

L'accumulo energetico a temperatura ultra-elevata: un'idea che sta prendendo piede

9 Maggio 2020 - Ing. Nicola Giulietti.



Una fonderia di acciaio- la temperatura di fusione dell'acciaio (tra 1370 °C e 1536 °C) rientra nel range dell'accumulo termico a temperatura ultra-elevata -fonte della foto:

<http://www.estanda.com/en/blog/steel-castings-manufacturing-process>

Sono trascorsi oltre 9 anni da quando mi fu proposto di studiare, nell'ambito di una borsa di studio offerta da ASPO Italia, la fattibilità dell'accumulo di energia elettrica in forma termica a temperatura sopra i 1000°C.

A quel tempo l'idea appariva al primo impatto bislacca e poco conveniente, tanto che incontrai difficoltà a trovare un relatore che mi permettesse di analizzarla nella mia tesi di Laurea in Ingegneria Energetica. D'altra parte nel mio corso di studi non avevamo praticamente toccato i sistemi di accumulo di energia.

Oggi invece l'accumulo energetico rappresenta uno dei problemi aperti per la decarbonizzazione dell'economia ed il corretto funzionamento delle reti elettriche; sempre più spesso forme di accumulo dispendiose ed inefficienti vengono presentate come panacea ai problemi energetici ed ambientali, raccogliendo ingenti investimenti. Ritengo pertanto che i tempi siano maturi per riprendere in mano anche la tecnologia che analizzai che, come illustrerò, presenta potenzialità estremamente interessanti nello scenario dei prossimi decenni, potenzialità di cui anche diverse aziende e ricercatori si stanno rendendo conto.

Di seguito presenterò in estrema sintesi le esigenze che stanno emergendo e che rendono quanto mai attuale l'idea dell'accumulo termico, descriverò la tecnologia da me analizzata e chiuderò poi con una carrellata di idee simili emerse recentemente in giro per il mondo.

L'accumulo termico nell'attuale scenario energetico

Un sistema di accumulo energetico è "una centrale elettrica che consuma più energia di quanta ne produce", come lessi in un articolo contro la realizzazione di un bacino d'accumulo idroelettrico; quello che l'articolo non diceva è che affinché il sistema elettrico funzioni è indispensabile che l'energia immessa in rete corrisponda in ogni istante a quella consumata; e purtroppo non tutte le fonti energetiche, specialmente solare ed eolico, sono disponibili quando servono e nelle quantità che servono. Regolare la produzione elettrica ha un costo e talvolta conviene accumulare energia nei momenti di eccedenza a costo di dissiparne un po' nel processo.

Dieci anni fa, nell'era dei combustibili fossili non più abbondanti, trasformare energia elettrica in calore era un'eresia da evitare. Realizzare il processo inverso (da calore ad elettricità) è costoso ed inefficiente: il massimo rendimento lo si raggiunge nelle grandi centrali a ciclo combinato, con un record mondiale del 62%. L'ostacolo ad efficienze elevate non è solo tecnologico, ma fisico, legato al [secondo principio della termodinamica](#): non si può trasformare tutto il calore in lavoro utile. Di fatto però si è obbligati a effettuare questa trasformazione se si produce energia elettrica con gas naturale, petrolio, carbone o uranio; una volta pagato il dazio per trasformare il calore in energia elettrica, si preferisce evitare di riportarla nuovamente in forma termica. Lo scenario però cambia con l'ingresso in scena di solare ed eolico.

Quando nel 2012 trovai che il prezzo dell'energia elettrica nel mercato spagnolo rasentava lo zero in giornate particolarmente ventose io ed i miei relatori ne rimanemmo stupiti. Benché si trattasse di un fenomeno raro e legato a politiche di incentivi, il dato provava che un elevato ricorso a fonti rinnovabili non programmabili poteva far scendere il prezzo dell'energia elettrica al di sotto di quello dell'energia termica. Fu questo dato che convinse i miei relatori a farmi portare avanti il lavoro: accumulare energia in forma termica poteva avere un senso almeno dal punto di vista economico.

A dire la verità notai anche che nella borsa elettrica tedesca, nel periodo natalizio (nel quale le fabbriche sono chiuse e il consumo energetico scende), il prezzo dell'energia era risultato addirittura negativo, ma ipotizzai si trattasse di un'errore. Invece come

mostra il grafico qui sotto, nel 2019 in Germania il prezzo del MWh elettrico è risultato negativo per 211 ore e la frequenza di questi eventi negli ultimi anni è in aumento.¹

Hourly wholesale electricity prices over the course of 2019: High shares of renewable energy result in a significantly lower wholesale power price on the day-ahead market



