

SISTEMI E TECNOLOGIE DI ACCUMULO DELL'ENERGIA TERMICA

I sistemi di accumulo termico coprono un'ampia gamma di temperature ed applicazioni, con interessanti prospettive di sviluppo tecnologico e di mercato.

Si basano sui processi di variazione dell'energia interna del materiale in forma di:

- **Calore sensibile**
 - $E_{TS} = mc\Delta T = V\rho c\Delta T$
- **Calore latente** di transizione di fase
 - $E_{TL} = m\Delta h_{tf}$
- **Energia termochimica** (rottura e ricomposizione di legami chimici)
 - $E_{TC} = m\Delta h_r$
- **Processi combinati**

CALORE SENSIBILE

L'accumulo dell'energia termica a calore sensibile può essere realizzato mediante:

- **Mezzi liquidi** (il riscaldamento dell'acqua contenuta in un serbatoio è il classico esempio di accumulo termico a calore sensibile in fase liquida)
- **Mezzi solidi** con fluido termovettore liquido o gassoso
- **Mezzi misti solido-liquidi**

CALORE SENSIBILE

Materiale	Densità (kg/m³)	Calore Specifico (kJ/kg·K)	Capacità termica volumetrica (kJ/m³·K)
Argilla	1458	0,879	1282
Mattoni	1800	0,837	1507
Arenaria	2200	0,712	1566
Legno	700	2,390	1673
Calcestruzzo	2000	0,880	1760
Vetro	2710	0,837	2268
Alluminio	2710	0,896	2428
Ferro	7900	0,452	3571
Acciaio	7840	0,465	3646
Ghiaia	2050	1,840	3772
Acqua	988	4,182	4132

Impianto SEGS I (13,8 MW) nel deserto del Mojave - California (1984)



Superficie del campo solare: 82.960 m²

Tipo di accumulo: **accumulo diretto**

Sistema di accumulo (*): **doppio serbatoio**

Mezzo di accumulo termico: **olio minerale**

Temperatura minima: 240 °C

Temperatura massima: 307 °C

Autonomia a piena potenza: 3 ore

(*) Distrutto da un incendio nel 1999

Impianto Andasol 1 (50 MW) in Andalucía, Spagna (2008)



Superficie del campo solare: 510.000 m²

Tipo di accumulo: **diretto**

Sistema di accumulo: **doppio serbatoio**

Mezzo di accumulo termico: **sali fusi**

Massa di sali fusi: 28.500 t

Temperatura minima: 260 °C

Temperatura massima: 400 °C

Autonomia a piena potenza: 7,5 ore

Impianto Gemmasolar (19,9 MW) in Andalucía, Spagna (2011)



Superficie del campo solare: 1.850.000 m²

Tipo di accumulo: **accumulo diretto**

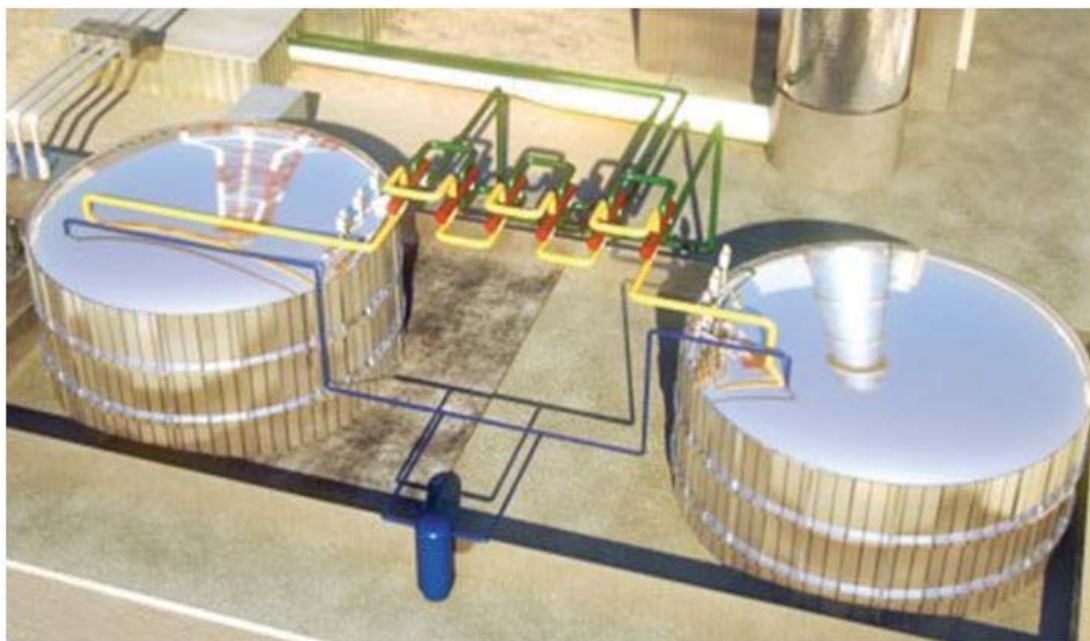
Sistema di accumulo: **doppio serbatoio**

