processo di galvanostegia con scambiatori a piastra [36].

4.4 Integrazione a livello di processo con scambiatore di calore interno

Per quanto riguarda l'integrazione a livello di processo con scambiatori di calore interni (PL_3), tipicamente il riscaldamento "solare" di bagni e serbatoi è installato in parallelo alla fonte di calore convenzionale. In questa configurazione di processo gli ingombri interni dei serbatoi (agitatori, filtri, ecc.) costituiscono dei vincoli specifici alla introduzione di superfici scaldanti supplementari. In Figura 25 viene mostrato uno schema generale di integrazione e una possibile applicazione specifica in un processo per la produzione di formaggio.

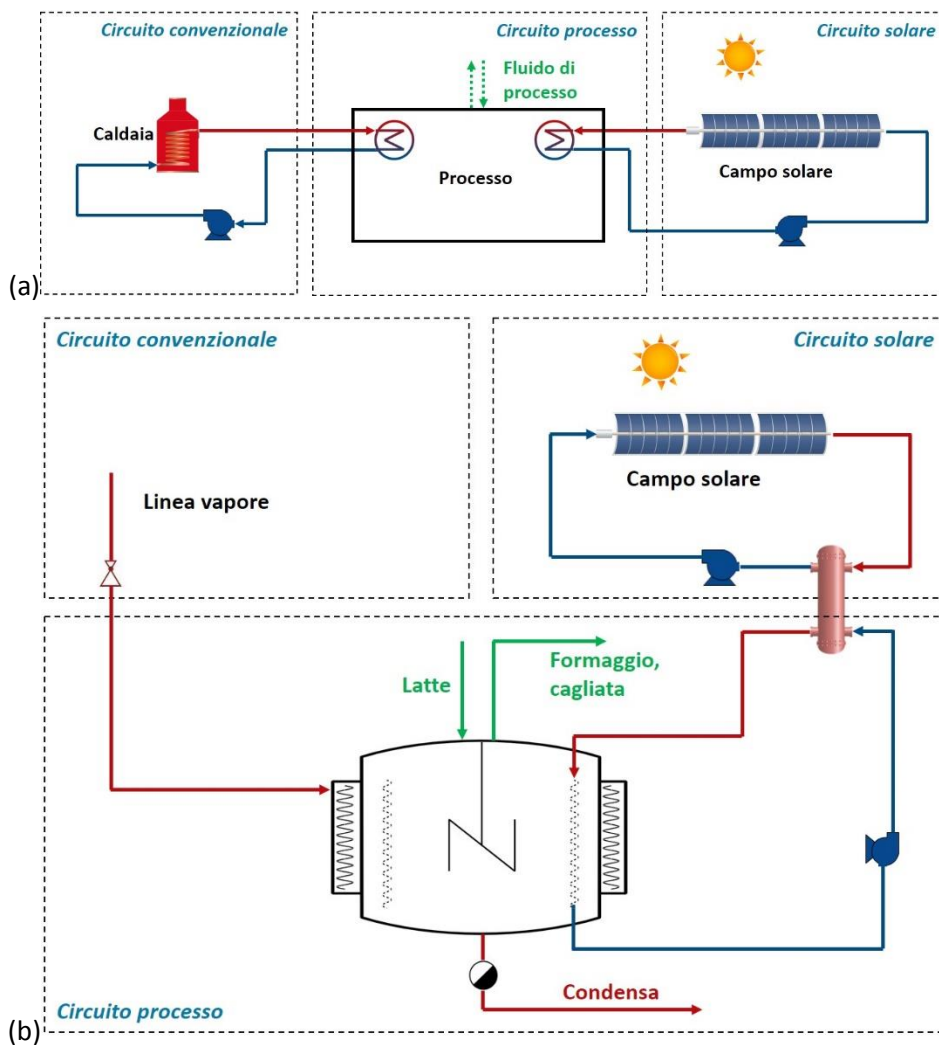


Figura 25. Integrazione a livello di processo per il riscaldamento di bagni, macchinari o serbatoi tramite uno scambiatore di calore interno (PL_3); (a) schema generale di integrazione; (b) schema specifico di integrazione per la produzione di formaggio con camicia riscaldante convenzionale e piastre alveolari supplementari alimentate da energia termica solare [36].

4.5 Integrazione a livello di processo con fornitura di vapore a bassa pressione

L'ultima modalità di integrazione del calore solare a livello di processo prevede l'utilizzo di vapore "solare" a bassa pressione, con temperature comprese nel range 110-135 °C (schema PL_4_BP), o sotto vuoto (schema PL_4_SV).

La generazione di vapore solare sotto vuoto (PL_4_SV) può essere applicata in numerosi processi di evaporazione, ad esempio nell'industria alimentare e delle bevande, poiché le tipiche temperature di processo sono nell'intervallo 40-80 °C (Figura 26).

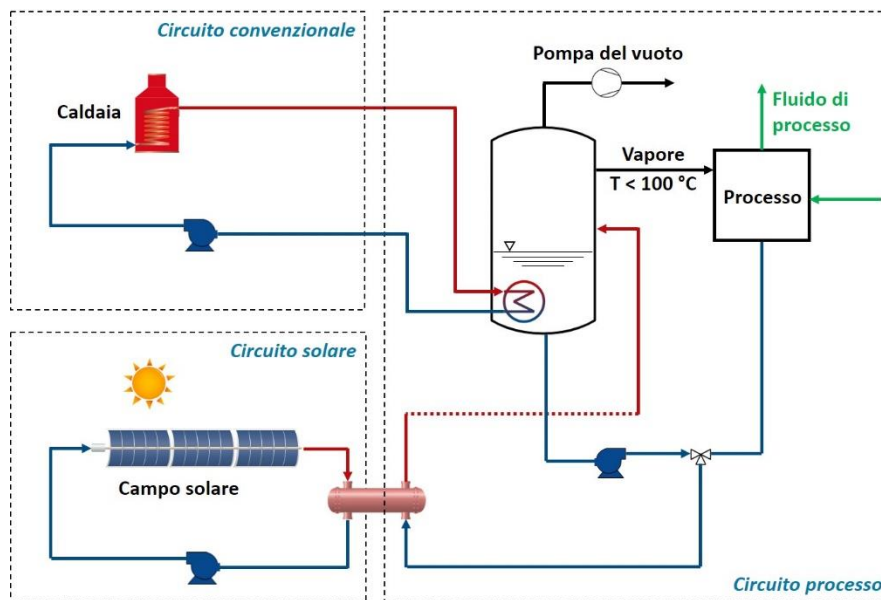


Figura 26. Integrazione a livello di processo per la produzione di vapore sotto vuoto (riscaldamento di evaporatori), schema PL_4_SV [36].

Per l'alimentazione di vapore solare a bassa pressione (1.5-3 bar, 110-135 °C) lo schema di riferimento è rappresentato in Figura 27 (schema PL_4_BP); tale soluzione di integrazione è simile allo schema SL_1 (integrazione a livello di fornitura) ma ne differisce per i livelli termici, inferiori rispetto ai circuiti a vapore convenzionali dell'industria.

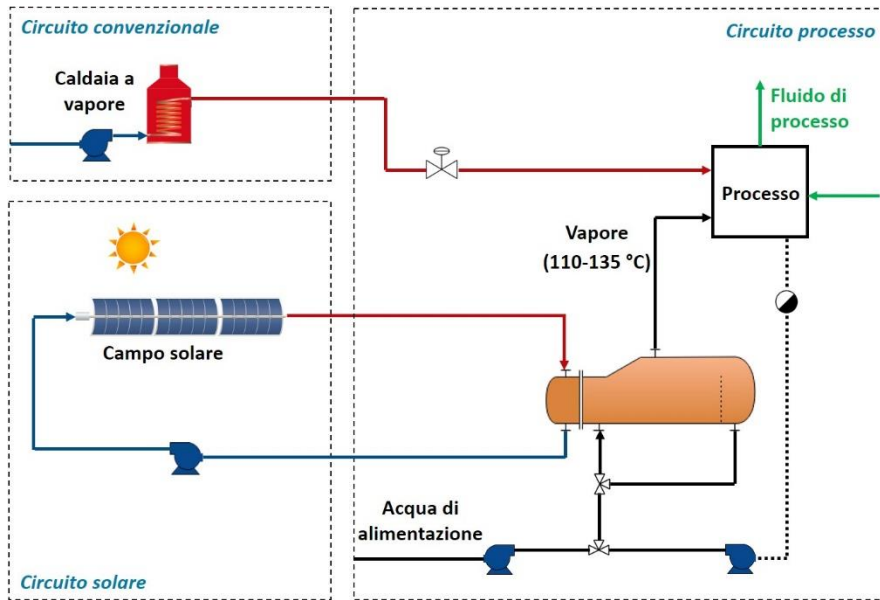


Figura 27. Integrazione a livello di processo della produzione di vapore per iniezione diretta (PL_4_BP) [36].

5 Casi applicativi di integrazione a media/alta temperatura

Come precedentemente menzionato, ad oggi gli impianti solari realizzati per la fornitura di calore di processo sono del tipo solare termico e tra i più significativi possono essere citati il Miraah (Oman) del 2017 e il Pampa Elvira Solar (Cile) del 2013. Il primo impianto (Figura 28a) ha una potenza di 1021 MW_t ed è costituito da collettori parabolici lineari per la generazione diretta di vapore utilizzato per il recupero di petrolio (Enhanced Oil Recovery – EOR) in un giacimento petrolifero [37]; nel secondo impianto (Figura 28b), installato in prossimità di una miniera di rame, sono stati impiegati collettori piani ad acqua calda per una potenza di 27.5 MW_t allo scopo di mantenere gli elettroliti ad una temperatura di 50 °C [38].

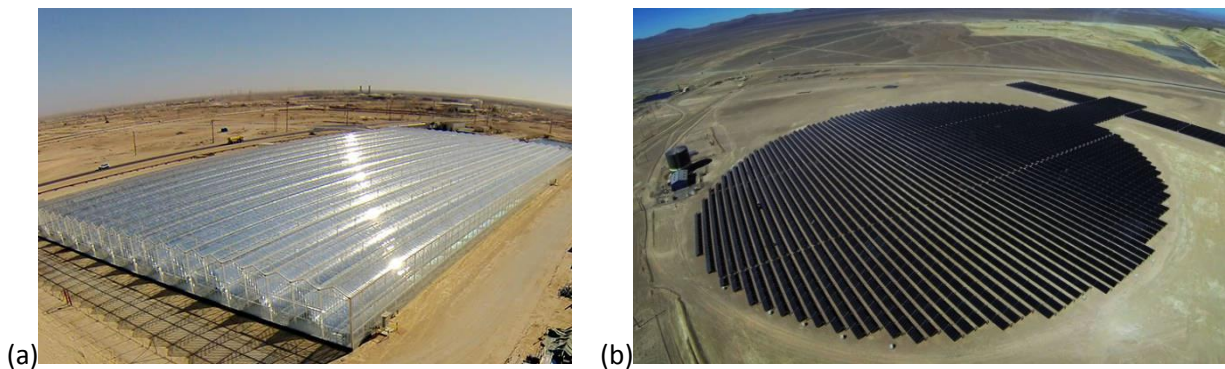


Figura 28. Immagini dell'impianto Miraah in Oman (a) e dell'impianto Pampa Elvira Solar in Cile (b) [37-38].

In Figura 29 è riportata la distribuzione degli impianti solari attualmente installati e impiegati per la produzione di calore di processo, escludendo l'impianto Miraah. La maggior parte dei sistemi utilizza collettori piani, ed in minor misura collettori parabolici lineari e a tubi evacuati, tutti comunque operativi a basse temperature.

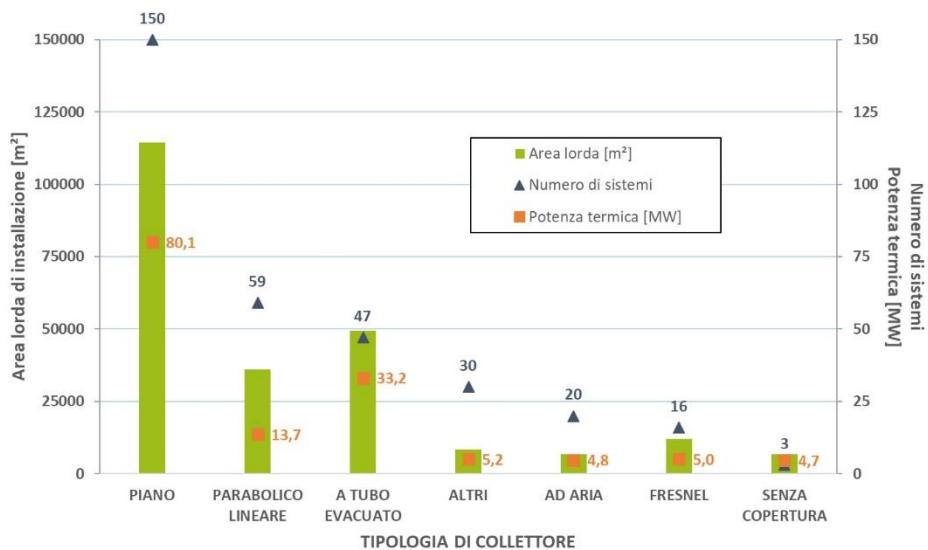


Figura 29. Tipologia di collettori utilizzati per i sistemi di calore solare di processo [39-40].

La Figura 30 mostra la potenza termica attualmente fornita da impianti solari operativi a bassa temperatura (termici e a concentrazione) in diversi settori industriali. I principali settori sono l'alimentare, il tessile e

l'estrazione mineraria. L'industria alimentare e quella delle bevande che, con 149 installazioni, rappresentano il 46% di tutti i sistemi installati, sono tendenzialmente di piccole e medie dimensioni, e quindi coprono solo il 30% (circa 44 MW_t) della capacità termica totale installata (circa 150 MW_t, escludendo l'impianto Miraah). Un altro settore importante è l'industria tessile con 25 installazioni e 30 MW_t (20%) della capacità termica installata [40]. L'industria dell'estrazione comprende i due sistemi più grandi citati e rappresenta quindi uno dei settori dominanti in termini di capacità termica installata: escludendo l'impianto Miraah, i 13 impianti esistenti rappresentano circa il 21% della capacità termica totale installata. Una descrizione di maggior dettaglio degli impianti solari termici/a concentrazione, attualmente operativi per la fornitura di calore di processo a bassa temperatura, è riportata in Appendice.

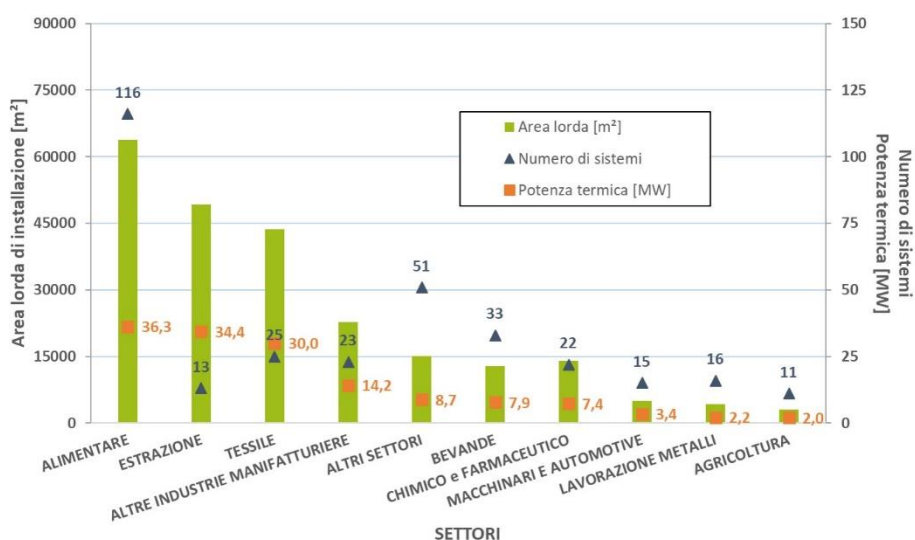


Figura 30. Settori industriali per i sistemi di calore solare di processo [39-40].

Gli impianti solari a concentrazione attualmente realizzati per la fornitura di calore a medio/alta temperatura sono invece di carattere sperimentale o dimostrativo: ciò rende impossibile generalizzare un livello di posizionamento commerciale, a differenza della tecnologia del solare termico a bassa temperatura. Pertanto, al fine di presentare potenziali scenari applicativi della tecnologia solare a concentrazione per la fornitura di calore a medio/alta temperatura, nel prosieguo del lavoro vengono sviluppati originali schemi di integrazione tra le operazioni unitarie endotermiche di alcuni specifici settori industriali e le possibili configurazioni degli impianti solari asserviti. Tale panoramica non si configura come una analisi esaustiva dei possibili ambiti applicativi della tecnologia SHIP (Solar Heat for Industrial Processes), ma come uno studio introduttivo a potenziali soluzioni di integrazione tra tecnologia CST e processi industriali, che saranno oggetto di studi più dettagliati nella seconda annualità del PTR 2019-2021.

Pertanto, nei seguenti paragrafi, per ciascun processo industriale di interesse vengono riportati i fabbisogni termici annuali e la taglia media degli impianti attualmente operativi. Nel caso in cui non sia stato possibile reperire direttamente tali dati, vengono fornite stime di massima, calcolate sulla base dei dati di produzione riportati dalle associazioni di settore e dei consumi termici specifici. In Tabella 14 vengono sinteticamente riportate le principali caratteristiche dei potenziali scenari applicativi individuati nel presente lavoro e descritti nel paragrafo successivo.

Tabella 14. Tabella riepilogativa delle ipotesi di integrazione tra tecnologia solare a concentrazione e processi industriali a media e alta temperatura.