Hourly wholesale power prices (Day-ahead) for 2019



Come può il prezzo dell'energia diventare negativo? A causa di incentivi che rendono conveniente per il produttore eolico o solare immettere energia in rete anche in condizioni di surplus. Quello che risulta più interessante però è che il prezzo all'ingrosso dell'energia elettrica (si veda grafico) è sceso frequentemente sotto al costo del gas naturale per l'industria che nel 2019 in Germania si è attestato pari a 31,8 €/MWh (ovvero per ciascun MWh termico generabile mediante la sua combustione).²

Con la crescente diffusione di eolico e fotovoltaico, situazioni analoghe a quella tedesca si presentano sempre più spesso in diversi paesi del mondo. Secondo IRENA (l'agenzia internazionale dell'energia rinnovabile) il prezzo del MWh elettrico prodotto da energia eolica o fotovoltaica risulta ormai più economico di quello prodotto da fonte fossile.³ Si tratta di stime controverse, in quanto i combustibili fossili comportano costi

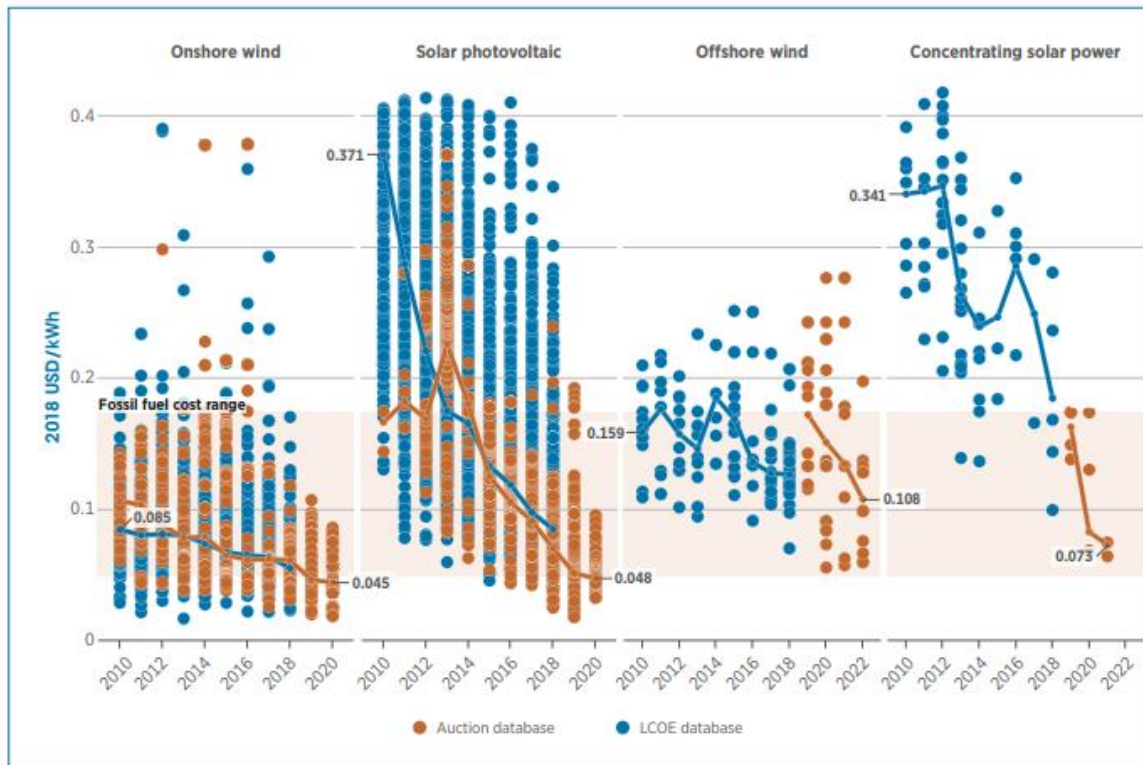
¹ https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/A-EW_German-Power-Market-2019_Summary_EN.pdf

² https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Natural_gas_price_statistics/it#Prezzi_del_gas_naturale_per_i_consumatori_non_domestici

³ https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf

ambientali che non vengono contabilizzati, ma d'altra parte eolico e solare (per i quali queste esternalità ambientali sono inferiori), presentano costi legati alla non programmabilità dell'immissione di energia in rete. Inoltre il costo del kWh rinnovabile varia da luogo a luogo, in funzione della disponibilità di sole e vento.

Figure S.3 The LCOE for projects and global weighted average values for CSP, solar PV, onshore and offshore wind, 2010–2022



Note: Each circle represents an individual project or an auction result where there was a single clearing price at auction. The centre of the circle is the value for the cost of each project on the Y axis. The thick lines are the global weighted-average LCOE, or auction values, by year. For the LCOE data, the real WACC is 7.5% for OECD countries and China, and 10% for the rest of the world. The band represents the fossil fuel-fired power generation cost range.