Mezzo di accumulo termico: **sali fusi**

Temperatura minima: 290 °C

Temperatura massima: >500 °C

Autonomia a piena potenza: 15 ore



Impianto Ivanpah - California (2014)

Potenza lorda: 392 MW (126 + 2x133)

Superficie campo solare: 14.200.000 m²

Tipo di accumulo: **diretto**

Sistema di accumulo: **doppio serbatoio**

Mezzo di accumulo termico: **sali fusi**



Prototipo di TES a mezzo solido (cemento) e fluido termovettore liquido (olio diatermico)



Temperatura massima: **325 °C**



Prototipo di TES a termoclino a mezzo solido, fluido termovettore aria, per impianto CSP a torre da 80 MW

Volume del materiale di accumulo del prototipo: **25 m³**

Altezza del prototipo: **4 m**

Diametro massimo del prototipo: **4 m**

Volume dell'accumulo del sistema in piena scala: **30.000 m³**

N. accumulatori: **7**

Altezza degli accumulatori in piena scala: **9,5 m**

Diametro massimo degli accumulatori in piena scala: **27,7 m**

Autonomia a piena potenza: **12 ore**

Temperatura massima: **650 °C**

Temperatura minima: **270 °C**

Natura del materiale di accumulo: quarzite, calcare, sassi di fiume

Diametro medio del materiale solido: **3-4 cm**

CALORE LATENTE (di transizione di fase)

L'accumulo dell'energia termica a calore latente può essere realizzato con riferimento ai seguenti processi di transizione:

- **Solido-Liquido** (fusione)
- **Liquido-vapore** (vaporizzazione)
- **Solido-Solido** (transizione tra due diverse fasi solide a diversa struttura cristallina)

I passaggi di stato di gran lunga più utilizzati sono quelli **solido-liquido** e **solido-solido** perché durante la transizione di fase si hanno moderate variazioni di volume

Il passaggio di stato **liquido-vapore** è invece di rara applicazione per via delle rilevanti variazioni di volume del mezzo di accumulo durante la transizione

I materiali utilizzati sono brevemente indicati con l'acronimo **PCM** (Phase Change Materials)

Possono coprire un vastissimo campo di temperature

CALORE LATENTE

Materiale	Temperatura (°C)	Entalpia di fusione (MJ/m ³)
Soluzioni acqua-sali	-100 - 0	200 - 300
Acqua	0	330
Clatrati	-50 - 0	200 - 300
Paraffine	-20 - 100	150 - 250
Sali idrati	-20 - 80	200 - 600
Alcoli da zucchero	20 - 450	200 - 450
Nitrati	120 - 300	200 - 700
Idrossidi	150 - 400	500 - 700
Cloruri	350 - 750	550 - 800
Carbonati	400 - 800	600 - 1000
Fluoruri	700 - 900	> 1000