Settore	Processo	Impianto	HTF		Stoccaggio		Interfaccia	Fluido processo	
			Tipologia	Temp. max	Tipologia	Configurazione		Tipologia	Temperatura
Vetro	Ricottura	Parabolico lineare/Fresnel	Sali binari	550	Sali binari	Doppio serbatoio/ Termoclino	Tubi scaldanti	Aria	450
Ceramica	Atomizzazione	Parabolico lineare/Fresnel	Sali binari	550	Sali binari	Doppio serbatoio/ Termoclino	Scambiatore Sali/Aria	Aria	500
Gesso	Calcinazione	Parabolico lineare/Fresnel	Sali binari	550	Sali binari	Doppio serbatoio	Scambiatore Sali/Aria	Aria	500
Chimica	Reforming	Parabolico lineare	Sali binari	550	Sali binari	Doppio serbatoio Termoclino	Scambiatore Sali/Gas di reazione	Gas	550
Chimica	Cracking	Parabolico lineare	Sali binari	550	Sali binari	Doppio serbatoio Termoclino	Scambiatore Sali/Idrocarburi	Idrocarburi	>500
Alimentare	Deodorizzazione	Parabolico lineare/Fresnel	Sali binari	550	Sali ternari	Doppio serbatoio/ Termoclino	Generatore di vapore	Vapore	>140 & >400
Alimentare	Cottura	Fresnel	Sali ternari/ Olio diatermico	320	Cemento	Singolo serbatoio	Tubi scaldanti	Aria	300
Alimentare	Maltazione	Fresnel	Olio diatermico	260	Cemento	Singolo serbatoio	Scambiatore Olio/Aria	Aria	90

5.1 Settore del vetro

Come precedentemente descritto nel Capitolo 2, l'industria del vetro è caratterizzata da elevati consumi energetici, di cui il 70-80% è attribuibile alla fase di fusione e formatura, nel corso della quale la miscela vetrificabile viene riscaldata all'interno di forni alimentati principalmente a gas metano ed in parte ad olio combustibile a basso tenore di zolfo, fino ad una temperatura di circa 1500-1600 °C (Figura 31). La fase di **ricottura**, che invece consuma circa il 20% del calore globalmente richiesto dal processo, avviene in un forno a metano o, più raramente, di tipo elettrico alla temperatura massima di 600 °C; all'interno del forno il vetro viene raffreddato lentamente in condizioni controllate allo scopo di eliminare le tensioni introdotte nella massa vetrosa durante il processo di formatura.

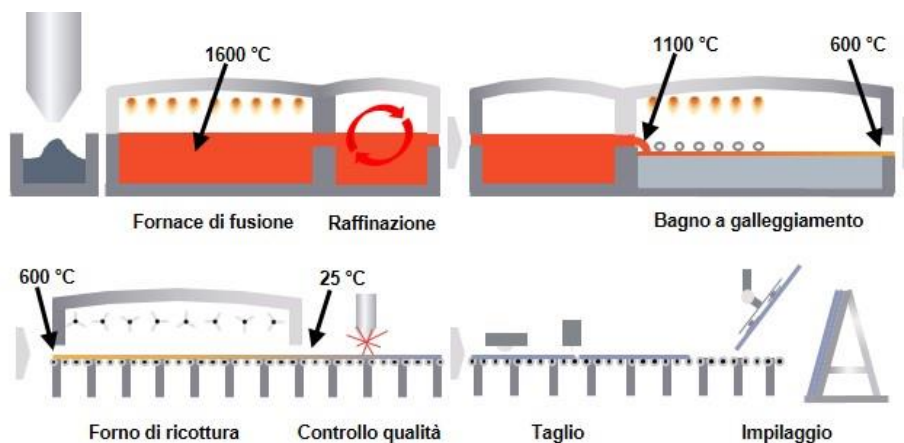


Figura 31. Schema di processo della produzione di vetro float [41].

In Italia la quasi totalità della produzione di vetro è alimentata da bruciatori a gas metano; i forni elettrici sono limitati a basse capacità produttive o a produzione di vetri speciali. I consumi energetici specifici, relativi alla fusione di una tonnellata di vetro, variano sensibilmente in base alla tipologia di prodotto. In Tabella 5 sono riportati i dati relativi al consumo energetico complessivo del ciclo di produzione (fusione, lavorazione ed attività secondarie), espresso per tonnellata di vetro fuso, mentre in Tabella 6 si riportano le stime dei consumi distribuiti secondo le principali fasi di lavorazione.

Con riferimento alla fase di formatura e ricottura, che mediamente consuma 10-50 Sm³ di gas naturale per tonnellata di vetro prodotto (corrispondente a 350-1800 MJ/t) alla temperatura massima di 550 °C, è possibile considerare l'alimentazione termica da solare a concentrazione utilizzando la tecnologia ENEA dei collettori parabolici lineari a sali fusi, che prevede l'impiego della miscela binaria "Solar Salt" (NaNO₃ 60%, KNO₃ 40%) nell'intervallo di temperatura compreso tra 290 e 550 °C. La miscela di sali fusi in questo caso viene utilizzata sia per il trasferimento di calore che per l'accumulo termico in un sistema a doppio serbatoio. Il primo serbatoio, nelle normali condizioni di esercizio dell'impianto solare, raccoglie i sali fusi in uscita dal campo solare alla temperatura di 550-560 °C; nel secondo invece si riversano i sali fusi "freddi" in uscita dalla camera di ricottura, la cui temperatura in condizioni nominali di esercizio non può scendere al di sotto dei 290 °C. L'apparecchiatura di interfaccia tra il processo industriale e l'impianto solare potrebbe essere rappresentata dal convenzionale forno a riscaldamento indiretto con tubi radianti, passanti all'interno della camera di ricottura. All'interno dei tubi, in sostituzione dei fumi di combustione, fluirebbe il sale fuso, per consentire un graduale raffreddamento del vetro da 550 °C a circa 150 °C. Nel caso di produzioni a capacità limitata, con richieste di potenza termica inferiore ad 1 MW_t, pur mantenendo invariata la configurazione dell'impianto solare (collettori lineari, sali fusi come HTF e HSM, etc), può risultare conveniente sostituire il sistema di accumulo a doppio serbatoio con un sistema di stoccaggio monoserbatoio del tipo termoclino, descritto nel precedente capitolo. In Tabella 15 vengono sinteticamente riportate le principali specifiche di integrazione elaborate per l'accoppiamento termico tra il processo in esame e la tecnologia CST selezionata per la fornitura di calore. In questo specifico caso applicativo, l'integrazione tra utenza industriale e impianto solare è a livello di processo, con uno schema

del tipo PL_3 in cui il calore solare è direttamente fornito all'apparecchiatura di processo (forno a ventilazione).

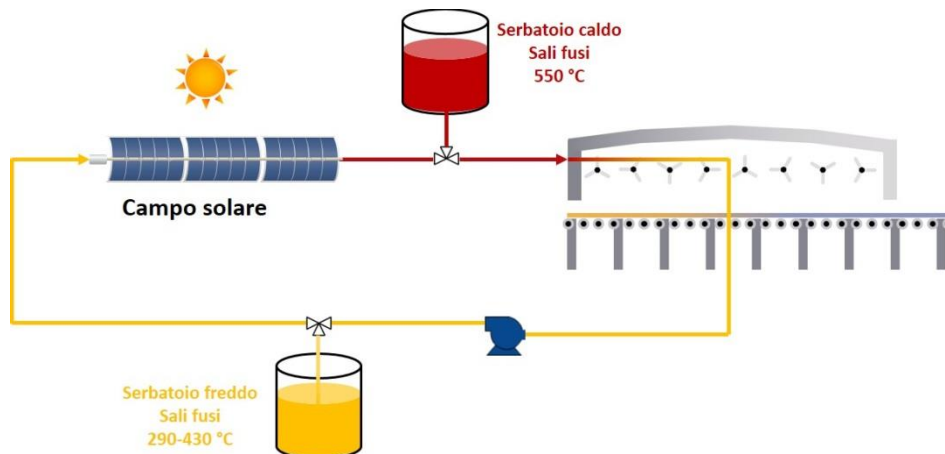


Figura 32. Schema di integrazione della tecnologia solare a concentrazione nel processo di ricottura del vetro.

Tabella 15. Ipotesi di integrazione tra processo di formatura/ricottura del vetro e impianto CST: specifiche di processo industriale e impianto solare.

Macrosettore industriale	Vetro
Specifiche Processo Industriale	
Fabbisogno termico globale italiano [GWh/anno]	2000-2200 [42]
Taglia media processo industriale [MW]	12-14
Operazione unitaria endotermica integrabile con tecnologia CST	Formatura/Ricottura
Potenza media richiesta dall'operazione unitaria [MW]	4-6
Modalità operativa operazione unitaria	Continua sulle 24 h
Tipologia fluido di processo	Aria
Temperatura ingresso fluido processo [°C]	450
Temperatura uscita fluido processo [°C]	150
Specifiche Impianto solare a concentrazione	
Tipologia concentratore solare	Parabolico lineare
Tipologia fluido termovettore	Miscela sali fusi binari
Temperatura ingresso fluido termovettore [°C]	290
Temperatura uscita fluido termovettore [°C]	550
Tipologia di accumulo termico	Doppio serbatoio/Monoserbatoio
Mezzo di accumulo	Miscela sali fusi binari
Temperatura massima accumulo [°C]	550
Temperatura minima accumulo [°C]	290
Interfaccia di integrazione	
Tipologia di integrazione	PL_3
Interfaccia di integrazione	Forno ventilato a tubi scaldanti

5.2 Settore della ceramica

Come precedentemente descritto nel Capitolo 2, l'industria delle piastrelle ceramiche e dei materiali refrattari, con un consumo di gas metano pari a 1.5 miliardi di metri cubi all'anno e un fabbisogno di energia elettrica di 1800 GWh/anno, si attesta come il quarto settore industriale per consumi energetici. Complessivamente la voce energia incide per il 20% sul costo di produzione delle piastrelle di ceramica italiane.

La realizzazione di piastrelle di ceramica segue un processo produttivo abbastanza consolidato (Figura 8), con alcune varianti che possono essere introdotte in funzione del tipo di prodotto finito desiderato. Nella prima fase di macinazione si ottiene un composto dotato di un contenuto d'acqua pari a circa il 30-40%, che viene dapprima inviato ad apposite vasche dotate di agitatori e successivamente all'atomizzatore. Nella fase di atomizzazione un essiccatoio a spruzzo (*spray dryer*) provoca l'istantanea evaporazione di gran parte dell'acqua dal materiale grazie ad un forte getto di aria calda (500-600 °C) (Figura 33). In questa seconda fase di preparazione dell'impasto viene consumata prevalentemente energia termica che serve per far evaporare l'acqua dal materiale. L'atomizzatore è generalmente alimentato da un combustore, dove viene bruciato gas naturale, o più raramente è azionato elettricamente. Come evidenziato in Tabella 7, il consumo specifico di gas naturale associato alla fase di atomizzazione è pari a 1.9-3 Sm³/m², corrispondente a 70-120 MJ/m².

In maggior dettaglio, l'aria calda proveniente dalla fornace viene introdotta nella torre di essiccazione (essiccatoio a spruzzo) attraverso un distributore anulare; qui l'aria viene a contatto diretto con il materiale umido (barbottina) iniettato attraverso una serie di ugelli con foro calibrato. Il prodotto così essiccato (dal 30 al circa 6% di umidità) precipita e viene raccolto da cicloni separatori che catturano l'aria umida e abbattano la maggior parte della polvere fine in sospensione. Il ventilatore principale immette l'aria nell'abbattitore (*scrubber*) che completa la depolverizzazione. Attraverso il camino l'aria pulita è infine espulsa verso l'ambiente esterno.

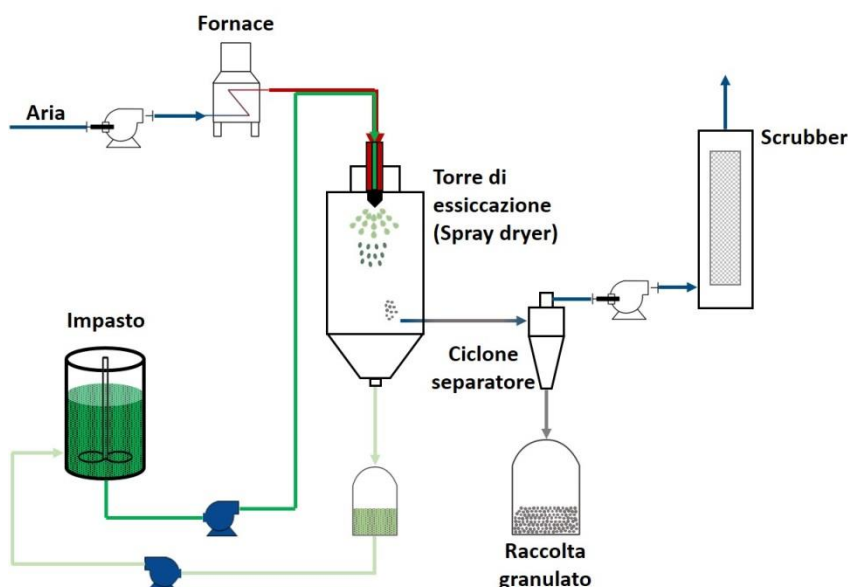


Figura 33. Schema di processo della fase di atomizzazione [17].

La fase di atomizzazione ben si presta ad un accoppiamento termico con la tecnologia solare a concentrazione. In particolare per tale applicazione si può considerare la tecnologia ENEA dei collettori parabolici lineari a sali fusi (NaNO₃ 60%, KNO₃ 40%) operanti nell'intervallo termico 290-550 °C. L'interfaccia con il processo di atomizzazione può essere rappresentato da uno scambiatore intermedio sali/aria, mentre per l'accumulo termico si può adottare un sistema a due serbatoi (per grandi capacità) o un sistema termoclineo (per impianti di piccola taglia) (Figura 34).

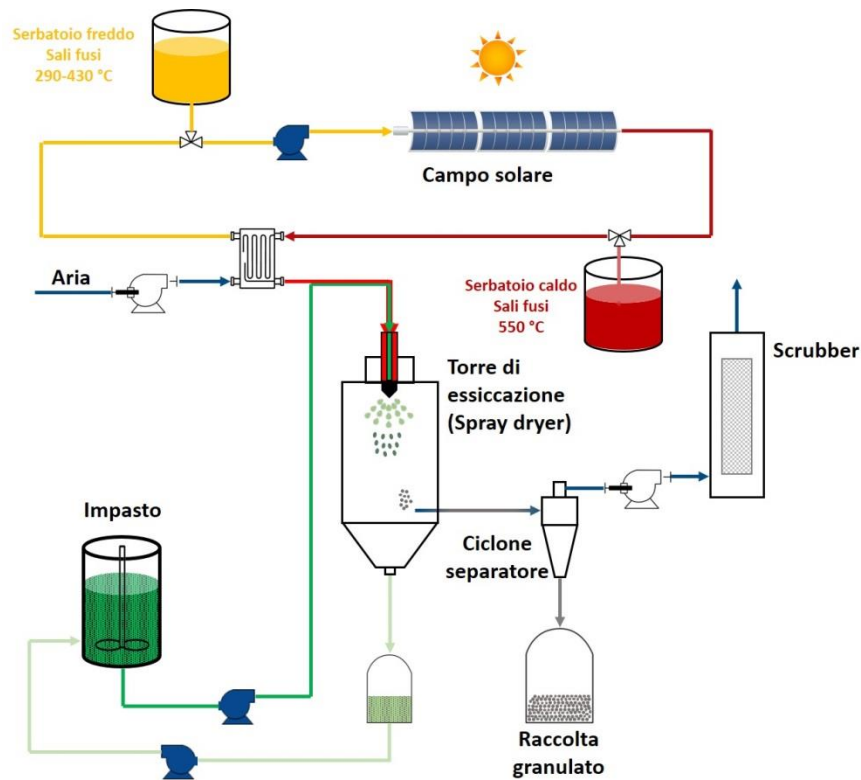


Figura 34. Schema di integrazione della tecnologia solare a concentrazione nel processo di atomizzazione.

In Tabella 16 vengono sinteticamente riportate le principali specifiche di integrazione elaborate per l'accoppiamento termico tra il processo in esame e la tecnologia CST selezionata per la fornitura di calore. In questo specifico caso applicativo, l'integrazione tra utenza industriale e impianto solare è a livello di processo, con uno schema del tipo PL_1 in cui il fluido di processo (aria) viene riscaldato attraverso uno scambiatore esterno.

Tabella 16. Ipotesi di integrazione tra processo di atomizzazione della ceramica e impianto CST: specifiche di processo industriale e impianto solare.

Macrosettore industriale	Ceramica
Specifiche Processo Industriale	
Fabbisogno termico globale italiano [GWh/anno]	10000-11000 [43]
Taglia media processo industriale [MW]	6-10
Operazione unitaria endotermica integrabile con tecnologia CST	Atomizzazione
Potenza media richiesta dall'operazione unitaria [MW]	2-4
Modalità operativa operazione unitaria	Continua sulle 24 h
Tipologia fluido di processo	Aria
Temperatura ingresso fluido processo [°C]	500
Temperatura uscita fluido processo [°C]	100
Specifiche Impianto solare a concentrazione	
Tipologia concentratore solare	Parabolico lineare
Tipologia fluido termovettore	Miscela sali fusi binari
Temperatura ingresso fluido termovettore [°C]	290
Temperatura uscita fluido termovettore [°C]	550
Tipologia di accumulo termico	Doppio serbatoio/Monoserbatoio
Mezzo di accumulo	Miscela sali fusi binari
Temperatura massima accumulo [°C]	550
Temperatura minima accumulo [°C]	290
Interfaccia di integrazione	
Tipologia di integrazione	PL_1
Interfaccia di integrazione	Scambiatore aria/sali

In alternativa, in vista del possibile sviluppo di collettori parabolici lineari operanti con fluidi gassosi [44-45], si potrebbe ipotizzare l'utilizzo di aria sia come fluido termovettore dell'impianto solare, sia come fluido di processo nell'utenza industriale (atomizzazione), eliminando lo scambiatore intermedio sali/aria. In questa ipotesi si renderebbe comunque necessaria l'adozione di un sistema di accumulo di tipo indiretto (ad es. con sali binari o con materiale solido inerte) e l'introduzione di uno scambiatore intermedio tra l'aria proveniente dal campo solare ed il materiale per l'accumulo. Chiaramente la selezione della soluzione più vantaggiosa in termini economici e di affidabilità richiede un'analisi di maggior dettaglio, oggetto della futura attività modellistica e progettuale prevista per la seconda annualità del PTR 2019-2021.

5.3 Settore del gesso

Il gesso è un composto industriale prodotto della **calcinazione** del gesso naturale, denominato anche gesso cotto. Partendo dal gesso naturale, che è un minerale costituito da solfato di calcio biidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), il processo produttivo consiste in una fase di macinazione e una seguente fase di cottura: scaldando il gesso a seconda della temperatura stabilita, il materiale si disidrata e assume diverse modificazioni, con caratteristiche e impieghi differenti. Nel corso della cottura, una volta giunti a 130 °C, la roccia gessosa perde circa i 3/4 dell'acqua di cristallizzazione: si forma così un emiidrato di calcio ($2 \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), che impastato con acqua fa presa e indurisce formando nuovamente un aggregato cristallino compatto di biidrato. L'emiidrato si presenta in due varietà: la varietà α , a presa rapida, e la varietà β , a presa lenta.

Tra i 150 e i 180 °C l'acqua di cristallizzazione viene eliminata completamente ed inizia a formarsi l'anidrite solubile $\text{CaSO}_4(\alpha)$: oltre i 180 °C e fino ai 250 °C questa trasformazione aumenta significativamente la sua velocità. A contatto con l'acqua tale materiale si trasforma subito in semiidrato e poi fa presa; è il così detto *gesso da muro o da fabbrica* che fa presa un po' più rapidamente del gesso da forma.

Spingendo poi la temperatura oltre i 250 °C, raggiungendo i 500-600 °C, si ha la trasformazione del materiale in anidrite insolubile $\text{CaSO}_4(\beta)$ o *gesso morto*, che non reagisce più con l'acqua e non fa più presa.