In ogni caso le principali istituzioni energetiche concordano che nei prossimi decenni il prezzo dell'energia prodotta da solare ed eolico si ridurrà ulteriormente e queste tecnologie si diffonderanno esponenzialmente.⁴ Ne conseguirà da un lato l'abbassamento del costo di produzione dell'energia elettrica, dall'altro maggiori

⁴ Sulla riduzione dei costi dell'eolico si veda ad esempio: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019.pdf - Nota: tra i principali fattori di riduzione del costo dell'energia eolica offshore da qui al 2050 l'IRENA evidenzia lo sviluppo dell'eolico d'alta quota, tecnologia che da sempre desta interesse nell'ambito di ASPO Italia. Possibili scenari sulla riduzione del costo del fotovoltaico: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70748.pdf> Anche l'Agenzia Internazionale dell'Energia, che ha sempre sottostimato i progressi di Eolico e fotovoltaico considera una loro riduzione di costo nello scenario base <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2020%20Full%20Report.pdf>

fluttuazioni dei prezzi ed un aumento delle spese di gestione del sistema energetico dovute alla non programmabilità, ovvero, ad esempio, alla necessità di ampliare la capacità di accumulo.⁵

Parte di queste spese possono però essere evitati, rendendo più praticabile la decarbonizzazione globale. Per farlo, chi gestisce le reti elettriche e la politica dovranno essere abbastanza lungimiranti da far fluttuare istante per istante il prezzo dell'energia elettrica per i consumatori, in funzione di domanda e offerta, magari amplificare ulteriormente le oscillazioni di prezzo per effetto di una tassazione oculata. In tal modo gli utenti stessi (cittadini, industria, terziario) parteciperanno ad equilibrare domanda e consumo per mezzo di dispositivi "smart" che si attivano o si ricaricano quando l'elettricità è più abbondante e conveniente.

Un esempio che generalmente viene fatto è quello dell'auto elettrica, ricaricabile nelle ore di massima produzione del fotovoltaico.

A mio avviso, però, i sistemi che nei prossimi decenni possono incidere maggiormente ad adattare la domanda all'offerta sono legati al fabbisogno termico. Infatti, i trasporti su strada sono responsabili di circa il 24% dei consumi finali d'energia (anche a causa della loro bassa efficienza); la domanda di energia in forma termica è pari invece a circa il 44% dei consumi finali, e questo senza considerare quella impiegata per la produzione elettrica: si veda il grafico seguente.⁶ Inoltre almeno per il momento, l'accumulo in forma termica può essere più economico di quello in forma elettrochimica.

⁵ Per farsi un'idea dei costi legati all'intermittanza della rete si veda ad esempio <https://www.ukerc.ac.uk/asset/A090E0B7-13B5-45E0-96B18A6E8AC8ED74/>

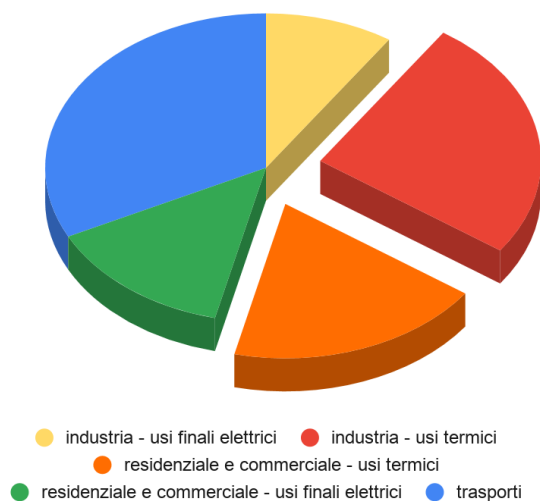
⁶ Il grafico è stato prodotto sulla base di dati provenienti da diverse fonti:
[https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Total%20final%20consumption%20\(TFC\)%20by%20sector](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Total%20final%20consumption%20(TFC)%20by%20sector)
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-sector.html>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114007151>
<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/transportation.pdf>

Non sono stati presi in considerazione gli usi non energetici dei combustibili ed il settore industriale comprende anche i consumi finali del settore agricolo.

Si possono trovare anche dati diversi, qualora le attività vengano classificate diversamente o qualora i dati siano riferiti al consumo di energia primaria, ovvero al consumo di energia al lordo delle perdite di conversione, che dipendono dalle particolari tecnologie utilizzate per la conversione energetica. In particolare l'energia primaria legata alla produzione elettrica è molto più elevata degli usi finali elettrici, a causa dei bassi rendimenti di cui ho parlato all'inizio dell'articolo.

Negli usi finali elettrici non sono considerate le pompe di calore, il cui output ricade nella domanda termica.