PlusICE PCM (ORGANIC) (A) RANGE

2013-1

PCM Type	Phase Change Temperature		Density		Latent Heat Capacity		Volumetric Heat Capacity		Specific Heat Capacity		Thermal Conductivity		Max Operating	Max Operating
	(°C)	(°F)	(kg/m ³)	(lb / ft ³)	(kJ/kg)	(Btu / lb)	(MJ/m ³)	(Btu / ft ³)	(kJ/kg K)	(Btu / lb °F)	(W/m K)	(Btu / ft ² h°F)	Temp (°C)	Temp (°F)
ORGANIC PCM SOLUTIONS														
A164*	164	327	1,500	93.6	290	125	435	11,675	2.42	0.573	nd	n/d	280	536
A155	155	311	900	56.2	100	43	90	2,416	2.2	0.521	0.230	0.133	250	482
A144	144	291	880	54.9	115	49	101	2,716	2.2	0.521	0.230	0.133	250	482
A133	133	271	880	54.9	126	54	111	2,976	2.2	0.521	0.230	0.133	250	482
A118**	118	244	1,450	90.5	340	146	493	13,232	2.7	0.640	nd	nd	300	572
A95	95	203	900	56.2	205	88	185	4,952	2.2	0.521	0.220	0.127	300	572
A82	82	180	850	53.1	155	67	132	3,536	2.21	0.524	0.220	0.127	300	572
A70	70	158	890	55.6	173	74	154	4,133	2.2	0.521	0.230	0.133	300	572
A62	62	144	910	56.8	145	62	132	3,542	2.2	0.521	0.220	0.127	300	572
A60H	60	140	800	49.9	212	91	170	4,552	2.15	0.509	0.180	0.104	400	752
A60	60	140	910	56.8	145	62	132	3,542	2.22	0.526	0.220	0.127	300	572
A58H	58	136	820	51.2	243	105	199	5,348	2.85	0.675	0.180	0.104	300	572
A58	58	136	910	56.8	132	57	120	3,224	2.22	0.526	0.220	0.127	300	572
A55	55	131	905	56.5	135	58	122	3,279	2.22	0.526	0.220	0.127	300	572
A53H	53	127	810	50.6	166	71	134	3,609	2.02	0.479	0.180	0.104	300	572
A53	53	127	910	56.8	130	56	118	3,175	2.22	0.526	0.220	0.127	300	572
A26	26	79	790	49.3	150	65	119	3,181	2.22	0.526	0.210	0.121	280	536
A25H	25	77	810	50.6	226	97	183	4,913	2.15	0.509	0.180	0.104	400	752
A25	25	77	785	49.0	150	65	118	3,160	2.26	0.535	0.180	0.104	280	536
A24	24	75	790	49.3	145	62	115	3,075	2.22	0.526	0.180	0.104	280	536
A23	23	73	785	49.0	145	62	114	3,055	2.22	0.526	0.180	0.104	280	536
A22H	22	72	820	51.2	216	93	177	4,754	2.85	0.675	0.180	0.104	400	752
A22	22	72	785	49.0	145	62	114	3,055	2.22	0.526	0.180	0.104	250	482
A17	17	63	785	49.0	150	65	118	3,160	2.22	0.526	0.180	0.104	250	482
A16	16	61	760	47.4	213	92	162	4,345	2.37	0.561	0.180	0.104	250	482
A15	15	59	790	49.3	130	56	103	2,756	2.26	0.535	0.180	0.104	250	482
A9	9	48	775	48.4	140	60	109	2,912	2.16	0.512	0.210	0.121	220	428
A8	8	46	773	48.3	150	65	116	3,112	2.16	0.512	0.210	0.121	220	428
A6	6	43	770	48.1	150	65	116	3,100	2.17	0.514	0.210	0.121	220	428
A4	4	39	766	47.8	200	86	153	4,112	2.18	0.516	0.210	0.121	220	428
A3	3	37	765	47.8	200	86	153	4,107	2.20	0.521	0.210	0.121	200	392
A2	2	36	765	47.8	200	86	172	4,616	2.20	0.521	0.210	0.121	200	392

PCM Products has a policy of continues product and product data improvement and reserves the right to change design and specifications without notice