A 1000 °C circa, si ha una parziale dissociazione del solfato di calcio anidro insolubile, con liberazione fino al 3% circa di ossido di calcio o calce viva CaO e formazione di solfato di calcio basico: il prodotto risultante prende il nome di *gesso idraulico*. A 1360 °C il prodotto fonde e a 1375 °C si ha praticamente una dissociazione completa in ossido di calcio, anidride solforosa e ossigeno. In Tabella 17 si riportano per le diverse reazioni di calcinazione del gesso gli intervalli di temperatura e il calore di reazione riferito alla quantità di prodotto deidratato [46].

Tabella 17. Reazioni di calcinazione del gesso: temperature e calore di reazione per prodotto deidratato [46].

Reazione	Temperatura	Calore	
	[°C]	[kJ/mol]	[MJ/t]
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \alpha\text{-CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	80-180	84.6	582.7
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \beta\text{-CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	120-180	86.7	597.2
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \alpha\text{-CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	150-250	117.4	863.1
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \beta\text{-CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	250-600	121.8	895.7

Per la produzione di gesso β -emiidrato esistono diverse procedure operative. Una prima opzione è la calcinazione diretta in un mulino a rulli verticale (Figura 35a). In questo processo il gesso viene essiccato e macinato nel mulino fino alla finezza desiderata dell'intonaco. Grazie al livello di temperatura relativamente alto nel mulino di calcinazione, il gesso viene contemporaneamente calcinato a temperature tra i 150 e i 180 °C. La temperatura dei gas caldi in ingresso al mulino è di solito di circa 600 °C mentre la temperatura dei gas in uscita è pari a circa 150-160 °C. Il β -emiidrato prodotto nel mulino verticale ha di solito un tempo di presa di circa 5-8 minuti ed è particolarmente adatto per la produzione di lastre di gesso che richiedono tempi di presa brevi ma costanti.

Per garantire che il gesso abbia un tempo di presa più lungo, la percentuale di acqua rimossa durante il processo di calcinazione deve essere superiore: questo è possibile mediante un *kettle* per la calcinazione indiretta del gesso (Figura 35b). In questo processo, il gesso naturale viene prima alimentato ad un mulino dove il materiale viene macinato fino alla finezza richiesta. Successivamente, il gesso macinato introdotto nel kettle viene riscaldato tramite una camicia esterna (per migliorare il trasporto di calore i tubi del gas caldo possono passare anche attraverso il kettle). Il gesso calcinato tende a stratificarsi nella parte superiore per la minore densità. Grazie all'azione di mescolamento di un agitatore, il calore assorbito viene

distribuito in maniera uniforme all'interno del kettle. Il gesso calcinato viene infine aspirato nella parte alta del kettle e inviato in un impianto di raccolta della polvere.

Il tempo di permanenza del gesso prodotto nel mulino verticale è di circa 2-4 minuti, di gran lunga inferiore rispetto al tempo di permanenza del gesso nel kettle, che può variare tra i 60 e i 200 minuti. Inoltre, a causa di un meccanismo di trasporto di calore meno efficiente, il fabbisogno specifico di energia termica nel kettle è circa il 20% superiore rispetto al caso del mulino verticale.

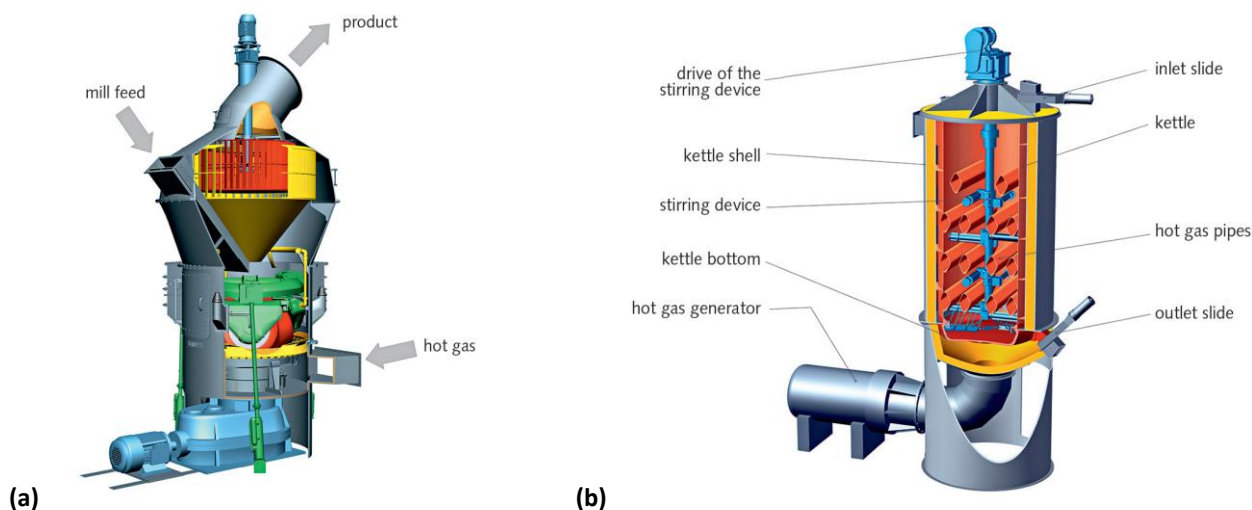


Figura 35. Sistemi per la calcinazione del gesso: a) mulino a rulli verticale e b) kettle [47].

La fase di calcinazione del gesso può essere alimentata termicamente da un impianto solare a concentrazione. In particolare per tale applicazione si può considerare la tecnologia ENEA dei collettori parabolici lineari (o Fresnel) a sali fusi (NaNO_3 60%, KNO_3 40%) operanti nell'intervallo termico 290-550 °C. L'interfaccia con il processo può essere rappresentato da uno scambiatore intermedio sali/aria, mentre per l'accumulo termico si può ricorrere ad un sistema a doppio serbatoio. In Figura 36 si riporta un'ipotesi di integrazione della tecnologia solare con il processo in esame (opzione di calcinazione del gesso in kettle).

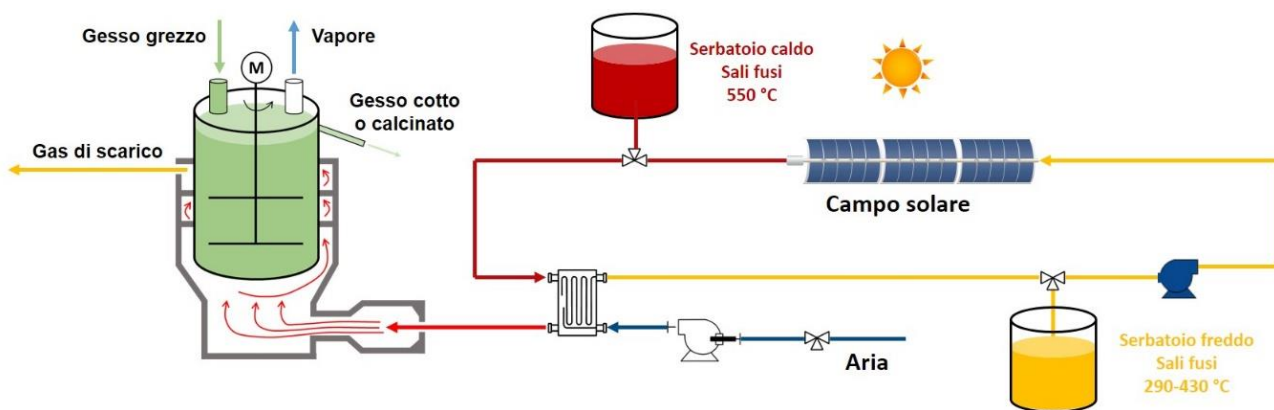


Figura 36. Schema di integrazione della tecnologia solare a concentrazione nel processo di calcinazione del gesso in kettle.

In Tabella 18 vengono sinteticamente riportate le principali specifiche di integrazione elaborate per l'accoppiamento termico tra il processo di calcinazione del gesso e la tecnologia CST selezionata per la fornitura di calore. In questo specifico caso applicativo, l'integrazione tra utenza industriale e impianto solare è a livello di processo, con uno schema del tipo PL_2 in cui il fluido di processo (aria) viene riscaldato attraverso uno scambiatore esterno e convogliata all'interno della camicia del kettle.

Tabella 18. Ipotesi di integrazione tra processo di calcinazione gesso e impianto CST: specifiche di processo industriale e impianto solare.

Macrosettore industriale	Gesso
Specifiche Processo Industriale	
Fabbisogno termico globale italiano [GWh/anno]	400-420
Taglia media processo industriale [MW]	20-25
Operazione unitaria endotermica integrabile con tecnologia CST	Calcinazione
Potenza media richiesta dall'operazione unitaria [MW]	4-6
Modalità operativa operazione unitaria	Continua sulle 24 h
Tipologia fluido di processo	Aria
Temperatura ingresso fluido processo [°C]	500
Temperatura uscita fluido processo [°C]	150-160
Specifiche Impianto solare a concentrazione	
Tipologia concentratore solare	Parabolico lineare
Tipologia fluido termovettore	Miscela sali fusi binari
Temperatura ingresso fluido termovettore [°C]	290
Temperatura uscita fluido termovettore [°C]	550
Tipologia di accumulo termico	Doppio serbatoio/Monoserbatoio
Mezzo di accumulo	Miscela sali fusi binari
Temperatura massima accumulo [°C]	550
Temperatura minima accumulo [°C]	290
Interfaccia di integrazione	
Tipologia di integrazione	PL_2
Interfaccia di integrazione	Scambiatore aria/sali

5.4 Settore chimico

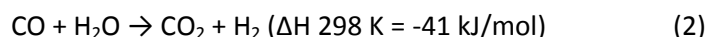
L'industria chimica, come il settore alimentare, si compone di diversi sottosectori e presenta al contempo una molteplicità di processi di produzione e una grande diversificazione di prodotti. Inoltre, un'altra caratteristica che differenzia l'industria chimica dagli altri settori industriali è che si utilizzano combustibili fossili sia come fonte di energia sia come materia prima e, in particolare, l'aliquota di idrocarburi utilizzati come materia prima rappresenta il 40-50% del totale.

Sono numerose le possibili opzioni di integrazione del calore solare a medio/alta temperatura nei processi chimici e petrolchimici di trasformazione della materia prima e/o produzione di lavorati o semi/lavorati. Nel presente lavoro, a titolo di esempio, vengono considerate due categorie di processi di conversione degli idrocarburi: il reforming ed il cracking.

5.4.1 Steam Reforming del metano

Il processo di *Steam Reforming* del metano (SMR) è il più diffuso processo industriale per la produzione di idrogeno. Si tratta di un processo chimico comunemente realizzato a temperature superiori agli 850 °C, in forni alimentate da combustibili fossili.

Lo SMR è costituito essenzialmente da due reazioni catalitiche in fase gassosa tra vapore e metano:



La reazione (1) di steam reforming del gas naturale desolfurato è fortemente endotermica e viene effettuata di norma a 800-1000 °C in forni alimentati a gas naturale grezzo. Diversamente, la reazione (2), che massimizza la resa in idrogeno, ed è nota come *water-gas shift reaction* (WGS), è esotermica e pertanto favorita a più basse temperature (200-450 °C). L'idrogeno prodotto è successivamente separato dalla miscela di gas mediante adsorbimento a pressione variabile (PSA, *pressure swing adsorption*), mentre la CO₂ può essere catturata attraverso adsorbimento in soluzioni acquose ammino-alcaline. In Figura 37 si riporta uno schema di processo dello steam reforming del metano.

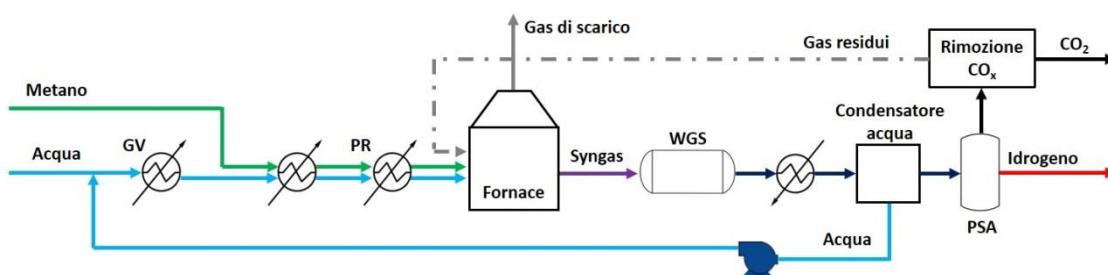


Figura 37. Schema del processo di steam reforming del metano [48].

Di recente, nell'ambito del Progetto Europeo CoMETHy, ENEA ha proposto e sviluppato un processo modificato di steam reforming del metano al fine di consentirne l'integrazione con la tecnologia solare a concentrazione. In particolare, allo scopo di ridurre le temperature operative della reazione (1), sono stati sviluppati nuovi catalizzatori e un "reattore a membrana" che permettono di sostenere il processo a livelli termici inferiori a 565 °C [48]. Il processo è stato ingegnerizzato e dimostrato attraverso la realizzazione di un impianto pilota collegato ad un circuito a sali fusi presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia (capacità: 3.5 Nm³/h di idrogeno puro). Nell'ipotesi di processo elaborata da ENEA, rappresentata in Figura 38, un impianto a collettori parabolici lineari provvede alla captazione e al trasferimento dell'energia solare attraverso l'utilizzo di sali fusi come fluido termovettore. Inoltre un sistema di stoccaggio di calore a doppio serbatoio consente di stabilizzare l'input termico all'impianto chimico, indipendentemente dalle fluttuazioni della radiazione solare. I sali fusi a una temperatura nominale di 550 °C vengono inviati al

reattore di steam reforming costituito da uno scambiatore di calore a fascio tubiero e mantello: i sali fusi, contenuti nel mantello, trasferiscono il calore solare al gas passante nei tubi. All'interno dei tubi, riempiti di un opportuno catalizzatore, avviene sia la reazione di produzione di idrogeno che l'operazione di separazione dei prodotti grazie alla presenza di una membrana a base di palladio permeabile all'idrogeno. L'estrazione di idrogeno dall'ambiente di reazione consente, in un singolo stadio, sia di ottenere elevate rese (nonostante temperature relativamente "basse" per tale processo) che di purificare l'idrogeno prodotto. Il processo produce, pertanto, idrogeno puro (> 99%) e una miscela gassosa ricca in CO₂ che può essere facilmente purificata. Il calore residuo dei sali fusi provenienti dal reattore viene utilizzato per sostenere altri servizi di impianto (preriscaldamento alimentazione, generazione di vapore, ecc.); i sali fusi vengono, infine, raccolti nel serbatoio "freddo" dell'impianto solare.

In Tabella 19 vengono sinteticamente riportate le principali specifiche di integrazione elaborate per l'accoppiamento termico tra il processo in esame e la tecnologia CST selezionata per la fornitura di calore. In questo specifico caso applicativo, l'integrazione tra utenza industriale e impianto solare è a livello di processo, con uno schema del tipo PL_3 in cui il calore solare è direttamente fornito all'apparecchiatura di processo (scambiatore a fascio tubiero).

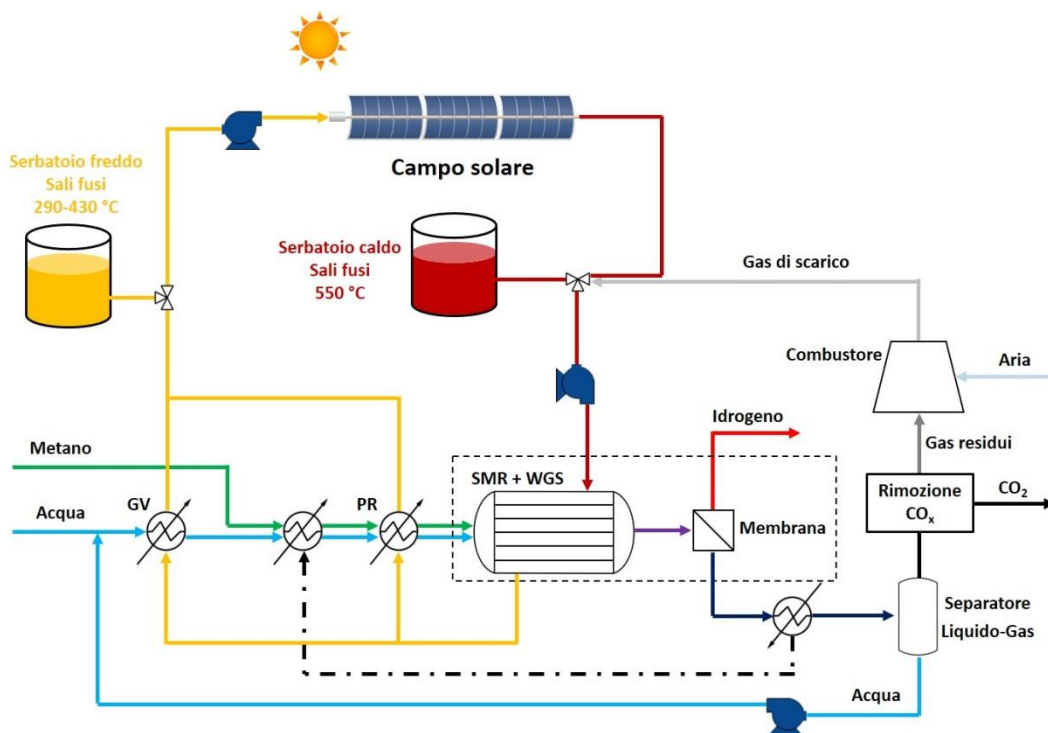


Figura 38. Schema di integrazione della tecnologia solare a concentrazione nel processo di steam reforming del metano [48].

Tabella 19. Ipotesi di integrazione tra processo di steam reforming e impianto CST: specifiche di processo industriale e impianto solare.

Macrosettore industriale	Ceramica
Specifiche Processo Industriale	
Capacità dei principali impianti italiani (reforming) [Mt/anno]	11.2 [49]
Taglia media processo industriale (SMR) [Nm ³ /h H ₂]	100 000 [50]
Operazione unitaria endotermica integrabile con tecnologia CST	Reforming a bassa temperatura
Potenza media richiesta dall'operazione unitaria [MW]	350 MW
Modalità operativa operazione unitaria	Continua sulle 24 h
Tipologia fluido di processo	Miscela vapore/metano
Temperatura ingresso fluido processo [°C]	90
Temperatura uscita fluido processo [°C]	540
Specifiche Impianto solare a concentrazione	
Tipologia concentratore solare	Parabolico lineare
Tipologia fluido termovettore	Miscela sali fusi binari
Temperatura ingresso fluido termovettore [°C]	290
Temperatura uscita fluido termovettore [°C]	550
Tipologia di accumulo termico	Doppio serbatoio/Monoserbatoio
Mezzo di accumulo	Miscela sali fusi binari
Temperatura massima accumulo [°C]	550
Temperatura minima accumulo [°C]	290
Interfaccia di integrazione	
Tipologia di integrazione	PL_3
Interfaccia di integrazione	Scambiatore gas/sali

5.4.2 Cracking

L'uso principale del cracking in raffineria avviene nei processi di conversione termici o catalitici per modificare le rese del grezzo a favore dei prodotti più leggeri di quelli di partenza, quali la benzina o il gasolio, per mezzo della rottura di molecole complesse.