Domanda globale di energia per diversi usi finali



Per quanto riguarda la climatizzazione invernale ed estiva degli ambienti e la produzione di acqua calda (ovvero usi termici nel settore residenziale e commerciale) una delle tecnologie più promettenti è rappresentata dalle pompe di calore, che permettono una certa flessibilità di attivazione, grazie all'inerzia termica degli edifici e piccoli accumuli.⁷ Negli edifici civili generalmente è richiesto di riscaldare o raffreddare aria o acqua di qualche decina di gradi, compito che le pompe di calore svolgono con grande efficienza: in tali condizioni possono produrre diversi kWh di energia termica e/o di raffrescamento utile per ogni kWh di energia elettrica consumata.

Se il kWh elettrico ha prezzo inferiore a quello termico da combustibili fossili, il ricorso a questa tecnologia è dunque doppiamente interessante.

Nell'industria invece il fabbisogno termico è spesso legato a processi a temperatura prossima o superiore ai 100° C (si veda il diagramma qui sotto)⁸. In queste condizioni le

⁷ Si veda

https://www.researchgate.net/publication/310899381_On_heat_pumps_in_smart_grids_A_review

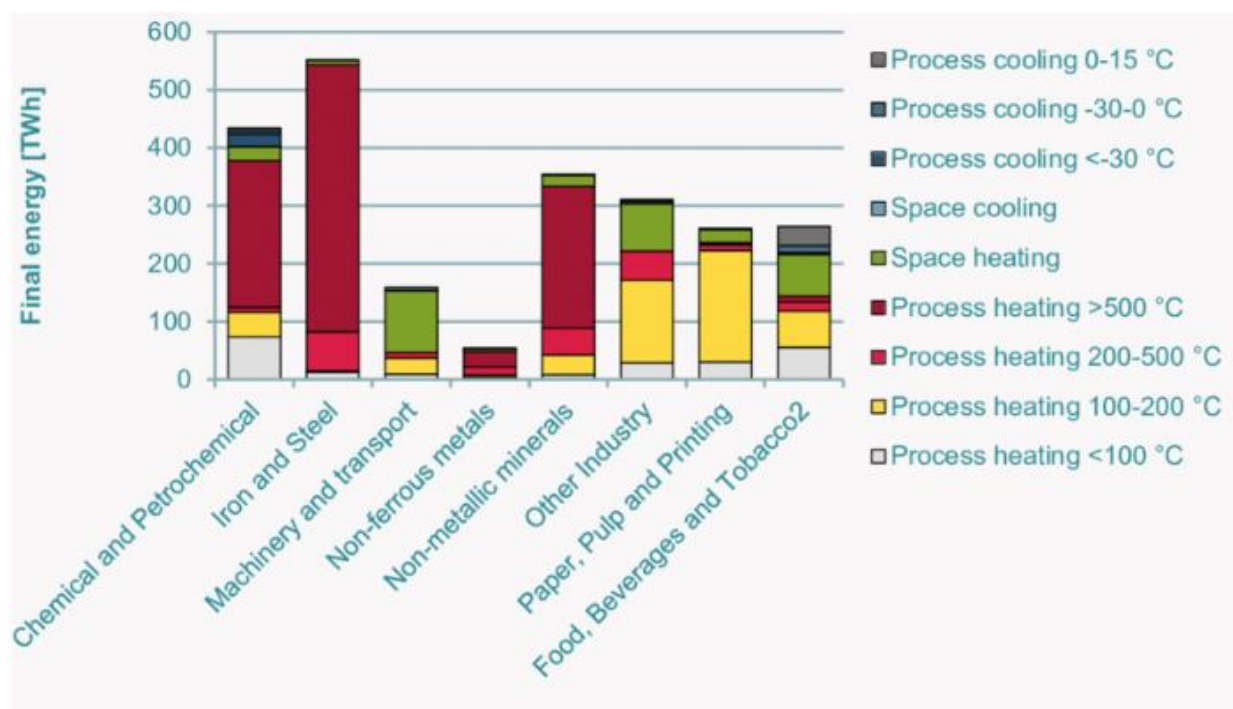
https://www.researchgate.net/publication/328142388_Energy_Management_of_CHP-Based_Microgrid_with_Thermal_Storage_for_Reducing_Wind_Curtailment.

Lo shifting dei consumi energetici per mezzo di pompe di calore nel nord europa, secondo alcuni studi, potrebbe non essere particolarmente conveniente (si veda ad esempio:

https://www.researchgate.net/publication/340083203_Flexible_electricity_use_for_heating_in_markets_with_renewable_energy), d'altra parte l'analisi andrebbe condotta su tecnologie pensate appositamente per queste finalità. In ogni caso si prevede che con la crescita economica di paesi quali l'India, in climi caldi, il fabbisogno di raffrescamento supererà quello di riscaldamento.