PlusICE PCM (EUTECTIC) (E) RANGE

2013-1

PCM Type	Phase Change Temperature		Density		Latent Heat Capacity		Volumetric Heat Capacity		Specific Heat Capacity		Thermal Conductivity	
	(°C)	(°F)	(kg/m ³)	(lb / ft ³)	(kJ/kg)	(Btu / lb)	(MJ/m ³)	(Btu / ft ³)	(kJ/kg K)	(Btu / lb°F)	(W/m K)	(Btu / ft ² h°F)
EUTECTIC PCM SOLUTIONS												
E0	0	32	1,000	62.4	332	143	332	8,911	4.186	0.992	0.580	0.335
E-2	-2.0	28	1,070	66.8	306	132	327	8,777	3.80	0.900	0.580	0.335
E-3	-3.7	25	1,060	66.2	312	134	331	8,884	3.84	0.910	0.600	0.347
E-6	-6.0	21	1,110	69.3	275	118	305	8,186	3.83	0.907	0.560	0.324
E-10	-10.0	14	1,140	71.2	286	123	326	8,750	3.33	0.789	0.560	0.324
E-11	-11.6	11	1,090	68.0	301	129	328	8,804	3.55	0.841	0.570	0.329
E-12	-12.3	10	1,110	69.3	250	108	278	7,462	3.47	0.822	0.560	0.324
E-14	-14.8	5	1,220	76.2	243	105	296	7,945	3.51	0.832	0.530	0.306
E-15	-15.0	5	1,060	66.2	303	130	321	8,616	3.87	0.917	0.530	0.306
E-19	-18.7	-2	1,125	70.2	282	121	344	9,233	3.29	0.779	0.580	0.335
E-21	-20.6	-5	1,240	77.4	263	113	326	8,750	3.13	0.741	0.510	0.295
E-22	-22.0	-8	1,180	73.7	234	101	276	7,408	3.34	0.791	0.570	0.329
E-26	-26.0	-15	1,250	78.0	260	112	325	8,723	3.67	0.869	0.580	0.335
E-29	-29.0	-20	1,420	88.6	222	95	264	7,086	3.69	0.874	0.640	0.370
E-32	-32.0	-26	1,290	80.5	243	105	313	8,401	2.95	0.699	0.560	0.324
E-34	-33.6	-28	1,205	75.2	240	103	286	7,676	3.05	0.723	0.540	0.312
E-37	-36.5	-34	1,500	93.6	213	92	302	8,106	3.15	0.746	0.540	0.312
E-50	-49.8	-58	1,325	82.7	218	94	283	7,596	3.28	0.777	0.560	0.324
E-75	-75.0	-103	902	56.3	102	44	92	2,469	2.43	0.576	0.170	0.098
E-78	-78.0	-108	880	54.9	115	49	101	2,716	1.96	0.464	0.140	0.081
E-90	-90.0	-130	786	49.1	90	39	71	1,906	2.56	0.606	0.140	0.081
E-114	-114.0	-173	782	48.8	107	46	84	2,255	2.39	0.566	0.170	0.098

PCM Products has a policy of continues product and product data improvement and reserves the right to change design and specifications without notice



PlusICE PCM TEMPERATURE (H) RANGE

2013-1

PCM Type	Phase Change Temperature		Density		Latent Heat Capacity		Volumetric Heat Capacity		Specific Heat Capacity		Thermal Conductivity		Maximum Temperature	
	(°C)	(°F)	(kg/m ³)	(lb /ft ³)	(kJ/kg)	(Btu /lb)	(MJ/m ³)	(Btu /ft ³)	(kJ/kg K)	(Btu / lb °F)	(W/m K)	(Btu /ft ² h°F)	(°C)	(°F)
HIGH TEMPERATURE PCM SOLUTIONS														
H105	104	219	1,700	106	125	54	213	5,704	1.500	0.355	0.500	0.289	390	734
H115	114	237	2,200	137	100	43	220	5,905	1.505	0.357	0.503	0.291	390	734
H120	120	248	2,220	139	120	52	266	7,150	1.510	0.358	0.506	0.292	390	734
H160	162	324	1,910	119	105	45	201	5,383	1.505	0.357	0.509	0.294	200	392
H190	191	376	2,300	144	170	73	391	10,494	1.510	0.358	0.512	0.296	500	932
H220	220	428	2,000	125	100	43	200	5,368	1.515	0.359	0.515	0.298	390	734
H230	227	441	1,553	97	105	45	163	4,377	1.520	0.360	0.518	0.299	300	572
H250	250	482	2,380	149	280	120	666	17,886	1.525	0.361	0.521	0.301	600	1,112
H255	254	489	2,380	149	270	116	643	17,247	1.530	0.362	0.524	0.303	600	1,112
H280	282	540	2,250	140	160	69	360	9,662	1.535	0.364	0.527	0.305	500	932
H285	285	545	2,200	137	85	37	187	5,019	1.540	0.365	0.530	0.306	390	734
H290	292	558	2,200	137	150	65	330	8,857	1.545	0.366	0.533	0.308	500	932
H610	610	1,130	2,070	129	410	176	849	22,779	1.570	0.372	0.561	0.324	1300	2,372
H640	640	1,184	2,380	149	338	145	804	21,591	1.575	0.373	0.559	0.323	800	1,472
H650	652	1,206	2,450	153	300	129	735	19,727	1.580	0.374	0.557	0.322	800	1,472
H690	687	1,269	2,400	150	250	108	600	16,104	1.585	0.375	0.560	0.324	800	1,472
H695	695	1,283	2,460	154	280	120	689	18,487	1.590	0.377	0.563	0.325	800	1,472
H700	699	1,290	2,410	150	250	108	603	16,171	1.595	0.378	0.566	0.327	800	1,472
H705	706	1,303	2,430	152	250	108	608	16,305	1.600	0.379	0.569	0.329	800	1,472
H705A	705	1,301	2,040	127	452	194	922	24,749	1.595	0.378	0.573	0.331	1400	2,552
H725	725	1,337	2,210	138	602	259	1,330	35,708	1.590	0.377	0.577	0.334	1300	2,372
H755	755	1,391	2,160	135	466	200	1,007	27,016	1.585	0.375	0.581	0.336	800	1,472
H845	845	1,553	2,530	158	276	119	698	18,742	1.580	0.374	0.585	0.338	900	1,652
H885	885	1,625	2,290	143	236	102	540	14,505	1.575	0.373	0.589	0.340	900	1,652