Tra i processi più idonei ad una integrazione termica da solare a concentrazione, particolare interesse rivestono il visbreaking, il cracking catalitico e il cracking termico [51].

Il visbreaking è un trattamento di blando cracking termico condotto su residui di distillazione atmosferica (topping) o di distillazione sotto vuoto al fine di ridurre la viscosità e di ottenere oli combustibili di opportune caratteristiche. In sintesi, un impianto di visbreaking consiste di un forno, un'eventuale camera di sosta detta *soaker* e di una colonna di frazionamento (Figura 40). La presenza del *soaker* consente di fornire meno calore all'alimentazione poiché completa le reazioni iniziate nel forno, permettendo temperature operative inferiori a scapito però di minore stabilità e flessibilità. In ogni caso le temperature operative sono comprese tra 420 e 500 °C e le pressioni tra 3 e 20 bar, variabili a seconda della regolazione della vaporizzazione nel *soaker*: aumentando la pressione si riduce la frazione di vaporizzato, si allunga il tempo di reazione, aumenta la conversione, la stabilità dei prodotti e la deposizione del coke, e quindi la qualità del prodotto. In queste condizioni si ottiene in uscita una fase liquida. L'effluente del *soaker* (o del forno) viene successivamente frazionato in una colonna di distillazione dotata di stripper per il gasolio. Il residuo può essere stoccato, miscelato o inviato alla distillazione sotto vuoto. Il prodotto di testa della colonna viene infine condensato parzialmente, ottenendo una separazione tra frazioni più leggere e pesanti.

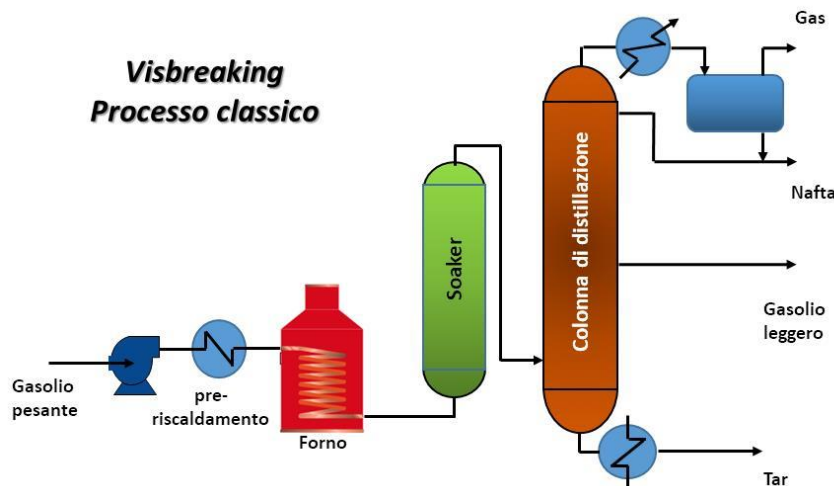


Figura 39. Schema semplificato del processo di visbreaking.

Il cracking catalitico e quello termico hanno entrambi la funzione di trasformare idrocarburi ad alto peso molecolare in prodotti più leggeri (benzina e GPL per esempio). A differenza del visbreaking, questi processi avvengono in fase vapore invece che liquido/vapore.

Il cracking catalitico si differenzia per una minore produzione di gas (idrogeno, metano, etano) e una maggior produzione di benzina, caratterizzata da elevato numero di ottano e ridotta quantità di residui. Di contro, il cracking catalitico risulta più costoso sia per Capex che per Opex ed ha il problema della disattivazione del catalizzatore con il coke. I processi attualmente impiegati sono a letto mobile (TCC, Thermal Catalytic Cracking) e fluidizzato (FCC, Fluidized Catalytic Cracking). I catalizzatori industriali sono composti da zeoliti cristalline disperse in una matrice amorfa che funge da legante, da veicolo di diffusione e da disperdente del calore. La formazione di coke, originata da varie reazioni secondarie di deidrogenazione, condensazione e polimerizzazione, porta al graduale blocco dei centri attivi del

catalizzatore, che perde l'attività e deve quindi essere rigenerato per combustione del deposito e riciclato nel reattore.

Il cracking termico è un processo di produzione della naphtha (frazione benzina) e gasolio leggero a partire da gasoli pesanti (talvolta chiamati distillati paraffinosi). Solitamente si utilizza per il riciclo di gasoli non convertiti, provenienti da altri processi. Nell'Europa occidentale il cracking termico è soprattutto limitato ad alcune delle raffinerie non dotate di unità FCC. Comunemente il cracking termico viene integrato a valle del visbreaking per convertire i gasoli pesanti. Il cracking termico dei gasoli pesanti è condotto in condizioni di media severità, con temperature massime di circa 540 °C. Da notare che con "severità" si indica la conversione per passaggio: maggiore è la conversione, maggiore è la severità: La conversione è chiaramente influenzata dalla temperatura di uscita dal forno (principale variabile operativa), dal tipo di carica e dalla pressione operativa.

Riguardo i consumi termici delle reazioni di cracking, essi in linea di massimo variano tra 60 e 90 kJ/mol, con qualche eccezione riguardante, per esempio, la de-idrogenazione del ciclo-esano che si attesta sui 220 kJ/mol [52].

La soluzione di integrazione tra processo chimico e impianto solare proposta nel presente lavoro richiede la sostituzione del forno di cracking con un forno solare, ossia uno scambiatore di calore, anche del tipo shell and tube, in cui la carica di idrocarburi fluisca all'interno dei tubi e il calore di processo venga fornito dai sali solari contenuti nel mantello. Tipicamente gli impianti di cracking hanno taglia medio-grande ed è quindi possibile ipotizzare un accumulo termico a sali a doppio serbatoio che garantisca continuità di funzionamento al processo industriale indipendentemente dalla disponibilità della sorgente solare.

In Figura 40 è riportato lo schema semplificato di visbreaking in accoppiamento con un impianto solare a concentrazione; ovviamente tale schema di integrazione è valido anche per l'applicazione del cracking termico e catalitico, pur con qualche modifica nelle condizioni operative di reazione.

In Tabella 19 vengono invece sinteticamente riportate le principali specifiche di integrazione elaborate per l'accoppiamento termico tra il processo in esame e la tecnologia CST selezionata per la fornitura di calore. In questo specifico caso applicativo, l'integrazione tra utenza industriale e impianto solare è a livello di processo, con uno schema del tipo PL_3 in cui il calore solare è direttamente fornito all'apparecchiatura di processo (scambiatore a fascio tubiero/forno).

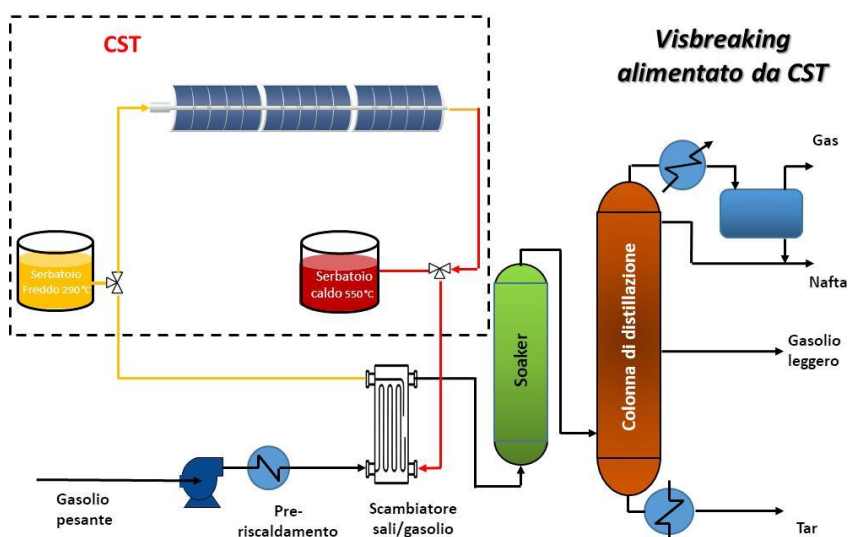


Figura 40. Schema semplificato del processo di visbreaking integrato con un impianto solare a concentrazione dotato di accumulo termico.

Tabella 20. Ipotesi di integrazione tra processo di vis-breaking e impianto CST: specifiche di processo industriale e impianto solare.

Macrosettore industriale	Chimico
Specifiche Processo Industriale	
Capacità dei principali impianti italiani (cracking) [Mt/anno]	36.4 [49]
Taglia media processo industriale [barili/giorno]	29000 [53]
Operazione unitaria endotermica integrabile con tecnologia CST	Cracking
Potenza media richiesta dall'operazione unitaria [MW]	13.4
Modalità operativa operazione unitaria	Continua sulle 24 h
Tipologia fluido di processo	Miscela vapore/metano
Temperatura ingresso fluido processo [°C]	150
Temperatura uscita fluido processo [°C]	540
Specifiche Impianto solare a concentrazione	
Tipologia concentratore solare	Parabolico lineare
Tipologia fluido termovettore	Miscela sali fusi binari
Temperatura ingresso fluido termovettore [°C]	290
Temperatura uscita fluido termovettore [°C]	550
Tipologia di accumulo termico	Doppio serbatoio/Monoserbatoio
Mezzo di accumulo	Miscela sali fusi binari
Temperatura massima accumulo [°C]	550
Temperatura minima accumulo [°C]	290
Interfaccia di integrazione	
Tipologia di integrazione	PL_3
Interfaccia di integrazione	Scambiatore gas/sali

5.5 Settore alimentare

Il settore alimentare, analogamente all'industria chimica, si distingue dagli altri comparti industriali per la molteplicità dei processi di lavorazione e la grande diversificazione dei prodotti.

Come precedentemente menzionato (Capitolo 2), il fabbisogno energetico dei processi dipende dal tipo di alimento (animale o vegetale), dalle tecniche e tecnologie di coltivazione, di trasformazione e di trasporto: per ogni chilogrammo di bene alimentare il consumo di energia varia da un minimo di circa 0.5 kWh a un massimo di 61 kWh [16]. In Tabella 10 si riportano i consumi energetici (elettrici e termici) per i principali sotto-settori dell'industria agro-alimentare. Non è possibile definire i consumi specifici energetici per i vari sottoprocessi se non in maniera approssimativa data la numerosità dei processi e la variabilità delle tecnologie utilizzate. In maniera indicativa, il 33% dei consumi di energia è attribuibile alle principali operazioni, quali riscaldamento, essiccazione, refrigerazione, surgelazione, sterilizzazione e sanificazione. La richiesta energetica per i processi ausiliari (generazione di calore, vapore, aria compressa e freddi) si attesta intorno al 50% dei consumi totali mentre la restante aliquota è mediamente distribuita su tutti gli altri sottoprocessi.

Nel presente lavoro, a titolo esemplificativo, vengono presi in esame alcuni processi industriali alimentari che, per i livelli termici operativi, sono idonei ad una alimentazione termica da solare a concentrazione e che sono rappresentativi di un articolato tessuto produttivo di piccola e media taglia.

5.5.1 Processo di separazione - Deodorizzazione olio

La **deodorizzazione** (o deodorazione) è il procedimento tipico dell'industria alimentare mediante il quale vengono neutralizzati i cattivi odori relativi a una determinata sostanza [54]. Tale operazione è essenziale per gli oli e i grassi destinati all'alimentazione umana. In particolare le sostanze che producono cattivo odore sono di natura diversa, per lo più costituite da aldeidi, chetoni, acidi grassi a basso peso molecolare, idrocarburi non saturi, terpeni. Anche se essi sono presenti in percentuali molto piccole, tuttavia possono rendere inutilizzabili gli oli o i grassi, sia per uso commestibile, sia per uso industriale. Le sostanze volatili che causano cattivi odori sono in parte trattenute dagli adsorbenti solidi che possono venire utilizzati in fasi lavorative precedenti, come la decolorazione mediante carboni attivi, allumina o gel di silice. Il vero e proprio trattamento di deodorizzazione consiste nel far gorgogliare vapore surriscaldato attraverso strati di olio deaerato in recipienti sottovuoto. In Figura 41 viene schematizzato il processo di un impianto di deodorizzazione continua. L'olio da trattare, preventivamente deaerato in 1, passa nel recuperatore 2 (che può essere esterno o interno alla camera di deodorizzazione) dove viene preriscaldato a spese del calore ceduto dall'olio in uscita dalla colonna sottovuoto. Successivamente l'olio attraversa il riscaldatore a vapore 3 e viene introdotto nella parte alta della colonna 4, in corrispondenza del piatto superiore. Dal piatto superiore l'olio scende nei piatti sottostanti incontrando il vapore in controcorrente. L'olio uscente, dopo aver ceduto calore nel recuperatore 2, viene ulteriormente raffreddato e poi filtrato. In alcune soluzioni compatte, il recuperatore potrebbe essere posto nella parte inferiore del deodorizzatore.

La deodorizzazione sotto vuoto solitamente richiede 4-5 h operative quando l'olio viene riscaldato tra i 200 e i 240 °C: per raggiungere tali temperature, nel riscaldatore 3 viene mandato vapore a temperatura superiore ai 400 °C. Come precedentemente menzionato, il trattamento di deodorazione consiste nell'introdurre vapore (>140 °C) nella colonna di gorgogliamento con un rapporto ponderale di 3 a 100 rispetto all'olio [54]. Il vuoto praticato nell'impianto (pressioni di circa 0.01 atm) solitamente viene realizzato in maniera efficace mediante l'azione combinata di vapore e pompe da vuoto.

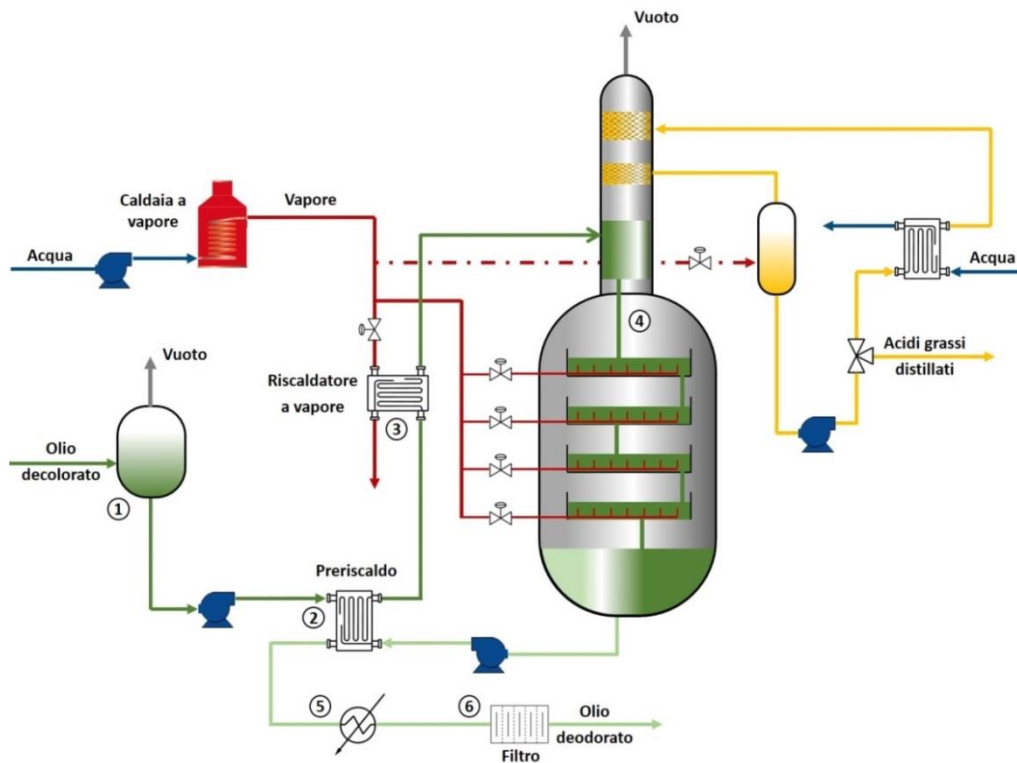


Figura 41. Schema del processo di deodorizzazione dell'olio [54].

Per l'accoppiamento del processo con la tecnologia solare a concentrazione si propone la produzione di vapore solare mediante un generatore di vapore interno al serbatoio di accumulo termico di un impianto a collettori lineari (parabolici o Fresnel) (Figura 42). Si propone, inoltre, l'uso di sali fusi binari, caratterizzati da un intervallo termico operativo compreso tra 290 °C e 550 °C. Nel caso di utenza industriale di piccola taglia, il sistema di accumulo termico può essere rappresentato da un singolo serbatoio che utilizzi la tecnologia del termocline, potenzialmente idonea al raddoppio della densità di energia stoccata negli attuali sistemi commerciali a due serbatoi. Questo tipo di sistemi TES sfrutta la tendenza del fluido di accumulo a stabilire una stratificazione termica nel serbatoio, ottenendo di fatto due strati distinti: uno ad alta temperatura nella zona superiore ed uno a bassa temperatura nella zona inferiore, separati da una zona di transizione tra le due temperature. Questa soluzione estremamente compatta consente, oltre che a dimezzare il numero di serbatoi di accumulo termico, di integrare efficacemente l'economizzatore, il vaporizzatore e il surriscaldatore in un'unica apparecchiatura, riducendo anche le perdite termiche. Tale tecnologia è stata testata con successo nell'impianto MATS (finanziato nell'ambito del 7° FP, GA No. 268219) installato in Borg-el-Arab (Alexandria, Egitto) per la produzione di vapore di alimento di un ciclo Rankine (1 MW_e) [27].