⁸ Grafico tratto da https://www.researchgate.net/publication/325604001_D23_WP2_Report-Open_Data_Set_for_the_EU28

pompe di calore risultano poco efficienti o non sono utilizzabili e si ricorre generalmente all'uso di combustibili fossili. Se veramente si vuole decarbonizzare l'economia, si deve trovare un modo per soddisfare questa domanda termica con costi e flessibilità equiparabili alle soluzioni attualmente adottate. Una risposta è data dall'uso delle biomasse, che però sono disponibili in quantitativi limitati e la cui combustione non è esente dalla produzione di inquinanti. Un'alternativa soprattutto per medie temperature è rappresentata dal solare termico a concentrazione, soluzione però poco praticabile alle alte latitudini e per stabilimenti industriali già esistenti. Una terza via è potenzialmente quella dell'accumulo termico ad altissima temperatura di energia elettrica.



Heating and cooling final energy consumption for the European Union 28 industry in 2015 by sub-sector and temperature level.

Come funziona l'accumulo ad altissima temperatura.

L'idea di un accumulo di energia elettrica a temperature almeno superiori a 1000°C emerse nel Dicembre 2011 nella mailing list Nuove Tecnologie Energetiche, facente capo a ASPO Italia. Massimo Ippolito avanzò l'idea di un accumulo termico stagionale sotterraneo che fu battezzata "MagmaGen".⁹

⁹ Massimo Ippolito è l'ideatore del progetto KiteGen, una tecnologia di [eolico d'alta quota](#).

Facendo tesoro di quelle discussioni, sviluppai il concetto di stoccare l'energia (per periodi di massimo una settimana però)¹⁰ riscaldando un materiale inerte, attraverso la dissipazione di elettricità per [effetto Joule](#). Mi fissai come obiettivo il funzionamento del sistema di accumulo a 1400-1500° C, temperatura superiore a quella ipotizzata al tempo in letteratura scientifica. Si consideri che per i sistemi di accumulo esistenti nel 2012, il record era di 750° C, raggiunto da una tecnologia sperimentale della Lloyd Energy utilizzando dei blocchi di grafite.



Sistema di accumulo della Lloyd Energy, all'interno di blocchi di grafite racchiusi all'interno della cassa mostrata in foto. Fonte: <http://peakenergy.blogspot.com/2008/02/storing-energy-using-graphite.html>

Perchè puntare ad una temperatura di accumulo così alta?
Quando scrissi la tesi ritenevo che il calore andasse riconvertito almeno parzialmente in energia elettrica, ed aumentando la temperatura di accumulo si riesce ad aumentare anche l'efficienza della trasformazione (in accordo con il già citato 2° principio della termodinamica). Tale temperatura risulta compatibile anche con l'uso di un ciclo Brayton (turbina a gas) per la generazione elettrica: questa tecnologia è relativamente economica, affidabile e rende disponibile allo scarico calore refluo a 400-600°C, utilizzabile nei processi industriali (permettendo quindi la [cogenerazione](#)).

¹⁰ Nella mia tesi presi in considerazione diverse possibilità di accumulo termico: l'accumulo stagionale, ovvero lo stoccaggio di energia termica per un periodo medio di alcuni mesi fu analizzato, ma quello con periodi di stoccaggio inferiori appariva più promettente e facile da sviluppare nel breve-medio termine, per cui decisi di approfondire tale strada.

Ad oggi credo che possa risultare conveniente anche l'impiego diretto del calore nei processi industriali, ed una temperatura elevata consente maggiore libertà di utilizzo in un'ampia gamma di processi.

Temperature elevate consentono inoltre di accumulare più calore sensibile per unità di massa e di spazio, con possibili risparmi di materiali e strutture: ad esempio riscaldare la temperatura dell'allumina, un ceramico utilizzabile per l'accumulo, da 400 a 600 °C si possono accumulare 0,06 kWh per kg di materiale; portandola da 800 a 1400 °C, ben 0,2 kWh per kg.

Temperature così elevate pongono però diverse sfide tecnologiche che rischiano di far lievitare i costi. Nella mia ricerca ho individuato diversi accorgimenti, alcuni ancora da sperimentare, che permetterebbero non solo di risolvere i problemi, ma anche di mantenere il costo del sistema inferiore a quello sistemi di accumulo termico a bassa temperatura, a parità di energia accumulata.

L'ostacolo principale a 1400°C è la dinamica estremamente rapida delle reazioni chimiche. In presenza d'aria e quindi di ossigeno, i metalli, se non fondono, si ossidano e si corrodono. Resiste perlopiù ciò che è già ossidato per sua natura, ad esempio i materiali ceramici costituiti appunto da ossidi estremamente stabili quali l'allumina (ossido di alluminio), che ho ipotizzato di utilizzare come materiale di accumulo. Resiste anche il carburo di silicio, grazie ad una barriera di ossido che si forma naturalmente sulla sua superficie; questo materiale viene utilizzato per produrre resistenze elettriche per le altissime temperature.