PCM Products has a policy of continues product and product data improvement and reserves the right to change design and specifications without notice



PlusICE PCM (HYDRATED SALT) (S) RANGE

2013-1

PCM Type	Phase Change Temperature		Density		Latent Heat Capacity		Volumetric Heat Capacity		Specific Heat Capacity		Thermal Conductivity		Max Operating	Max Operating
	(°C)	(°F)	(kg/m3)	(lb / ft3)	(kJ/kg)	(Btu / lb)	(MJ/m3)	(Btu / ft3)	(kJ/kg K)	(Btu / lb °F)	(W/m K)	(Btu / ft2h°F)	Temp (°C)	Temp (°F)
HYDRATED SALT BASED PCM SOLUTIONS														
S117	117	243	1,450	90.5	160	69	232	6,227	2.61	0.618	0.700	0.405	140	284
S89	89	192	1,550	96.8	151	65	234	6,282	2.48	0.588	0.670	0.387	120	248
S83	83	181	1,600	99.9	141	61	226	6,055	2.31	0.547	0.620	0.358	120	248
S72	72	162	1,666	104.0	127	55	212	5,679	2.13	0.505	0.580	0.335	120	248
S70	70	158	1,680	104.9	110	47	185	4,960	2.10	0.497	0.570	0.329	120	248
S58	58	136	1,505	94.0	145	62	218	5,857	2.55	0.604	0.690	0.399	120	248
S50	50	122	1,601	99.9	100	43	160	4,297	1.59	0.377	0.430	0.249	120	248
S46	46	115	1,587	99.1	210	90	333	8,945	2.41	0.571	0.450	0.260	56	133
S44	44	111	1,584	98.9	100	43	158	4,251	1.61	0.381	0.430	0.249	120	248
S34	34	93	2,100	131.1	115	49	242	6,482	2.10	0.497	0.520	0.301	70	158
S32	32	90	1,460	91.1	200	86	292	7,837	1.91	0.452	0.510	0.295	60	140
S30	30	86	1,304	81.4	190	82	248	6,650	1.90	0.450	0.480	0.277	60	140
S27	27	81	1,530	95.5	183	79	280	7,515	2.20	0.521	0.540	0.312	60	140
S25	25	77	1,530	95.5	180	77	275	7,392	2.20	0.521	0.540	0.312	60	140
S23	23	73	1,530	95.5	175	75	268	7,186	2.20	0.521	0.540	0.312	60	140
S21	22	72	1,530	95.5	170	73	260	6,981	2.20	0.521	0.540	0.312	60	140
S19	19	66	1,520	94.9	160	69	243	6,527	1.90	0.450	0.430	0.249	60	140
S17	17	63	1,525	95.2	160	69	244	6,549	1.90	0.450	0.430	0.249	60	140
S15	15	59	1,510	94.3	160	69	242	6,485	1.90	0.450	0.430	0.249	60	140
S13	13	55	1,515	94.6	160	69	242	6,506	1.90	0.450	0.430	0.249	60	140
S10	10	50	1,470	91.8	155	67	228	6,115	1.90	0.450	0.430	0.249	60	140
S8	8	46	1,475	92.1	150	65	221	5,938	1.90	0.450	0.440	0.254	60	140
S7	7	45	1,700	106.1	150	65	255	6,844	1.85	0.438	0.400	0.231	60	140
PCM Products has a policy of continues product and product data improvement and reserves the right to change design and specifications without notice														