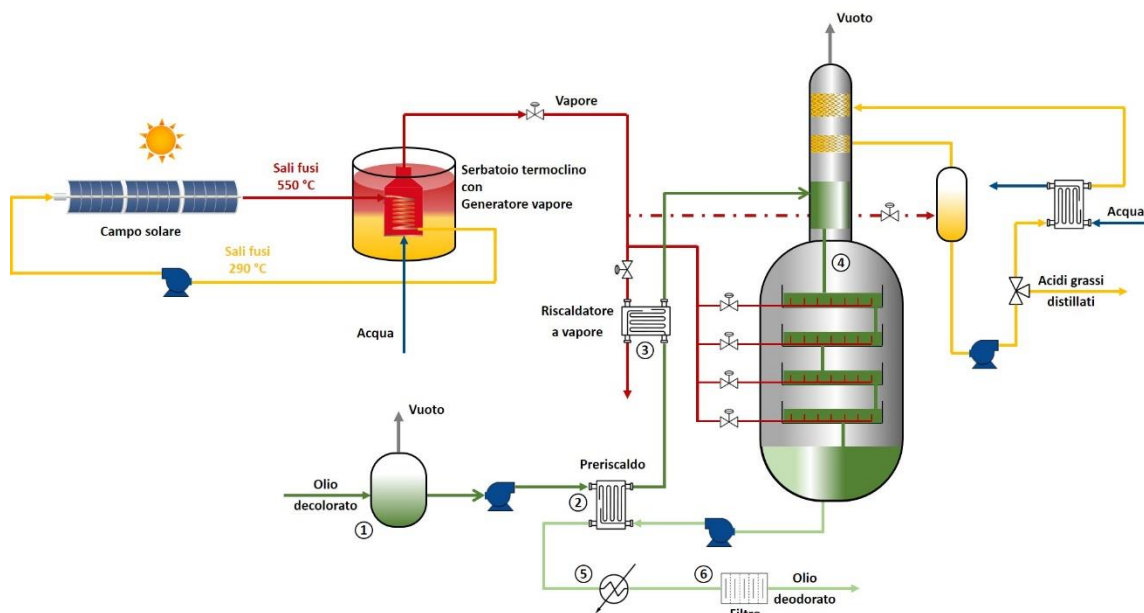


Figura 42. Schema di integrazione della tecnologia solare a concentrazione nel processo di deodorizzazione dell'olio con generatore di vapore integrato all'interno del serbatoio di accumulo termoclineo.

In alternativa, per taglie di processo medio grandi, può essere ipotizzata la configurazione di impianto rappresentata in Figura 43, in cui il generatore di vapore è posto a valle del sistema di accumulo (del tipo a due serbatoi) ed il fluido termovettore è una miscela di sali binari, in analogia al caso precedente.

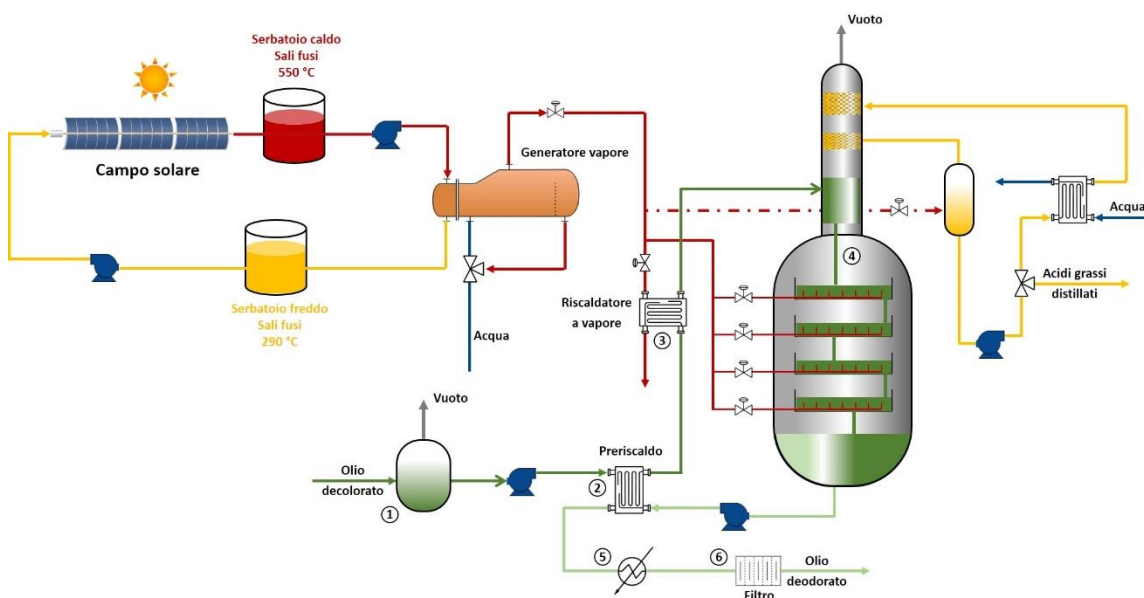


Figura 43. Schema di integrazione della tecnologia solare a concentrazione nel processo di deodorizzazione dell'olio con generatore di vapore a valle del sistema di accumulo.

La produzione diretta di vapore in impianti Fresnel rappresenta una terza possibile opzione, virtualmente più vantaggiosa dal punto di vista economico, ma meno funzionale da un punto di vista tecnico. Infatti ad oggi non esiste una tecnologia consolidata ed efficiente per lo stoccaggio di vapore e pertanto sarebbe

difficile garantire continuità operativa al processo indipendentemente dalla disponibilità della sorgente solare.

In Tabella 21 vengono sinteticamente riportate le principali specifiche di integrazione elaborate per l'accoppiamento termico tra il processo di deodorizzazione e la tecnologia CST selezionata per la fornitura di calore. In questo specifico caso applicativo, con l'utilizzo concomitante del vapore a bassa e alta pressione, l'integrazione tra utenza industriale e impianto solare avviene in due punti distinti: il primo, a livello di processo, con uno schema del tipo PL_4_BP, in cui il vapore "solare" viene direttamente iniettato nell'apparecchiatura di processo (colonna sotto vuoto di desorbimento); il secondo, a livello di fornitura, con uno schema di tipo SL_1, in cui il vapore ad alta pressione riscalda l'olio a monte della colonna di desorbimento. In alternativa, riguardo al secondo punto, si potrebbe ipotizzare anche una soluzione a livello di processo di tipo PL_1, in cui il fluido termovettore utilizzato nel campo solare va a riscaldare direttamente l'olio attraverso uno scambiatore di calore esterno.

Tabella 21. Ipotesi di integrazione tra processo di deodorizzazione e impianto CST: specifiche di processo industriale e impianto solare

Macrosettore industriale	Chimico
Specifiche Processo Industriale	
Fabbisogno termico globale italiano [GWh/anno]	420-460 [55]
Taglia media processo industriale [MW]	10-12
Operazione unitaria endotermica integrabile con tecnologia CST	Deodorizzazione
Potenza media richiesta dall'operazione unitaria [MW]	3-5
Modalità operativa operazione unitaria	Continua sulle 24 h
Tipologia fluido di processo	Vapore
Temperatura ingresso fluido processo [°C]	>140 & >400
Temperatura uscita fluido processo [°C]	80-100
Specifiche Impianto solare a concentrazione	
Tipologia concentratore solare	Parabolico lineare/Fresnel
Tipologia fluido termovettore	Miscela sali fusi binari
Temperatura ingresso fluido termovettore [°C]	290
Temperatura uscita fluido termovettore [°C]	550
Tipologia di accumulo termico	Doppio serbatoio/Monoserbatoio
Mezzo di accumulo	Miscela sali fusi binari
Temperatura massima accumulo [°C]	550
Temperatura minima accumulo [°C]	290
Interfaccia di integrazione	
Tipologia di integrazione	PL_4_BP & SL_1
Interfaccia di integrazione	Generatore di vapore

5.5.2 Processo di cottura - Prodotti da forno

Il processo di cottura di un prodotto da forno è finalizzato a convertire la pasta cruda in pane, formare la crosta, eliminare agenti patogeni ed estendere la durata di conservazione. A seconda del tipo di prodotto, le temperature dell'aria all'interno del forno vanno dai 150 ai 320 °C e la durata media del processo di cottura è compresa tra 4 e 10 minuti.

In tale processo si possono utilizzare forni diretti o indiretti. Nel caso di forni diretti (forno DGF), nella camera di cottura è presente un'unità radiante diretta alimentata da combustibili fossili (ad esempio gas naturale, propano, butano, gas di petrolio liquido, petrolio) o elettricità. Il trasferimento di calore in un forno a cottura diretta viene effettuato principalmente per irraggiamento dalle fiamme, dalle resistenze elettriche e dalle superfici calde. Nel caso di cottura indiretta, il bruciatore è collegato ad uno scambiatore di calore a tubi radianti posizionato all'interno della camera. In questa configurazione i prodotti della combustione non vengono a contatto con l'aria di ricircolo o con gli alimenti all'interno della camera di lavoro.

In commercio esistono forni a cottura indiretta che utilizzano olio diatermico fino a 300 °C in impianti a funzionamento continuo o discontinuo [56-57]: in questa soluzione il fluido termovettore viene riscaldato mediamente una caldaia centrale a fonte fossile (Figura 44a).

Per l'accoppiamento di questa tipologia di forno con la tecnologia solare a concentrazione si può ipotizzare l'utilizzo di un impianto a collettori lineari Fresnel utilizzando olio diatermico come HTF, in modo da mantenere inalterato il circuito di riscaldamento e la componentistica del processo di panificazione (Figura 44b). Per lo stoccaggio termico si può ricorrere ad un innovativo sistema mono-serbatoio sviluppato da ENEA, basato sull'utilizzo di cementi ottenuti dal riciclo di scarti metallici da lavorazioni meccaniche [58]. Il serbatoio di accumulo è riscaldato e raffreddato dal fluido termovettore attraverso uno scambiatore olio/cemento affogato nel cemento stesso. Questa soluzione di accumulo è caratterizzata da un basso costo, facile reperibilità dei materiali, e modularità; la densità effettiva di accumulo può inoltre essere incrementata attraverso l'aggiunta di materiale a cambiamento di fase (PCM) [59].

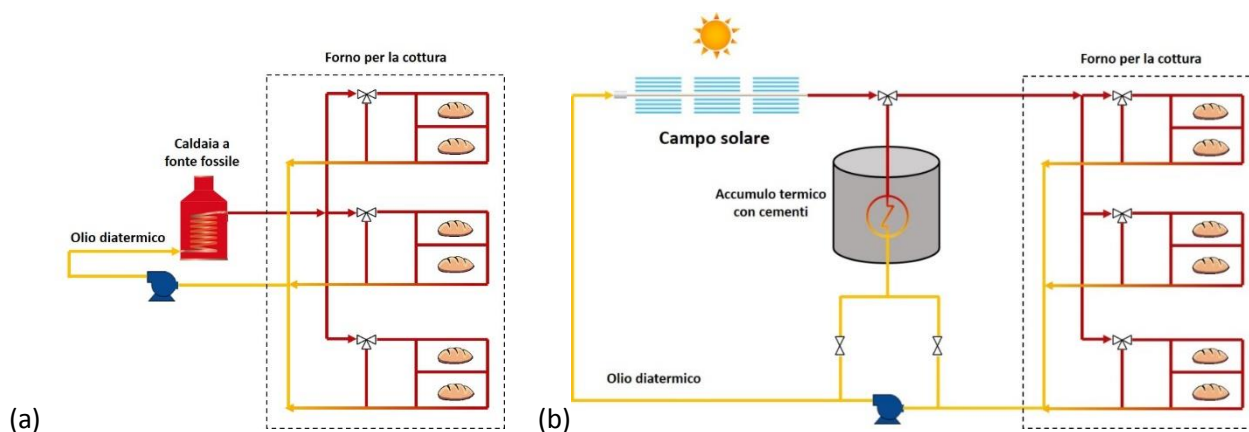


Figura 44. Cottura del pane: (a) Schema di impianto convenzionale [57]; (b) schema di processo con integrazione della tecnologia solare a concentrazione.

In Tabella 22 vengono sinteticamente riportate le principali specifiche di integrazione elaborate per l'accoppiamento termico tra il processo di cottura dei prodotti da forno e la tecnologia CST selezionata per la fornitura di calore. In questo specifico caso applicativo, l'integrazione tra utenza industriale e impianto solare è a livello di processo, con uno schema del tipo PL_3, in cui il calore solare è direttamente fornito all'apparecchiatura di processo (scambiatore a tubi radianti in camera di cottura). Va evidenziato che non è stato possibile reperire dati precisi riguardanti i consumi energetici del settore in Italia, in quanto l'industria

dei prodotti da forno è molto eterogenea e costituita prevalentemente da panifici di piccole e medie dimensioni che soddisfano la domanda di quartiere.

Tabella 22. Ipotesi di integrazione tra processo di cottura (prodotti da forno) e impianto CST: specifiche di processo industriale e impianto solare

Macrosettore industriale	Alimentare
Specifiche Processo Industriale	
Fabbisogno termico globale italiano [GWh/anno]	1100-1200 [60]
Taglia media processo industriale [MW]	1-3
Operazione unitaria endotermica integrabile con tecnologia CST	Cottura
Potenza media richiesta dall'operazione unitaria [MW]	1-3
Modalità operativa operazione unitaria	Continua sulle 24 h/discontinua
Tipologia fluido di processo	Aria
Temperatura ingresso fluido processo [°C]	160-320
Temperatura uscita fluido processo [°C]	120-240
Specifiche Impianto solare a concentrazione	
Tipologia concentratore solare	Fresnel
Tipologia fluido termovettore	Miscela sali fusi ternari/olio diatermico
Temperatura ingresso fluido termovettore [°C]	150-200
Temperatura uscita fluido termovettore [°C]	300-400
Tipologia di accumulo termico	Monoserbatoio
Mezzo di accumulo	Cemento
Temperatura massima accumulo [°C]	400
Temperatura minima accumulo [°C]	150
Interfaccia di integrazione	
Tipologia di integrazione	PL_3
Interfaccia di integrazione	Scambiatore a tubi radianti

5.5.3 Maltificazione

La birra, secondo la ricetta tradizionale, è prodotta a partire da malto d'orzo, acqua e luppolo. L'acqua è l'ingrediente prevalente (90%), ma il malto è sicuramente quello più caratterizzante. Per produrre il malto d'orzo, si parte dai semi di orzo, che vengono fatti germogliare mediante la bagnatura (**macerazione**) ed il mantenimento a temperature adeguate a favorire lo sviluppo delle piantine (in genere 15 °C).

La **germinazione** del chicco consente lo sviluppo degli enzimi che permettono poi di trasformare l'amido, la sostanza di riserva farinosa contenuta all'interno del seme, in zuccheri solubili in acqua. La germinazione avviene su piani di germinazione nell'arco di 5-6 giorni. Quando i germogli misurano tre quarti della lunghezza del chicco, il malto verde così ottenuto viene essiccato in appositi forni per uno/due giorni: le diverse modalità con cui può essere effettuato questo processo danno origine a vari tipi di malto di differente colore, in grado di conferire un carattere particolare al prodotto finito. A seguito di questa operazione, i chicchi diventano croccanti e assumono un gradevole sapore, tanto da essere utilizzati, oltre che per produrre la birra, anche per realizzare altre bevande (per esempio il whisky di malto), nonché biscotti e cereali per la prima colazione.

L'**essicazione** rappresenta lo step energivoro della maltazione, richiedendo un afflusso di aria a temperature comprese tra 60-90 °C per evitare il danneggiamento degli enzimi. L'umidità residua al termine del trattamento, che ha una durata totale di 15-20 ore, è inferiore al 5%.

L'impianto di essicazione tipicamente è costituito da più essiccatoi operanti in parallelo a cicli sfalsati per realizzare una produzione continua, mantenendo bilanciato il carico termico.

Tipicamente nelle malterie industriali l'aria viene riscaldata da un fluido termovettore intermedio (olio diatermico), a sua volta riscaldata da una caldaia alimentata a gas. In alcuni casi la temperatura di ingresso dell'olio diatermico nello scambiatore aria/olio è compresa tra 150 e 250 °C, dipendentemente dalla temperatura target dell'aria che può variare nel corso dell'anno per effetto delle diverse condizioni ambientali (umidità e temperatura dell'aria).

Pur essendo l'essicazione un processo a bassa temperatura, in alcuni impianti l'olio diatermico viene riscaldata fino a 250 °C per ridurre le superfici di scambio olio/aria.

Per l'accoppiamento di questo processo di essicazione con la tecnologia solare a concentrazione si può ipotizzare l'utilizzo di un impianto a collettori lineari Fresnel utilizzando olio diatermico come HTF, in modo da mantenere inalterato il circuito di riscaldamento, la componentistica del processo di maltazione, e l'interfaccia di scambio termico con la sorgente di energia (scambiatore olio/aria) (Figura 45). Per lo stoccaggio termico si può ricorrere ad un innovativo sistema mono-serbatoio sviluppato da ENEA, basato sull'utilizzo di cementi ottenuti dal riciclo di scarti metallici da lavorazioni meccaniche [58]. Il serbatoio di accumulo è riscaldato e raffreddato dal fluido termovettore attraverso uno scambiatore olio/cemento affogato nel cemento stesso. Questa soluzione di accumulo è caratterizzata da un basso costo, facile reperibilità dei materiali e modularità; la densità effettiva di accumulo può inoltre essere incrementata attraverso l'aggiunta di materiale a cambiamento di fase (PCM) [59].

In Tabella 23 vengono sinteticamente riportate le principali specifiche di integrazione elaborate per l'accoppiamento termico tra il processo in esame e la tecnologia CST selezionata per la fornitura di calore. In questo specifico caso applicativo, l'integrazione tra utenza industriale e impianto solare è a livello di processo, con uno schema del tipo PL_1 in cui il calore solare riscalda i flussi di materia in ingresso attraverso uno scambiatore esterno (aria/olio).

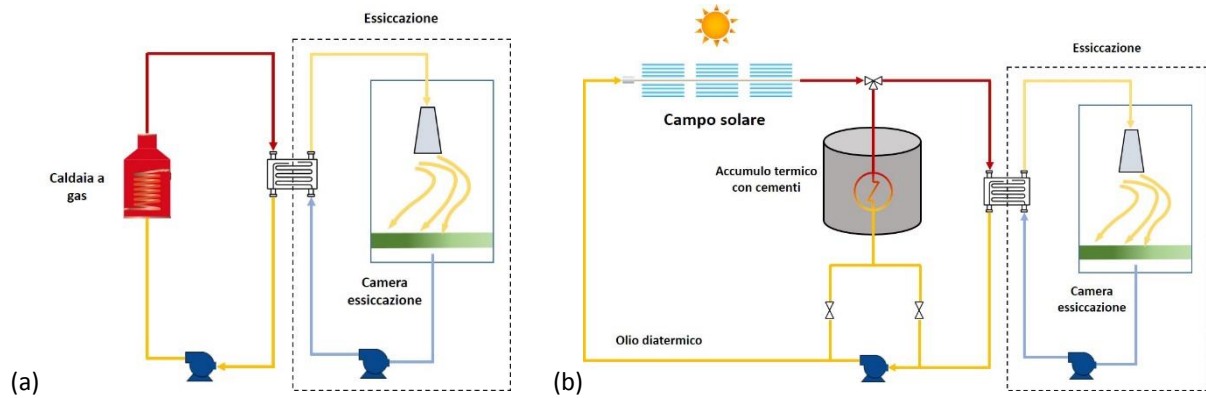


Figura 45: Essiccazione del malto: (a) schema di processo convenzionale; (b) schema di processo con integrazione CST.