La trasformazione dell'energia elettrica in calore deve aver luogo rapidamente, consentendo una rapida ricarica dell'accumulo nei momenti in cui il costo dell'energia scende. Il processo deve ovviamente essere economico. La dissipazione per effetto Joule in teoria consente di raggiungere questi obiettivi, tuttavia le resistenze elettriche in Carburo di Silicio sono costose e fragili. Tendono a frammentarsi.

Da qui l'idea di usare in sostituzione carburo di silicio "già frammentato": le proprietà conduttive dei granuli di carburo di silicio sono note e già sfruttate nei [varistori](#); certo sono necessarie tensioni medie o alte per produrre il passaggio della corrente, ma questo può essere un vantaggio se si opera nel settore industriale, poiché si evitano le perdite energetiche legate alla trasformazione in bassa tensione. Inoltre il carburo di silicio granulare è utilizzabile anche come materiale di accumulo e costa quanto il pane (1,6-2 €/kg).



Carburo di silicio granulare: fonte <http://www.metallurgical-chemical.com/picview.asp?small=Green%20Silicon%20Carbide>

Altra problematica è rappresentata dal sistema di scambio termico per recuperare il calore immagazzinato: oltre ad essere semplice ed affidabile, deve consentire di scaldare i gas diretti in turbina o ai processi industriali, ad una temperatura il più possibile prossima a quella dell'accumulo. Non è infatti scontato che se si accumula del calore a 1400°C sia possibile recuperarlo alla medesima temperatura. Perchè lo scambio termico abbia luogo, deve esserci infatti un differenziale di temperatura tra il materiale caldo e i gas da scaldare. Maggiore è questo differenziale, più lo scambio termico è rapido. Aumentando enormemente la superficie di scambio termico, utilizzando un materiale ceramico granulare per l'accumulo, si riesce tuttavia a velocizzare il processo, consentendo all'aria di raggiungere circa la stessa temperatura del materiale di accumulo.

I granuli ceramici refrattari sono economici (rappresentano la materia prima utilizzata per la produzione di manufatti) e non si rompono (o, se lo fanno, non creano grossi problemi).

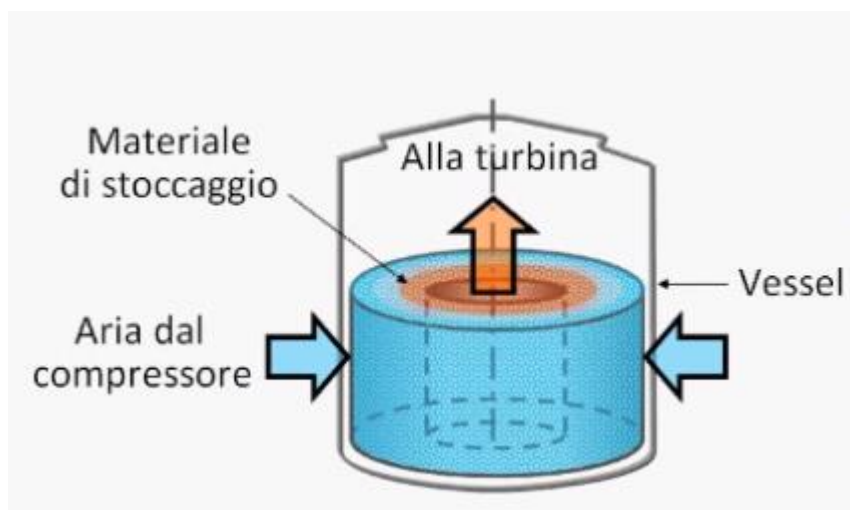
È a mio avviso da escludere invece l'impiego di materiali liquidi (es. metalli fusi) o che alle alte temperature cambiano fase, fondendo. Lo scorso anno è stato pubblicato un articolo che analizza questa possibilità¹¹: l'uso di liquidi crea problemi di scambio termico, contenimento, movimentazione e sicurezza, richiedendo dunque costi aggiuntivi ingiustificati dai vantaggi legati alla possibilità di accumulare un po' più d'energia per unità di volume.

¹¹ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ente.201900908>

Più promettente è invece l'incapsulamento di materiali a cambiamento di fase dentro delle sfere ceramiche, soluzione approfondita negli ultimi anni per sistemi analoghi a quello da me studiato.¹²

Infine un ulteriore nodo da dipanare è il contenimento in sicurezza del materiale di accumulo e la sua coibentazione termica. Una possibile soluzione è quella di racchiuderlo in un recipiente metallico. In tal modo si consente la pressurizzazione dei gas da scaldare, permettendo dunque di alimentare una turbina a gas (che necessita di aria calda in ingresso ad una pressione di almeno 4 o 5 atmosfere per ottenere efficienze accettabili). Se si vuole spendere poco, il recipiente può essere prodotto in acciaio al carbonio, ma la sua temperatura non può salire oltre i 300°C. Sempre per contenere i costi, il recipiente deve avere un diametro di pochi metri, e il problema diventa allora come avere abbastanza spazio all'interno sia per il materiale isolante che per quello d'accumulo.