PlusICE PCM SOLID-SOLID (X) RANGE

2013-1

PCM Type	Phase Change Temperature		Density		Latent Heat Capacity		Volumetric Heat Capacity		Specific Heat Capacity		Thermal Conductivity	
	(°C)	(°F)	(kg/m ³)	(lb / ft ³)	(kJ/kg)	(Btu / lb)	(MJ/m ³)	(Btu / ft ³)	(kJ/kg K)	(Btu / lb °F)	(W/m K)	(Btu / ft ² h°F)
SOLID-SOLID PCM SOLUTIONS												
X25	25	77	1,055	65.9	110	47	116	3,115	1.63	0.386	0.360	0.208
X30	30	86	1,050	65.5	105	45	110	2,959	1.65	0.391	0.360	0.208
X40	40	104	1,046	65.3	125	54	131	3,509	1.67	0.396	0.360	0.208
X55	55	131	1,060	66.2	115	49	122	3,272	1.62	0.384	0.360	0.208
X70	70	158	1,085	67.7	125	54	136	3,640	1.57	0.372	0.360	0.208
X80	80	176	1,193	74.5	140	60	167	4,483	1.52	0.360	0.360	0.208
X90	90	194	1,200	74.9	135	58	162	4,348	1.51	0.358	0.360	0.208
X95	95	203	1,215	75.9	140	60	170	4,565	1.51	0.358	0.360	0.208
X120	120	248	1,245	77.7	180	77	224	6,015	1.50	0.355	0.360	0.208
X130	130	266	1,280	79.9	260	112	333	8,932	1.47	0.348	0.360	0.208
X165	165	329	1,304	81.4	230	99	300	8,050	1.43	0.339	0.360	0.208
X180	180	356	1,330	83.0	280	120	372	9,995	1.40	0.332	0.360	0.208
PCM Products has a policy of continues product and product data improvement and reserves the right to change design and specifications without notice												
Note: For other temperatures please consult our technical team.												

ENERGIA TERMOCHIMICA (rottura e ricomposizione di legami chimici)

L'energia termica viene trasformata in energia potenziale chimica mediante reazioni endotermiche reversibili. Tra le reazioni più studiate ai fini dello stoccaggio termochimico si hanno:

- **Reazioni di idratazione**

- $\text{CaO}(s) + \text{H}_2\text{O}(g) \leftrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2(s) + \Delta h$
- $\text{Mg}(\text{SO})_4(s) + 7 \cdot \text{H}_2\text{O}(g) \leftrightarrow \text{Mg}(\text{SO})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(s) + \Delta h$

- **Reazioni di carbonatazione**

- $\text{CaO}(s) + (\text{CO})_2(g) \leftrightarrow \text{Ca}(\text{CO})_3(s) + \Delta h$

- **Decomposizione dell'ammoniaca**

- $\text{N}_2(g) + 3\text{H}_2(g) \leftrightarrow 2\text{NH}_3(g) + \Delta h$

- **Reforming del metano (metanolo, etanolo, DME, ecc.)**

- $\text{CO}(g) + 3\text{H}_2(g) \leftrightarrow \text{CH}_4(g) + \text{H}_2\text{O}(g) + \Delta h$
- $2\text{CO}(g) + 2\text{H}_2(g) \leftrightarrow \text{CH}_4(g) + \text{CO}_2(g) + \Delta h$

- **Ossidazione di metalli**

- **Cicli dello zolfo**

PROCESSI COMBINATI

- **Sistemi misti calore latente/sensibile.** Nei sistemi a calore latente le transizioni di fase possono essere precedute e seguite da processi di preriscaldamento del mezzo fino al raggiungimento della temperatura di transizione e di ulteriore riscaldamento a temperature più elevate dopo la transizione, con la realizzazione di un processo combinato a calore latente e a calore sensibile
- **Sistemi misti termochimico/calore sensibile.** Nei sistemi di accumulo termochimico i reagenti possono essere preriscaldati fino al raggiungimento delle temperature di reazione ottimali e i prodotti possono essere ulteriormente riscaldati a temperature più elevate, con la realizzazione di un processo combinato termochimico e a calore sensibile
- **Sistemi misti termochimico/calore latente.** Parimenti, nei sistemi di accumulo termochimico i reagenti possono essere soggetti a cambiamenti di fase durante lo svolgimento delle reazioni, con la realizzazione di un processo combinato termochimico e a calore latente