Tabella 23. Ipotesi di integrazione tra processo di steam reforming e impianto CST: specifiche di processo industriale e impianto solare

Macrosettore industriale	Alimentare
Specifiche Processo Industriale	
Fabbisogno termico globale italiano [GWh/anno]	400-420
Taglia media processo industriale [MW]	6-10
Operazione unitaria endotermica integrabile con tecnologia CST	Essiccazione
Potenza media richiesta dall'operazione unitaria [MW]	2-3
Modalità operativa operazione unitaria	Continua sulle 24 h
Tipologia fluido di processo	Aria
Temperatura ingresso fluido processo [°C]	90
Temperatura uscita fluido processo [°C]	30
Specifiche Impianto solare a concentrazione	
Tipologia concentratore solare	Fresnel
Tipologia fluido termovettore	Olio diatermico
Temperatura ingresso fluido termovettore [°C]	100
Temperatura uscita fluido termovettore [°C]	260
Tipologia di accumulo termico	Monoserbatoio
Mezzo di accumulo	Cemento
Temperatura massima accumulo [°C]	260
Temperatura minima accumulo [°C]	100
Interfaccia di integrazione	
Tipologia di integrazione	PL_1
Interfaccia di integrazione	Scambiatore aria/olio

6 Conclusioni

Attualmente l'utilizzo dell'energia solare per l'alimentazione termica dei processi industriali è limitato alle basse temperature (<150 °C, tecnologie a collettori piani), ed è frenato da ragioni economiche (costi di installazione e costi operativi, elevati tempi di recupero dell'investimento) e dalla ridotta flessibilità di funzionamento dei sistemi solari termici. Ad oggi alcune centinaia di grandi impianti solari termici asserviti alle industrie sono installati nel mondo e vengono utilizzati principalmente per il preriscaldamento dell'acqua di alimentazione nelle caldaie a vapore.

Per le applicazioni a medio/alta temperatura, che rappresentano una consistente quota del consumo termico dell'industria (circa il 70%) e che pertanto costituiscono un mercato molto vasto e di grande interesse per il solare a concentrazione termico (CST), non esistono soluzioni tecnologiche consolidate. Pur potendo garantire produzione affidabile e flessibile di calore, il solare a concentrazione deve infatti adattare la propria offerta tecnologica ad un mercato eterogeneo, con diverse temperature e modalità di funzionamento dei processi, differenti carichi termici e taglie di impianto; la sfida risiede, pertanto, nello sviluppo di tecnologie solari a concentrazione modulari, espandibili e integrabili, e nell'identificazione di specifiche strategie di gestione ed esercizio, al fine di assicurare stabilità di funzionamento del processo e ridotti costi operativi e di manutenzione.

Gli impianti solari a concentrazione attualmente realizzati per la fornitura di calore a medio/alta temperatura sono di carattere sperimentale o dimostrativo: ciò rende impossibile generalizzare un livello di posizionamento commerciale, a differenza della tecnologia del solare termico a bassa temperatura. Pertanto, al fine di presentare potenziali scenari applicativi della tecnologia solare a concentrazione per la fornitura di calore a medio/alta temperatura, nel presente lavoro vengono sviluppati originali schemi di integrazione tra le operazioni unitarie endotermiche di alcuni specifici settori industriali e le possibili configurazioni degli impianti solari asserviti, identificando potenziali combinazioni tra i diversi sottosistemi ed elementi di impianti CST (collettori solari, fluidi termovettori, unità di accumulo di energia termica, interfaccia con l'utenza industriale, ecc.). In particolare vengono considerati i seguenti processi endotermici, operativi nell'intervallo di temperatura 200-600 °C: ricottura (settore vetro), atomizzazione (settore ceramica), calcinazione (settore gesso), reforming e cracking (settore petrolchimico), deodorizzazione olii, cottura, maltazione (settore alimentare). Per ciascun processo industriale sono elaborati schemi concettuali di integrazione con il CST, esaminando le seguenti opzioni tecnologiche: sistemi lineari (parabolici o Fresnel) utilizzando i) olio diatermico come fluido termovettore per temperature medio-basse ii) miscele di sali fusi basso-fondenti per temperature medie, iii) miscele di sali fusi tipo "Solar Salt" per applicazioni ad alta temperatura. Inoltre, per ciascun processo industriale di interesse, vengono riportati i fabbisogni termici annuali e la taglia media degli impianti attualmente operativi. Nel caso in cui non sia stato possibile reperire direttamente tali dati, vengono fornite stime di massima, calcolate sulla base dei dati di produzione riportati dalle associazioni di settore e dei consumi termici specifici.

Tale panoramica non si configura come una analisi esaustiva dei possibili ambiti applicativi della tecnologia SHIP ma come uno studio introduttivo a potenziali soluzioni di integrazione tra tecnologia CST e processi industriali, che saranno oggetto di studi più dettagliati nella seconda annualità del PTR 2019-2021.

7 Riferimenti bibliografici

1. "Solar Payback - Solar Heat for Industry", 2017.
2. P. Kruppenacher, B. Muster, "Solar process heat for production and advanced applications: Methodologies and software tools for integrating solar heat into industrial processes", (2015).
3. G. N. Pardo, K. Vatopoulos, A. Krook-Riekkola, J. A. Moya Rivera, A. Perez Lopez, "Heat and cooling demand and market perspective", Publications Office of the European Union, (2012).
4. B. Schmitt, "Classification of Industrial Heat Consumers for Integration of Solar Heat", in *Energy Procedia*, (2016).
5. P. Horta, "Solar Process Heat: Available technologies, potential and applications", (2015).
6. R. Kempener, "Solar Heat for Industrial Processes - Technology Brief", (2015).
7. Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, TU Wien, TEP Energy, and IREES, "Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables)", (2016).
8. Fraunhofer ISI, TEP Energy, University Utrecht, ARMINES, "Baseline scenario of the heating and cooling demand in buildings and industry in the 14 MSs until 2050", (2017).
9. L. Kumar, M. Hasanuzzaman, N. A. Rahim, "Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review", *Energy Conversion and Management*, vol. 195 (2019), 885-908.
10. S. H. Farjana, N. Huda, M. A. P. Mahmud, and R. Saidur, "Solar process heat in industrial systems – A global review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2018).
11. A. K. Sharma, C. Sharma, S. C. Mullick, and T. C. Kandpal, "Solar industrial process heating: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2017).
12. F. Bazzocchi, M. Borgarello, M.E. Gobbi, C. N. Businge, A. Realini, C. Zagano, S. Maggiore, "L'efficienza energetica nell'industria: potenzialità di risparmio energetico e impatto sulle performance e sulla competitività delle imprese", (2018).
13. F. Bazzocchi, E. Gobbi, F. Lanati, C. Zagano, D. Bertani, "Le potenzialità di efficientamento energetico dei principali settori dell'industria : criticità ed opportunità", (2016).
14. ENEA, "Guida Operativa per il Settore di produzione del Cemento", (2014).
15. AITEC, "Relazione annuale 2016", vol. 2016 (2016), pp. 1–23.
16. C. Saunders and P. Hayes, "Air freight transport of fresh fruit and vegetables", (2007).
17. D. Santos, A.C. Maurício, V. Sencadas, J.D. Santos, M.H. Fernandes, P.S. Gomes, "Spray Drying: An Overview", *Biomaterials – Physics and Chemistry – New Edition*, (2011).
18. M.J. Blanco, L.R. Santigosa, "Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology", *Woodhead Publishing Series in Energy – Elsevier*, (2017), Amsterdam.
19. T. Crescenzi, M. Falchetta, A. Fontanella, E. Metelli, A. Miliozzi, F. Spinelli, L. Sipione, "Opportunità di applicazione delle tecnologie solari termodinamiche in Italia", *ENEA Servizio Promozione e Comunicazione*, (2016).
20. "CSP Project Around the World" (online), <https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world>.
21. N. El Gharbi, H. Derbal, S. Bouachaoui, S. Noureddine, "A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies", *Energy Procedia*, vol. 6, (2011), pp. 565-572.
22. IEA-ETSAP and IRENA, "Concentrating Solar Power Technology Brief", (2013).
23. NREL/SR-550-34440, "Assessment of Parabolic. Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts", (2003).
24. "Impianto Archimede" (online), <https://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/solare-termodinamico/impianto-archimede>.
25. "Archimede Solar Energy" (online), <http://www.archimedesolareenergy.com/>.
26. S. Sau, N. Corsaro, T. Crescenzi, C. D'Ottavi, R. Liberatore, S. Licocchia, V. Russo, P. Tarquini, A.C. Tizzoni, "Techno-economic comparison between CSP plants presenting two different heat transfer fluids", *Applied Energy*, vol. 168 (2016), 96-109.

27. R. Liberatore, A. Giaconia, G. Petroni, G. Caputo, C. Felici, E. Giovannini, M. Giorgetti, R. Branke, R. Mueller, M. Karl, T. Fluri, "Analysis of a procedure for direct charging and melting of solar salts in a 14 MWh thermal energy storage tank", AIP Conference Proceeding 2126 (2019), 200024.
28. "PTMx - The Parabolic Trough for a Wide Range of Applications" (online), <http://www.soltigua.com/ptmx-introduction/>.
29. M. Lanchi, M. Montecchi, T. Crescenzi, D. Mele, A. Miliozzi, V. Russo, D. Mazzei, M. Misceo, M. Falchetta, R. Mancini, "Investigation into the Coupling of Micro Gas Turbines with CSP Technology: OMSoP Project", Energy Procedia, vol. 69 (2015), pp. 1317–1326.
30. M. Günther, M. Eickhoff, T. Khalil, M. Meyer-Grünefeldt, "Advanced CSP Teaching Materials Chapter 6 Linear Fresnel Technology", (2011).
31. M. Liu M, N.H.S. Tay, S. Bell, M. Belusko, R. Jacob, G. Will, "Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 53 (2016), pp. 1411–1432.
32. W. Gaggioli, R. Liberatore, P. Di Ascenzi, D. Mazzei, V. Russo, "Experimental Test of Characterization of an Innovative Thermal Energy Storage System Based on Low Melting Molten Salt Thermocline Tank Integrated with an Oil Exchanger", Proceeding Solar Paces 1-4 October 2019, Daegu, South Korea.
33. R. Liberatore, M. Falchetta, W. Gaggioli, D. Mazzei, V. Russo, "Power production of an ORC System using a stratified molten salt as thermal energy storage integrated in a CSP plant", AIP Conference Proceedings 2126 (2019), 140003.
34. V. Russo, D. Mazzei, R. Liberatore, "Thermal energy storage with integrated heat exchangers using stratified molten salt system for 1 MWe CSP", AIP Conference Proceedings, vol. 2033 (2018), 090025.
35. A. Giaconia, F. Montagnino, F. Paredes, F. Donato, G. Caputo, D. Mazzei, "Co-generation and innovative heat storage systems in small-medium CSP plants for distributed energy production", AIP Conference Proceedings 1850 (2017).
36. I.B. Hassine, A. Helmke, S. Heß, P. Krummenacher, B. Muster, B. Schmitt, H. Schnitzer, "Solar Process Heat for Production and Advanced Applications: Integration Guideline - Guideline for solar planners, energy consultants and process engineers giving a general procedure to integrate solar heat into industrial processes by identifying and ranking suitable integration points and solar thermal system concepts", (2015).
37. "Miraah Solar Thermal Project" (online), <https://www.power-technology.com/projects/miraah-solar-thermal-project/>.
38. "Pampa Elvira Solar" (online), <https://ellaimasolar.cl/engpampaelvira>.
39. W. Weiss, M. Spörk-Dür, "Solar Heat Worldwide - Global Market Development and Trends in 2018", (2019).
40. "Solar Thermal Plants Database" (online), <http://ship-plants.info/solar-thermal-plants>.
41. "Float glass" (online), <https://kb.q-windows.com/kb/float-glass>.
42. "Assovetro - Dati di settore" (online), <https://www.assovetro.it/dati-di-settore/>.
43. "Il 2017 dell'industria ceramica" (online), <http://www.confindustriaceramica.it/site/home/eventi/articolo8870.html>.
44. A. De Luca, "Valutazione dell'utilizzo di fluidi gassosi in impianti solari termodinamici", Report RdS/2013/078, (2014).
45. A. De Luca, T. Crescenzi, "Definizione delle principali caratteristiche di un impianto solare alimentato con aria compressa e accumulo termico con materiale ceramico", Report RdS/PAR2014/112, (2015).
46. "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, (2002).
47. "Pfeiffer products for gypsum processing" (online), <https://www.gebr-pfeiffer.com/>.
48. A. Giaconia, L. Turchetti, G. Monteleone, B. Morico, G. Iaquaniello, K. Shabtai, M. Sheintuch, D. Boettge, J. Adler, V. Palma, S. Voutetakis, A. Lemonidou, M.C. Annesini, M.D. Exter, H. Balzer, "Development of a solar-powered, fuel-flexible compact steam reformer: The CoMETHy project", Chemical Engineering Transactions, vol. 35 (2013), pp. 433-438.

49. Unione Petrolifera, "Relazione annuale 2018".
50. M. Della Pietra, S.J. McPhall, "Hydrogen Production and Logistics", (2018).
51. C. Giavarini, A. Girelli, "La raffinazione del petrolio – chimica e tecnologia", (1990), Edizione ESA, S. Donato Milanese (MI).
52. Enciclopedia Treccani (www.treccani.it).
53. ENI, "Attività - Raffinazione" (online), <https://report.eni.com/factbook-2013/it/i-settori/refining-marketing/attivita-raffinazione.html>.
54. E. Mariani, "Chimica applicata e industriale: 3", UTET, (1983).
55. ASSITOL - Associazione Italiana dell'Industria Olearia, "Assemblea generale", (2019).
56. "MIWE thermo-rollomat" (online), <http://miwe.de>.
57. "Tecnologia di cottura" (online), <https://kaakgroup.com/products/baking-technology/>.
58. A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, D. Mazzei, R. Liberatore, T. Crescenzi, D. Mele, "Dispositivo di accumulo termico, sistema modulare incorporante il dispositivo e relativo metodo di realizzazione", Domanda Brevetto n. 102017000129902 (2017).
59. A. Miliozzi, R. Liberatore, G.M. Giannuzzi, E. Veca, D. Nicolini, M. Lanchi, M. Chieruzzi, "ENEA research and innovation on Thermal Energy Storage for CSP plants", 16th CIRIAF National Congress, 7-9th April 2016, Assisi (Italy).
60. ANSA, "Mercato Pane in Italia anno 2018" (online), https://www.ansa.it/canale_terraegusto/notizie/dolce_e_salato/2019/01/21/fresco-e-artigianale-l85-del-pane-consumato-in-italia_7b165f17-a285-4e6b-ba8c-b569177379f1.html
61. AssoBirra - Associazione dei Birrai e dei Maltatori, "Annual Report 2018".
62. A. Fontanella, M. Falchetta, A. Giaconia, E. Metelli, and A. Miliozzi, "Produzione di calore industriale con impianti solari a concentrazione," 2017.

8 Appendice: casi applicativi di integrazione a bassa temperatura

In Italia sono già esistenti esempi applicativi di fornitura del calore solare all'industria, limitati però alla bassa temperatura. Il calore solare è prodotto principalmente da impianti utilizzando collettori piani e tubi sottovuoto. Meno comuni sono i sistemi a concentrazione, e tra questi è interessante menzionare l'impianto a collettori Fresnel installato presso un caseificio sardo a produzione tradizionale.

L'impianto è stato realizzato da CSP-F Solar (www.cspfsolar.it) a servizio dell'azienda Nuova Sarda Industria Casearia di San Nicolò d'Arcidano, (Oristano). L'impianto, operativo dal 2015, produce calore per le lavorazioni dei formaggi, il raffrescamento e la generazione di energia elettrica. La superficie captante dei collettori è pari a circa 1000 m², per una potenza termica di 470 kW. L'impianto, producendo vapore a 12 bar e 200 °C per una produzione di circa 500 MWh termici l'anno, copre il 35% dei consumi dello stabilimento. Il risparmio annuo di oltre 50 mila litri di gasolio riduce sensibilmente le emissioni di CO₂ del caseificio (-180 tonnellate di CO₂).

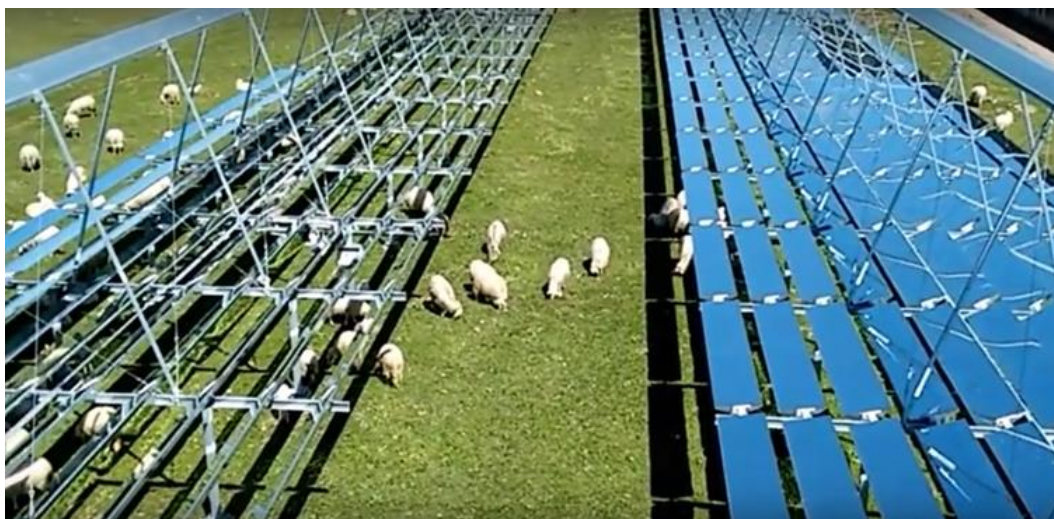


Figura 46: Impianto CSP-F Solar [62].

Estendendo l'analisi a livello globale, di seguito si riporta una panoramica degli impianti solari asserviti alla fornitura di calore a bassa temperatura, distinti in base al settore industriale di pertinenza [30]. Per ogni impianto vengono indicati: la tipologia di collettore impiegato, il fluido termovettore utilizzato, l'operazione unitaria alimentata dal calore solare, il punto di integrazione tra l'impianto solare e il processo produttivo, le temperature di processo e quelle dell'impianto solare. Per le modalità di integrazione di seguito indicate si farà riferimento allo schema e alla classificazione riportate in Figura 14. È importante evidenziare che in alcuni casi applicativi riportati nelle Tabelle seguenti, la temperatura operativa degli impianti solari risulta inferiore alle temperature di processo; ciò dipende dal fatto che talvolta la fornitura di calore solare è di tipo parziale ed è finalizzata al preriscaldamento dei fluidi di processo o dei fluidi di servizio.