La soluzione che ho trovato consiste nel trarre vantaggio dai transitori termici: affinché il calore si trasmetta da un punto all'altro del materiale granulare occorre del tempo. Se riscaldiamo la parte più interna dell'accumulo ed entro qualche giorno recuperiamo il calore con un flusso d'aria radiale diretto dall'esterno verso il centro, il calore non fa in tempo ad uscire; si riesce addirittura ad evitare di inserire del materiale isolante, pur con perdite energetiche minime (inferiori al 5% per tempi di stoccaggio di una settimana).



Grazie alle diverse innovazioni proposte, risulta fattibile un sistema con una densità di energia tra 0.2 e 0.3 MWh/m³, comparabile a quello delle batterie al litio e costi ipotizzabili nell'ordine di 50 €/kWh termico, paragonabili a quelli dei sistemi di accumulo idroelettrico per pompaggio (attualmente i più utilizzati in quanto i più economici).¹³ Ipotizzando di accumulare energia mediamente ogni 3 giorni pagando l'elettricità ad un prezzo di 10 €/MWh inferiore a quello MWh termico da gas naturale, il rientro dell'investimento avrebbe luogo nell'arco di qualche anno. Se poi non interessa pressurizzare il recipiente dell'accumulo (e dunque utilizzare una turbina a gas) i costi scendono significativamente.

Se la tecnologia è così valida - sorge spontaneo il dubbio- qualcun altro nel mondo dovrebbe essersi messo a studiarla. Ed infatti è così.

Cosa è cambiato negli ultimi 9 anni.

Nel Novembre 2019 si è tenuto a Madrid il primo Workshop internazionale sull' "Ultra High Temperature Thermal Storage" come è stato definito l'accumulo a temperature superiori o prossime a 1000°C.¹⁴ L'evento testimonia la nascita di un intero filone di ricerca dedicato a queste tematiche, che 9 anni fa non esisteva. A spingere la ricerca in questo settore, soprattutto in Spagna, è lo sviluppo di centrali solari a concentrazione capaci di operare a temperature sempre più elevate, per le quali la classica tecnologia a sali fusi non risulta idonea. Accumulare l'energia attorno ai 1000 gradi risulta in prospettiva più economico e consente rendimenti di generazione elettrica più alti. Il primo manuale sull'accumulo a temperature ultra elevate sarà pubblicato a Settembre 2020.¹⁵

Dal punto di vista commerciale, sono in fase di introduzione sul mercato almeno due sistemi di stoccaggio termico che presentano alcune caratteristiche simili a quello da me studiato.

Il primo è stato sviluppato da Dragan Stevanovic, inventore del Pebble Heater commercializzato da ATZ-Evus, che avevo descritto nella mia tesi e al quale mi ero ispirato. Il Pebble Heater è un recipiente metallico riempito di sfere ceramiche, utilizzato come scambiatore di calore rigenerativo: è cioè impiegato per accumulare

¹³ Per una rassegna di caratteristiche e costi dei sistemi di accumulo si veda questo articolo del 2019 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X19306012?via%3Dihub>

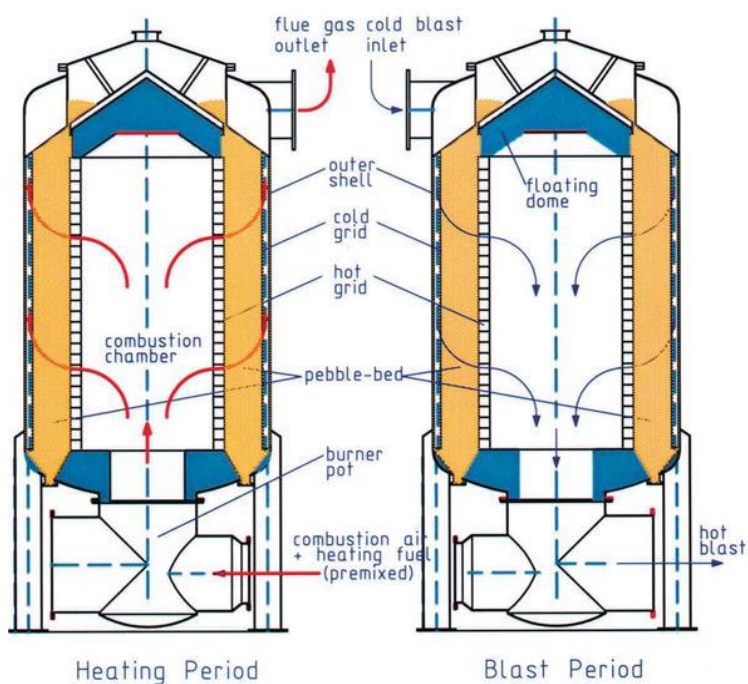
¹⁴ <https://eventos.upm.es/34140/programme/first-international-workshop-on-ultra-high-temperature-thermal-energy-storage-transfer-and-conversi.html>

¹⁵ <https://www.elsevier.com/books/ultra-high-temperature-thermal-energy-storage-transfer-and-conversion/datas/978-0-12-819955-8>

temporaneamente calore da un flusso di gas caldi (esempio gas di scarico), per cederlo successivamente ad un flusso di gas freddi. Negli ultimi anni la tecnologia dei Pebble Heater è stata ulteriormente sviluppata ed è stata testata fino a 1500°C.