Industria automobilistica

Le industrie automobilistiche consumano una grande quantità di energia, sia sotto forma di elettricità, sia di calore, ottenuto principalmente da gas naturale e altri combustibili. Attualmente il Sudafrica, l'India e la Spagna stanno alimentando in maniera significativa i processi di produzione del settore automobilistico con calore solare. I principali processi endotermici in questo settore sono il riscaldamento dell'acqua utilizzata per l'applicazione della vernice, il lavaggio dei componenti del motore nell'unità di produzione automobilistica, la linea di pretrattamento delle carrozzerie e la preparazione della superficie della carrozzeria. In questo ambito vengono utilizzati diversi tipi di collettore solare, con una temperatura massima di 120 °C. In Tabella 24 vengono presentate le industrie automobilistiche in cui viene impiegato il calore solare di processo con le relative specifiche di impianto.

Tabella 24. Calore di processo per industrie automobilistiche [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Germania	Solar Process Heat for Car Paintshop	Fresnel	Acqua	Essiccazione della vernice nell'industria automobilistica	A2a	200-220	180
India	Mahindra Vehicle Manufacturers	Altro	---	Lavaggio dei componenti del motore nell'unità di produzione automobilistica	B2	---	120
Messico	BOCAR GROUP	Piano	Acqua	Preriscaldamento	A1	50-70	45-75
Spagna	FASA Valladolid	Piano	---	L'energia solare termica viene utilizzata nella preparazione della superficie della lamiera della carrozzeria per il processo di saldatura e prima della verniciatura	B1	50	---
Sud Africa	BMW Manufacturing	A tubo evacuato	Acqua	Acqua calda usata nel processo di applicazione della vernice	B2	90	---

Industria della birra

Nell'industria della birra, il solare termico può essere utilizzato per processi quali: generazione di vapore, maltazione, interruzione della germinazione dei cereali, raffreddamento ad aria, conservazione con aria calda, processi di appassimento e di cottura. Gli impianti di maltazione e le birrerie richiedono tipicamente calore a temperature comprese tra i 25 e i 120 °C. Diversi Paesi europei, la Cina, il Sudafrica e gli Stati Uniti stanno ricorrendo all'utilizzo del calore solare per alimentare termicamente i processi endotermici nei birrifici, quali lavaggio e pulizia (a temperature massime di 120 °C), preriscaldamento delle bottiglie (a temperatura massima di 60 °C), pastorizzazione, sterilizzazione e altre applicazioni elencate in Tabella 25.

Tabella 25. Calore di processo per birrifici e per industrie di bevande [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Austria	Goess Brewery	Piano	Acqua/ Glicole	Processo di schiacciamento	B1	80-90	---
Austria	Gangl Fruit Juices	Piano	Acqua	Pulizia bottiglie, pastorizzazione	C	95-105	75
Austria	Metbrauerei Neuwirth	Piano	Acqua	Lavaggio bottiglie, pastorizzazione, sterilizzazione	C	50-95	50-95
Austria	Neuwirth	Piano	Acqua/ Glicole	Acqua calda per la pulizia, pastorizzazione, sterilizzazione	---	50-95	---
Austria	Peitler Vineyard	Piano	Acqua/ Glicole	Raffreddamento vino bianco / raffreddamento vino rosso / lavaggio bottiglie	C	15-18 / 22-25 / 60	20-90
Francia	Bourdouil	Piano	Acqua/ Glicole	Pulizia delle bottiglie con acqua di rubinetto	C	15-70	---
	GICB Wine Cellars	A tubo evacuato	Acqua/ Glicole	Raffreddamento della cantina (refrigeratore ad assorbimento capacità 52 kw)	C	70-95	70-95
Germania	Brauerei Hald	Piano	Acqua/ Glicole	Pulizia e preriscaldamento termico delle bottiglie	A3	60-70	40-120
	Brewery Hald DOPPELT Hofmühl Brewery	Piano A tubo evacuato	Acqua/ Glicole Acqua	Lavaggio e preparazione termica delle bottiglie, prima del riempimento Lavaggio bottiglie / acqua per la produzione di birra e uso domestico / per il riscaldamento degli ambienti e lo sbrinamento	B3 C	60-90 90 / 60-90 / 45	60-120 20-110
	Hütt Brewery	Piano	Acqua/ Glicole	Riscaldamento acqua per produzione di birra	B2	40-90	fino a 95
	Neumarkter Lammsbräu	Ad aria	Aria	Preriscaldamento aria ambiente per il processo di asciugatura nella malteria	B2	fino 60	---
Grecia	Achaia Clauss S.A.	Piano	Acqua	Lavaggio bottiglie in cantina	A3	45-60	37-51
Messico	BEVCO, S. DE R.L. DE C.V.	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A2b	20-90	---
	Casa Armando Guillermo Prieto S.A de C.V.	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A2b	21-90	---
	Casa Cuervo S.A de C.V.	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A2b	30-90	---
	Destilería 501 S.A de C.V	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A2b	19-99	---
	GATORADE MEXICO	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	A1	60-70	50-75
	KOF MIXCOAC	Piano	NA	Riscaldamento acqua di reintegro	A1	50-70	50-85
	KOF TLANEPANTLA	Piano	Acqua	Riscaldamento acqua di reintegro	A1	50-75	50-85
Portogallo	Maltiberica - Grupo Unicer	Piano	Acqua/aria	Preriscaldamento aria per l'essiccazione del malto	C	20-80	20-80
Stati Uniti	Gatorade	Piano	Acqua/ Glicole	Preriscaldamento acqua per produzione di soft drink	A3	MAX 35	---
Tunisia	Winery Grombalia	Fresnel	Acqua in pressione	Raffreddamento solare mediante l'alimentazione di un refrigeratore ad assorbimento di acqua ammoniacale	B1	-10 / 7	110-160

Industria alimentare

L'industria alimentare attualmente rappresenta il settore industriale dominante in termini di utilizzo del calore solare per l'alimentazione termica dei processi endotermici, con svariati esempi applicativi in Europa, Nord America, Sud America e Asia. Le operazioni di processo più comunemente alimentate da calore solare sono il riscaldamento dell'acqua, la pastorizzazione, la pulizia, il preriscaldamento, l'essiccazione e la cottura. Per tali applicazioni vengono utilizzati generalmente i collettori solari a piastra piana e, più raramente, i collettori parabolici lineari, come evidenziato in Tabella 26.

Tabella 26. Calore di processo per industrie alimentari [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Austria	Fleischwaren Berger	Piano	---	L'energia termica prodotta viene utilizzata per il preriscaldamento dell'acqua di alimentazione per la produzione di vapore per la cottura del prosciutto	A1	30-95	---
Austria	Krispl Fruit Juice	Piano	---	Pastorizzatore di frutta, lavaggio casse, climatizzazione degli spazi	B1	80	---
Canada	Laiterie Chagnon SHIP	Parabolico lineare	Olio diatermico	Preriscaldamento caldaia	A1	80-90	---
Cina	FengLi Fruit Drying	Ad aria	Aria	Riscaldamento aria per essiccazione frutta	C	50-70	50-70
Cina	Meihao Food Processing	A tubo evacuato	---	Sterilizzazione con acqua calda a 80 °C	C	---	80
Costa Rica	Coopeldos	Ad aria	Aria	Essiccazione del caffè	B1	40-45	40-45
Francia	Bonilait Dairy	Piano	Acqua/Glicole	Processi di pulizia	B2 & B3	80	---
Germania	Edmund Merl - Gourmet Foods	Piano	Acqua	Risciacquo e pulizia degli impianti di bottiglie	B2	60	20-60
Grecia	Alpino S.A.	Piano	Acqua/Glicole	Riscaldamento acqua calda in caldaia a vapore	A3	20-70	---
Grecia	Alpino S.A. (2)	Piano	---	Acqua calda per attrezzature di pulizia e preriscaldamento acqua alimentazione caldaia	---	20-130	---
Grecia	Mandrekas S.A.	Piano	Acqua	Conservazione della temperatura di stagionatura dello yogurt	A3	40-45	---
Grecia	Mandrekas S.A. (2)	Piano	Acqua	Acqua calda per la produzione di yogurt	---	15-66	23-65
Grecia	Mevgal S.A.	Piano	Acqua/Glicole	Acqua calda per attrezzature di pulizia e preriscaldamento acqua alimentazione caldaia	B3	216 / 108	20-90
Grecia	Plektemboriki Kritis S.A.	Piano	Acqua	Pulizia olive	C	40-90	---
Grecia	Tyras S.A.	Piano	Acqua/Glicole	Lavaggio di cisterne e camion	C	20-80	---
Honduras	AGROLIBANO	Piano	Acqua	---	A1	60-70	50-80
India	B.G. Chitale	Altro	---	Pastorizzazione del latte	B1	---	150
India	Dausa Milk	Piano	---	Lavaggio dei serbatoi del latte e delle lattine	B1	75-85	---
India	Indian Institute of Horticulture	Altro	---	Pastorizzazione della paglia	C	---	85-100
India	Kaveri Agri-Care Pvt. Ltd.	Ad aria	Aria	Essiccazione "coir peat"	B1	105	---
India	Mahananda Dairy	Altro	---	Pastorizzazione del latte	C	---	120
India	Mother Dairy	Disco parabolico	---	Pulizia sul posto del caseificio	B2	70-90	---
India	Parle Products Ltd. Neemrana	Piano evacuato	---	Acqua per il miscelatore del serbatoio con lo sciroppo	B3	70-75	---
India	Salem District Cooperative Milk Producers Union	Disco Arun	---	Riscaldamento acqua di alimentazione caldaia	A2a	95	---
Indonesia	Malabar Tea Drying	Ad aria	ARIA	Essiccazione del tè	C	35	---
Israele	1 Of Tov Hatching Farm	Piano	Acqua/Glicole	Riscaldamento del corpo di accumulo della lavatrice di processo tramite scambiatore di calore	B3	65	fino a 100
Israele	Golan Winery	Piano	Acqua/Glicole	Lavaggio fusti	A2b	85	fino a 95
Italia	Nuova Sarda Industria Casearia	Fresnel	Vapore	Vapore a 200 °C e 12 bar, direttamente utilizzato nel circuito vapore dello stabilimento per produzione di formaggio, senza immagazzinamento	A2b	---	200
Malesia	Poultry Processing Malaysia PPNJ	Evacuato	Acqua	Processo di scottatura	B1	70-75	80-90
Marocco	COPAG	Parabolico lineare	Olio diatermico	Preriscaldamento caldaia	A1	80-90	---
Messico	Agrana Fruit	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A1	25-118	---
Messico	Agropecuaria Tarasca S. de P.R. de R.L.	Parabolico lineare	Acqua	Pelletizzazione di uccelli	A2b	25-95	---
Messico	Alimentos y Productos para Ganado Lechero	Parabolico lineare	Acqua	Riscaldamento acqua	A1	60	20-60
Messico	BARCEL	Piano	Acqua	Preriscaldamento della produzione di vapore	A1	60-70	55-75

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Messico	BONAPRIME SLAUGHTERHOU SE	Piano	Acqua	Preriscaldamento acqua calda	A1	65-70	65-85
Messico	Barcel S.A DE C.V.	Parabolico lineare	Olio diatermico	Riscaldamento olio vegetale	B2	35-164	30-200
Messico	CARNES LA LAGUNA SLAUGHTERHOU SE	Evacuato	Acqua	Pulizia del macello	A1	65-80	55-85
Messico	CARNES MUMA	Evacuato	Acqua	- - -	A1	60-80	50-90
Messico	CARNES SELECTAS DE MEXICO DE CV	Piano	Acqua/ Glicole	Preriscaldamento di acqua calda	A1	55-85	50-90
Messico	COMFOSA, S.A de C.V.	Parabolico lineare	Acqua	- - -	A2b	20-94	- - -
Messico	Canelas S.A. de C.V.	Parabolico lineare	Acqua	Preparazione di gomme masticanti	C	25-80	- - -
Messico	Carnes Selectas de Sonora S.A. de C.V.	Parabolico lineare	Acqua	Attrezzatura di pulizia	A2b	20-70	- - -
Messico	Centro Lechero Cooperativo de los Altos SCL	Parabolico lineare	Acqua	Attrezzatura di pulizia	A2b	19-92	- - -
Messico	Conservas del Norte S.A de C.V.	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A1	25-95	- - -
Messico	Durango Dairy Company	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A1	20-95	- - -
Messico	Enfriadora Jaliciense S.A. de C.V.	Parabolico lineare	Acqua	Produzione di formaggio	A2b	19-92	- - -
Messico	GAMESA- QUAKER PEPSICO MEXICO	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	A3	60-70	50-75
Messico	GRUPO BIMBO	Piano	Acqua	Preriscaldamento di produzione di vapore	A3	60-80	55-85
Messico	Grupo Mirasol de Occidente SA de CV	Parabolico lineare	Acqua	- - -	A1	21-95	- - -
Messico	Grupo Mosa la Luz SA de CV	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A1	55-110	- - -
Messico	IMATEC TORTILLA DOUGH FACTORY	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	B1	65-85	55-90
Messico	INDUSTRIA DEL MAIZ	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua per cottura	B1	65-80	65-85
Messico	INDUSTRIAS CRICOTL	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	B1	55-85	50-90
Messico	La Trinidad	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A1	90	20-90
Messico	Lacto Productos El Indio	Parabolico lineare	Acqua	Riscaldamento di processo	A1	- - -	20-95
Messico	Lácteos Mojica	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A1	20-95	- - -
Messico	MARINELA CDMX	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	A1	60-70	55-75
Messico	Matatlan Dairy	Parabolico lineare	Acqua	Integrazione nel preriscaldamento dell'acqua di reintegro	B3	- - -	18,5-100
Messico	NESTLE CHIAPAS	Piano	Acqua	Preriscaldamento della produzione di vapore	A3	90	65-85
Messico	NESTLE DAIRY PLANT CHAPA DE CORZO	Parabolico lineare	Acqua	Riscaldamento acqua	A3	90	80-95
Messico	NESTLE DAIRY PLANT LAGOS DE MORENO	Parabolico lineare	Acqua	Riscaldamento acqua	A3	90	80-95
Messico	NESTLE. TOLUCA	Non vetrato	Acqua	Preriscaldamento della produzione di vapore	A1	37	40-45
Messico	Nutrición Marina	Parabolico lineare	Acqua	Impianto di pellet alimentare	A1	- - -	40-95
Messico	PROCARNE SLAUGHTERHOU SE "A"	Piano	Acqua	Pulizia del macello	A1	65-75	60-80
Messico	PROCARNE SLAUGHTERHOU SE "B"	Piano evacuato	Acqua	- - -	A1	65-80	55-90

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Messico	Procesadora de Alimentos Integrales - PAISA	Parabolico lineare	Acqua	Riscaldamento acqua di reintegro	A1	95	80-95
Messico	Quesera Lacteos Ticoy, S.A. de C.V	Parabolico lineare	Acqua	Pastorizzazione del gelato	A2b	20-95	---
Messico	Quesos La Doñita	Parabolico lineare	Acqua	Pastorizzazione	B1	---	60-95
Messico	Quesos la Ordeña	Parabolico lineare	Acqua	Preriscaldamento caldaia	A1	20-80	---
Messico	Rastro Garibay	Parabolico lineare	Acqua	Scottatura, depilazione e lavaggio del bestiame	A2b	18-95	---
Messico	SAN PABLO VILLA TORTILLA DOUGH FACTORY	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	B1	70-85	70-90
Messico	SANA INTERNACIONAL	Piano	Acqua	---	A1	55-75	50-80
Messico	SANTA ANITA DAIRY	Piano evacuato	Acqua	---	A1	60-70	50-80
Messico	SUKARNE SLAUGHTERHOUSE	Evacuato	Acqua	Pulizia	A3	70-80	60-90
Messico	Solar Pasteurization (Lechera Guadalajara SELLO ROJO)	Parabolico lineare	Acqua	Sullo scambiatore di calore della pastorizzazione	B2	85	70-95
Messico	ZACATECAS TERMOSOLAR DRYING PLANT - AIR COLLECTORS	Ad aria	Aria	Essiccazione di prodotti agricoli	B1	55-120	55-130
Panama	Duran Coffee	Ad aria	Aria	Essiccazione del caffè	B1	40-45	---
Portogallo	Knorr Best Foods S.A.	Piano	Acqua/Glicole	Acqua calda per il lavaggio degli utensili	C	40-45	---
Repubblica Ceca	PETA Bohemia Pekárna Sobeslav	Piano	Acqua	Acqua calda per pasticceria	C	---	10-90
Spagna	Industria Alimnetaria Alcoyana	Piano	Acqua	Preriscaldamento acqua alimentazione caldaia usata per preparazione olive	A1	40-130	50-60
Spagna	Metadero Montesierra	Piano	Acqua	Preriscaldamento acqua di alimentazione della caldaia da utilizzare per la pulizia e la sterilizzazione	C	50-60	---
Spagna	Montesano - Canary Islands	Piano	Acqua	Acqua calda usata per lavaggio derivati della carne	C	40-60	---
Spagna	Montesano - Jerez de los Caballero	Piano	---	Lavaggio al ricevimento del prodotto grezzo, trattamenti sul prodotto, lavaggio finale del prodotto e pulizia di recipienti e macchinari	C	40-45	---
Spagna	Papes Safor S.L.	Parabolico lineare	Olio diatermico	Preriscaldamento caldaia	A2b	200-250	---
Spagna	TE-PE S.A.	Piano	Acqua	Preriscaldamento acqua di alimentazione della caldaia utilizzata per la preparazione delle olive	C	40-130	50-60
Stati Uniti	Carriers & Sons	Ad aria	Aria	Essiccazione di noci	B1	max 43	---
Stati Uniti	Frito Lay	Parabolico lineare	Vapore	Vapore per riscaldare l'olio per friggere le patatine fritte	C	---	243
Stati Uniti	Keyawa Orchards	Ad aria	Aria	Essiccazione di noci	B1	max 43	---
Stati Uniti	Prestage Foods	Piano	Acqua/Glicole	Acqua calda per i servizi igienico-sanitari nell'industria avicola	B2	min 60	71-82
Stati Uniti	Sunsweet Dryers	Ad aria	Aria	Essiccazione di prugne	B1	10-15	---
Svizzera	Crema SA	Parabolico lineare	Acqua	Lavorazione del latte / Produzione crema di caffè	A2b	150/110	170/125
Svizzera	Emmi Dairy Saignelégier	Parabolico lineare	Acqua/Glicole	Vapore per diversi processi nel caseificio	A3	---	140-180

Industria della carta

L'industria cartaria indiana copre circa il 2.6% della produzione totale di carta nel mondo. Il 75% dell'energia totale utilizzata nell'industria cartaria è essenzialmente destinata ad alimentare termicamente, a basse e medie temperature, processi come il candeggio e il lavaggio con acqua calda, la spappolatura, l'asciugatura e il riscaldamento dell'acqua di alimentazione della caldaia. In Tabella 27 vengono riportati esempi applicativi in questo settore.