Una nuova idea di Stevanovich è di realizzare un silos coibentato internamente, nel quale delle sfere di allumina sono riscaldate fino a 1100°C per mezzo di una resistenza elettrica metallica. Il sistema è abbastanza complesso e prevede anche l'impiego di alcuni Pebble Heater per aumentare l'efficienza del recupero elettrico, come descritto in questo articolo:¹⁶

<https://www.intechopen.com/books/advancements-in-energy-storage-technologies/hih-temperature-energy-storage-hites-with-pebble-heater-technology-and-gas-turbine>.



Scambiatore di calore rigenerativo di tipo Pebble Heater; fonte:

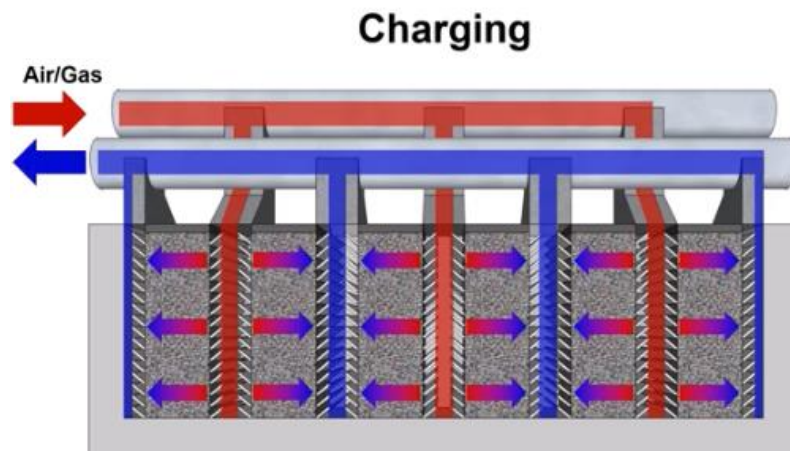
<https://www.intechopen.com/books/advancements-in-energy-storage-technologies/hih-temperature-energy-storage-hites-with-pebble-heater-technology-and-gas-turbine>

Un altro sistema d'accumulo è stato sviluppato dalla [Storasol](#) e si basa sull'impiego di sabbia silicea, portata fino a circa 1000°C. Il sistema è molto simile al Pebble Heater e come questo è pensato per lo scambio termico rigenerativo. Il materiale d'accumulo è più economico e la geometria potrebbe consentire una maggiore scalabilità, ma non la

¹⁶ Si veda anche quest'altro articolo <http://pebble-heater.com/Paper-DStevanovic-eei2018.pdf> e il brevetto del sistema

<https://patentimages.storage.googleapis.com/57/0f/e7/6eca719a818fb2/US20180106195A1.pdf>

pressurizzazione. Il costo del sistema dovrebbe essere compreso tra 15 e 25 €/kWh termico, ma al momento è stato realizzato solo un piccolo impianto sperimentale. È stato ipotizzato anche di utilizzare il sistema per l'accumulo di energia elettrica, riscaldando per mezzo di resistenze elettriche l'aria diretta verso il materiale di accumulo.



Conclusioni

Nell'ultimo decennio l'accumulo di energia elettrica in forma termica a temperatura superiore a 1000°C si è trasformato da un'idea bislacca e visionaria ad una tecnologia in fase di sviluppo e con grandi prospettive, nell'ottica della decarbonizzazione low cost. Lo studio da me realizzato, sebbene possa trarre giovamento da questi sviluppi scientifici e tecnologici, risulta tutt'ora valido e caratterizzato da possibili innovazioni non ancora esplorate in altre ricerche. L'idea meriterebbe pertanto di essere sviluppata, a livello accademico o industriale. Se qualcuno fosse interessato a farlo mi contatti, sarò felice di collaborare.

Qui il mio contatto LinkedIn e la mia mail <https://www.linkedin.com/in/nicolagiulietti/n.giulietti@composite-research.com> .

Chi volesse approfondire può leggere la tesi completa qui https://www.slideshare.net/slideshow/embed_code/key/cFTTdAqHIQ8xcQ o vedere una presentazione di 15 minuti su youtube: <https://www.youtube.com/embed/xmyz7VPDlcl>