Tabella 27. Calore di processo nell'industria della carta [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Canada	Parc Solaire Alain Lemaire	Parabolico lineare	Olio diatermico	Preriscaldamento caldaia a vapore	A2a	120-140	---
India	B.S. Paper Mill	Altro	---	Per diverse applicazioni di processo in cartiera	C	---	90-98

Industria farmaceutica

L'industria farmaceutica è caratterizzata da un notevole consumo di energia termica per la produzione di prodotti intermedi e finali, con una temperatura massima di processo compresa tra i 160 e i 180 °C. Attualmente sono comunque pochi i paesi che ricorrono alla tecnologia solare per la fornitura di calore di processo, come l'Egitto e la Grecia (generazione di vapore di processo), l'India e il Messico (applicazioni a più bassa temperatura, vedi Tabella 28).

Tabella 28. Calore di processo per industrie farmaceutiche [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Egitto	El NASR Pharmaceutical	Parabolico lineare	Vapore (8 bar)	Produzione di vapore di processo per azienda farmaceutica	C	---	173
Giordania	RAM Pharma	Fresnel	Vapore	Processo di produzione farmaceutica	A2b	160-165	204
Grecia	Sarantis S.A.	Piano	Acqua/ Glicole	---	C	7-45	---
India	Unique Biotech	Altro	Olio diatermico	Acqua calda utilizzata per riscaldare i reattori per reazioni chimiche	C	95	180
Messico	Biotecnología Mexicana de Microalgas S.A. de C.V.	Parabolico lineare	Acqua	Trattamento acqua	B1	---	55-75
	GLAXO SMITHKLINE MEXICO	Piano	Acqua	Riscaldamento per produzione di emulsioni	A3	70-80	50-85
	LAVIN INDUSTRIES	Piano	Acqua	Produzione diretta di emulsioni	B1	60-75	60-90
	LIOMONT LABORATORIES	Piano	Acqua/ Glicole	Preriscaldamento di acqua calda	A1	60-80	50-90
	L'OREAL MEXICO	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	A1	55-75	50-80

Industria tessile

L'industria tessile richiede un approvvigionamento continuo di acqua, principalmente per il processo di candeggio. Il consumo di acqua calda, tipicamente a temperature fino a 80 °C, comporta un notevole consumo di energia termica, ottenuta da fonti energetiche convenzionali. Il riscaldamento dell'acqua mediante il calore solare è pertanto una rilevante misura di contrasto alle emissioni di gas serra. Tra i paesi che hanno promosso l'utilizzo del calore solare nei processi produttivi dell'industria tessile, si possono menzionare la Grecia, la Cina e l'India, come riportato in Tabella 29.

Tabella 29. Calore di processo per le industrie tessili [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Cina	Daly Textile	Piano	Acqua	Riscaldamento acqua per processo di sbiancamento	C	20-60 (55)	55
Cina	Jiangsu Printing And Dyeing	A tubo evacuato	---	Preriscaldamento solare per il processo di stampa e tintura	C	50	---
Cina	Ruyi Textile	Piano evacuato	Acqua	Calore solare per il processo di tintura a 60 °C e per le docce dei lavoratori	B2	60	---
Germania	Meiser Textil	Parabolico lineare	---	---	C	---	max 140
Giordania	Jordache Jeans Factory	A tubo evacuato	Acqua	Acqua calda e vapore per il lavaggio e il candeggio dei tessuti jeans	C	60	---
Grecia	Allegro S.A. Children's Clothing Manufacturer	Piano	Acqua/Glicole	Acqua calda per le lavatrici per vestiario bambini	C	33-60	---
Grecia	Kastrinogiannis S.A.	Piano	Acqua	Acqua calda direttamente per le tintorie e acqua calda per alimentare la caldaia	C	40-90	27-63
India	Purple Creation DOPPELT	Altro	---	Lavaggio e stiratura di capi di abbigliamento	C	---	150-160
India	Purple Creations	Altro	---	Stirare gli indumenti per bambini - pressatura e lavaggio a vapore	A2b	---	150 - 6 bar
India	Sharman Shawls	Piano	Acqua	Fabbisogno di acqua calda per la tintura, il candeggio e il lavaggio degli indumenti	A1	> 100	60-80
India	Siddharth Surgicals	Parabolico lineare	---	Pulizia e candeggio	B1	110	---
India	Tamil Nadu - Textile Industry	Fresnel	---	Caldaia a vapore a combustione indiretta che si aggiunge alla caldaia a vapore esistente	A2b	100-135	---
Messico	GUETERMANN POLYGAL	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	A1	55-85	50-90
Portogallo	Beiralã	Piano selettivo, CPC	Acqua	Riscaldamento acqua per differenti fasi di produzione tessile	C	20-120	20-80

Lavorazione di minerali

L'applicazione del calore solare per la lavorazione dei minerali può essere particolarmente conveniente in zone minerarie remote, dove i costi di approvvigionamento del carburante sono molto più significativi che nelle aree urbane. In Sudafrica, Cile, Austria e Germania, paesi con rilevanti risorse minerarie, gli impianti per il calore solare di processo sono già presenti e integrati nelle miniere, principalmente per operazioni di pulizia, estrazione e riscaldamento dell'acqua. Altri tipici processi endotermici del settore minerario sono la raffinazione elettrolitica del rame, il bagno di nichel, e lo sgrassamento dei prodotti chimici (Tabella 30). Il settore minerario presenta ancora enormi potenzialità di applicazione della tecnologia SHIP, soprattutto a media ed alta temperatura.

Tabella 30. Calore di processo per industrie minerarie [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Austria	Gillich Galavanic	Tubo evacuato	Acqua	Sgrassaggio e rimozione della vernice da parti metalliche in bagno	C	---	75
Austria	Körner KvK	Piano	Acqua/ Glicole/ Aria	Preriscaldamento, essiccazione	C	80 / 50	50-80
Cile	Codelco Gabriela Mistral	Piano	---	Processo di raffinazione elettrolitica	B1	50	---
Cipro	Hellenic Copper Mines	Piano	Acqua	Processo di estrazione industriale	B2	20-55	---
Germania	Hustert Galvanic	Tubo evacuato	Acqua	Riscaldamento di bagni termici per elettrodeposizione galvanica	A2b	80	90
	Schiffer GmbH & Co KG	Piano evacuato	Acqua	Acqua calda per bagni galvanici	C	40-70	30-70
	Steinbach und Vollmann	Piano evacuato	Acqua	Acqua calda per bagni galvanici	C	60-80	30-80
Messico	MINERA EL ROB PEÑALES	Piano	Acqua/ Glicole	Preriscaldamento di acqua calda	A1	60-80	55-85
Messico	PEÑALES TOTOLAPAN I	Piano	Acqua	Preriscaldamento della produzione di vapore	A1	60-70	50-75
Messico	PEÑALES TOTOLAPAN II	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	A1	65-75	60-80
Messico	PEÑALES TOTOLAPAN III	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	A1	65-85	60-90
Sud Africa	BHP Billiton Wolwekrans Colliery	Piano	---	Impianto minerario, lavanderia, doccia	B1	60	---
Sud Africa	Northam Platinum's Booyssendal Mine	Piano	Acqua/ Glicole	Impianto di estrazione, lavanderia, doccia	B1	60	---
Sud Africa	Xstrata Elands Mine	Piano evacuato	Acqua/ Glicole	Impianto minerario, lavanderia, doccia	B1	60	---

Industria chimica

Esistono diversi processi dell'industria chimica che richiedono calore ad un livello di temperatura relativamente basso e che sono già parzialmente alimentati da fonte solare, come il riscaldamento dell'acqua, il riscaldamento a vapore dei reagenti e dei prodotti, l'essiccazione, le operazioni di pulizia, con temperature massime di circa 150-200 °C. In Tabella 31 vengono riportate le industrie chimiche attualmente alimentate con impianti solari termici/a concentrazione.

Tabella 31. Calore di processo di industrie chimiche [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Austria	MAPAG	Piano	Acqua	Pulizia di campioni per laboratorio di analisi	C	60	60
Cina	Solar steam boiler for Procter & Gamble (Tianjin)	Parabolico lineare	Olio diatermico	Generazione di vapore	A2b	130	160
Egitto	Pachin Paints Co.	Piano	Acqua	Riscaldamento di prodotti chimici	C	50	50
India	L'Oreal Pune	Piano	Acqua	Acqua calda per processi di pulizia	B1	55	---
	Ultramarine Pigments	Altro	Olio diatermico	Essiccazione dei pigmenti	B2	140	200
Messico	BASF MEXICO	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	A1	60-70	60-80
	DIVERSEY TLANEPANTLA	Non vetrato	Acqua	---	B1	40-47	35-50
	MEXLUB	Piano	Acqua	Preriscaldamento di acqua calda	A1	60-75	55-80

Settore agricolo

Il calore solare è ampiamente utilizzato nel settore dell'agricoltura e della pesca in diversi paesi, principalmente per l'essiccazione dei prodotti agricoli e per il riscaldamento dell'acqua. In Tabella 32 vengono sinteticamente riportati i principali esempi applicativi.

Tabella 32. Calore di processo nel settore agricolo [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Germania	Krimmer	Piano	Acqua/ Glicole	Essiccazione di semi di fiori selvatici	C	35	20-35
India	AMR Dal mill	Ad aria	Aria	---	B2	65-75	75-80 max 110
Messico	BERMEJILLO CHAPIN	Piano	Acqua/ Glicole	Preriscaldamento di acqua	A1	60-75	60-80
Messico	Buenavista Greenhouse	Parabolico lineare	Acqua/ Glicole	Riscaldamento spazi	B3	---	20-80
Messico	ZACATECAS TERMOSOLAR DRYING PLANT - FLATE PLATE	Piano	Acqua/ Glicole	Disidratare i prodotti agricoli	A2b	70-85	50-85
Spagna	Acuinova Andalucia S.A.	Piano	Acqua	Riscaldamento acqua per allevamento ittico	C	23-26	20-40

Industria delle pelli

Diversi paesi asiatici come la Thailandia, la Cina, e l'India hanno introdotto la tecnologia solare termica nella produzione di manufatti in pelle. Il fabbisogno termico dell'industria delle pelli riguarda principalmente il processo di concia e il riscaldamento dell'acqua per le operazioni di lavaggio e pulizia. Il collettore a tubi evacuati è particolarmente adatto per questo tipo di operazioni. In Tabella 33 vengono elencate le principali industrie operanti nel settore in cui viene impiegato il calore solare di processo.

Tabella 33. Calore di processo per la produzione di prodotti in pelle [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Cina	Heshan Bestway Leather	Tubo evacuato	Acqua	Calore solare per il processo di concia	B2	70	---
Giordania	Albert Tannery	Tubo evacuato	---	Acqua calda per la concia della pelle	---	80	---
Grecia	Tripou - Katsouris Leather Treatment Factory	Piano	Acqua	Trattamento della pelle	A1	48-84	35-81
Thailandia	Ayutthaya tannery	Tubo evacuato	Acqua	Riscaldamento solare per il processo di concia	B2	80	---
Vietnam	Saigon Tantec	Piano evacuato	Acqua	Calore solare per il processo di concia	B2	70	---

Industria metallurgica

Nell'industria metallurgica il calore solare viene attualmente utilizzato per il riscaldamento dell'acqua, per l'essiccazione e per le operazioni di pulizia, con una temperatura massima di 180 °C. In Tabella 34 vengono elencate le principali industrie metallurgiche che utilizzano il calore solare, con le relative specifiche di processo.

Tabella 34. Calore di processo per industrie metallurgiche [40].

Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
						Processo	Solare
Austria	Julius Blum	Tubo evacuato	Acqua	Riscaldamento dei lavabi di pretrattamento del dispositivo di rivestimento	A3	60-85	---
Francia	Viessmann, Faulquemont	Piano evacuato	Acqua/Glicole	Riscaldamento di un bagno di pulizia alcalino	C	fino a 60	90
Germania	Alanod Solar	Parabolico lineare	---	Produzione di vapore saturo	A2b	143 - 4 bar	---
Germania	Solar cooling for stainless steel pipe industry	Fresnel	Acqua	Processo di raffreddamento di tubi in acciaio inox e edificio per uffici	B1	6-32	200
India	SKF Technologies Mysore	Parabolico lineare	Acqua in pressione	Riscaldamento acqua per la circolazione attraverso le vasche di trattamento dell'impianto di fosfatazione	B1	95	30 (max 210)
Messico	INDUSTRIAS VERONA GALVANOPLASTY	Piano	Acqua	Processo di galvanoplastica	B1	70-85	60-90
Portogallo	SILAMPOS, S. A.	Parabolico lineare	Olio termico	Lavaggio e asciugatura del prodotto finito	B1	50-60 / 120-160	180

Altre industrie manifatturiere

Sono numerosi gli esempi applicativi del calore solare di processo nelle industrie manifatturiere (tabacco, abbigliamento, legno e mobili, plastica, apparecchiature elettriche o meccaniche). I processi endotermici più frequenti sono l'asciugatura, il lavaggio, il riscaldamento dell'acqua, e la cottura, che necessitano calore a bassa temperatura. In Tabella 35 sono riportate diverse tipologie di industrie in cui viene utilizzato il calore solare di processo, con dettagli sull'impianto solare termico/a concentrazione asservito alla fornitura di calore.

Tabella 35. Calore di processo per altre tipologie di industrie [40].

Settore	Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
							Processo	Solare
Abbigliamento	Giordania	Jordache Jeans Factory	Tubo evacuato	Acqua	Acqua calda e vapore per il lavaggio e il candeggio dei tessuti jeans	C	60	---
Abbigliamento	Portogallo	Beiralã	Piano selettivo, CPC	Acqua	Riscaldamento acqua per differenti fasi di produzione tessile	C	20-120	20-80
Alloggio e ristorazione	India	ITC Laundry New Delhi - Arun Dish	Altro	---	Per lavanderia e acqua calda per il bagno	C	---	175
Alloggio e ristorazione	India	ITC Laundry New Delhi - Scheffler Dish	Altro	---	Per lavanderia e acqua calda per il bagno	C	---	100-120
Alloggio e ristorazione	Israele	Izra'el's Kitchen	Piano	Acqua	Processo industriale di lavatrici	A2b	85	60-95
Attività di servizi	Germania	Caritas-Werkstätten: Wäscherei	Piano	Acqua/Glicole	Acqua calda in lavanderia	B2	20-90	max 95
Attività di servizi	Germania	Clean Park	Piano	Acqua/Glicole	Impianto lavaggio auto	C	20-90	---
Attrezzature elettriche	India	Bergen Solar	Altro	---	Integrato in processo esistente	B1	---	120-140
Attrezzature elettriche	Messico	GENERAL ELECTRIC QUERETARO	Piano	Acqua/Glicole	Preriscaldamento di produzione di vapore	A1	60-90	60-90
Attrezzature elettriche	India	Hindusthan Vidyut Products	Altro	---	Vulcanizzazione di cavi	C	---	@ 85
Attrezzature elettriche	Portogallo	KEMET Electronics Portugal, S.A.	Altro	Olio diatermico	Preparazione degli elettroliti	B1	40-180	60-180
Attrezzature elettriche	India	OCV glass fibre	Tubo evacuato	---	L'acqua calda è richiesta per la miscelazione di prodotti chimici	B3	85	---
Attrezzature per trasporti	Messico	COFICAB	Piano	Acqua	Preriscaldamento per produzione di vapore	A1	60-90	60-90
Attrezzature per trasporti	India	Harita Seatings Systems Limited	Tubo evacuato	Acqua	Pulizia parti di automobili prima della verniciatura	B1	55-60	70-95

Settore	Paese	Nome	Collettore	Fluido	Operazione industriale	Integrazione	Temperature (°C)	
							Processo	Solare
Costruzione	Svizzera	Colas Geneva	Altissimo vuoto	Olio diatermico	Riscaldamento di depositi di bitume per asfalto	B1	160-180	160-215
Costruzione	Svizzera	Colas Yverdon-les-Bains	Altro	Olio diatermico	Mantenimento del bitume in temperatura superiore a 160 °C ed esigenze dell'edificio	B3	50-90 160-200	50-300
Costruzione	Qatar	FIFA world cup solar cooled demonstrati on stadium	Fresnel	Acqua	Raffreddamento dello stadio dimostrativo per la fifa	A3	7-15	180
Fornitura	Austria	Carpentry Hamminger	Piano	Acqua/ Glicole	Essiccazione legno	C	60	25-115
Fornitura	Germania	Gas Pressure Regulator Station Großseelheim	Piano	---	Riscaldamento di gas naturale	B1	30-60	---
Fornitura	Austria	Gas Pressure Regulator Station Rankweil	Tubo evacuato	Acqua	Preriscaldamento gas naturale prima dell'espansione	B1	fino a 80	---
Gomma e plastica	Emirati Arabi	Ocean Rubber	Piano evacuato	Acqua	Macchine per la produzione di gomma	C	180	185
Informazione e comunicazione	Sud Africa	Solar cooling for data center	Fresnel	Acqua	Raffreddamento del data center per un'azienda di telecomunicazioni	B2	7-12	180
Informazione e comunicazione	Germania	Telekom Rottweil	Piano evacuato	Acqua	Riscaldamento e raffreddamento degli spazi	B1	---	< 95
Istruzione	Messico	UNISON	Altro	Acqua/ Glicole	Preriscaldamento acqua	A1	50-70	50-80
Istruzione	Spagna	University of Sevilla	Fresnel	Acqua	Refrigerazione	B1	7-15	165
Legno e sottoprodotti	Spagna	Instituto del Corcho	FMSC	Acqua/ Glicole	Cottura del sughero	C	110	120
Macchinari e attrezzature	India	Wheels India	Piano evacuato	---	L'acqua solare riscaldata a 75 °C viene utilizzata per sgrassare le ruote prima della verniciatura finale.	B1	---	75
Macchinari e attrezzature	Italia	Bergamo	Fresnel	Acqua	Refrigerazione	B1	---	195
Macchinari e attrezzature	Svizzera	Zehnder Group AG	Piano evacuato	Acqua	Riscaldamento dei lavabi di pretrattamento del dispositivo di rivestimento	A2b	---	90
Prodotti elettronici e ottici	Svezia	Bomans Lackering	Parabolico lineare	---	Acqua calda per bagni chimici che forniscono placcatura in oro per armadi radio	B1	160	---
Tabacco	Giordania	JTI	Fresnel	Vapore	Raffreddamento e calore di processo	A2b	190	225
Tabacco	India	India Tobacco Division	Altro	---	Trattamento del tabacco	A1	---	95
Trasporto e stoccaggio	Germania	Cologne Transit Authority	Tubo evacuato	Acqua	Riscaldamento aria per mancanza asciugatura	B2	---	70
Trattamento acque e rifiuti	Spagna	SODESA Project	Piano	Acqua di mare	Sistema di desalinizzazione ad azionamento termico	C	---	20-95
Trattamento acque e rifiuti	Stati Uniti	SURPRISE SHIP for sewage sludge drying	Parabolico lineare	Acqua/ Glicole	Essiccazione dei fanghi di depurazione	B1	90-100	---