

PROPOSTA DI UN PANNELLO A CONCENTRAZIONE PER LA PRODUZIONE DI IDROGENO MEDIANTE IL CICLO ZnO-Zn

Federico Rossi¹, Umberto Di Matteo², Andrea Nicolini¹

¹Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale
Via G. Duranti, 67 – 06125 Perugia

²Università Telematica Guglielmo Marconi
Via N. Sauro, 4 – 00195 Roma

SOMMARIO

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescente interesse da parte della comunità scientifica internazionale verso lo studio e l'individuazione di fonti di energia rinnovabili. Le fonti di energia tradizionali, derivate da combustibili fossili, oltre a contribuire in maniera determinante al problema ambientale sono infatti destinate ad esaurirsi entro i prossimi decenni. È in questo contesto che l'idrogeno sta emergendo come possibilità alternativa, uscendo dalle ipotesi utopistiche ed assumendo un ruolo cruciale nella ricerca attuale. L'ostacolo principale alla diffusione dell'idrogeno come combustibile è la disponibilità di tale elemento in natura solo in forma combinata; occorre quindi utilizzare energia per produrlo.

In questa memoria, viene proposto ed analizzato da un punto di vista energetico un dispositivo innovativo per la produzione di idrogeno da energia solare mediante cicli termochimici. L'energia necessaria al compimento delle reazioni è fornita dal Sole. Il ciclo termochimico realizzato all'interno del dispositivo è quello basato sugli ossidi di zinco, individuato quale ciclo più conveniente sulla base di fattori termodinamici e cinetici. Tale ciclo prevede la dissociazione di ZnO in zinco ed ossigeno, ad una temperatura di 2000°C.

INTRODUZIONE

L'idrogeno non si trova in natura in forma pura. Per la sua produzione è necessario utilizzare particolari processi fisico-chimici che trasformano altre materie prime in idrogeno.

La realizzazione dei suddetti processi richiede l'impiego di energia che attualmente è fornita dalle fonti tradizionali. Il costo e la sostenibilità ambientale dell'idrogeno sono pertanto vincolati alle forme tradizionali di energia.

L'obiettivo della ricerca è quindi quello di studiare nuovi sistemi per l'ottenimento di idrogeno con l'utilizzo di energia rinnovabile.

Nel presente studio si propone un dispositivo per la produzione di idrogeno mediante processi di decomposizione termochimica con impiego di energia solare.

Il dispositivo consiste in un concentratore solare per la produzione di idrogeno mediante il ciclo chimico di dissociazione dell'ossido di zinco, individuato quale ciclo più conveniente sulla base di fattori termodinamici e cinetici. La dissociazione di ZnO in zinco ed ossigeno, richiede una temperatura di 2000°C. Lo studio ha previsto pertanto l'individuazione di dispositivi atti a raggiungere tali temperature, a separare ossigeno e zinco, ed a consentire la reazione tra zinco ed acqua ad una temperatura di circa 600°C.

Quest'ultima reazione consente la rigenerazione dell'ossido di zinco, con produzione di idrogeno. Le temperature di processo sono ottenute mediante concentrazione solare. Sviluppi della ricerca prevedono la realizzazione di un prototipo del dispositivo proposto e l'effettuazione di prove sperimentali di verifica delle prestazioni teoriche previsionali.

DECOMPOSIZIONE TERMOCHIMICA DELL'ACQUA

La dissociazione termica diretta della molecola dell'acqua è difficile da realizzare, sia a causa delle temperature assai elevate che si rendono necessarie sia a causa delle difficoltà di separazione dell'idrogeno dall'ossigeno.

La dissociazione della molecola dell'acqua può essere ottenuta anche per mezzo di cicli chiusi di reazioni chimiche termicamente attivate a temperature tecnologicamente compatibili. Un grande numero di processi chimici hanno infatti come prodotto finale la dissociazione della molecola dell'acqua in idrogeno ed ossigeno; alcuni di essi sono semplicemente dei processi che portano alla scissione della molecola dell'acqua nei suoi componenti utilizzando soltanto calore, mentre altri definiti cicli ibridi sfruttano l'azione combinata di calore ed elettrolisi.

Negli ultimi anni moltissimi studi sono stati condotti su diversi cicli termochimici con esito negativo; la maggior parte di questi sono infatti caratterizzati da elevati costi e scarsa efficienza. In questo scenario risulta quindi evidente la necessità di operare una selezione dei processi in grado di garantire una buona efficienza termodinamica ad un basso costo di realizzazione.

I criteri adottati per selezionare le combinazioni di reazioni chimiche più efficienti per la decomposizione della molecola dell'acqua sono i seguenti:

- a) il rendimento termico del processo basato su fattori termodinamici e cinetici;
- b) la temperatura minima richiesta dal processo e la sua compatibilità con la fonte di energia (solare) che si intende usare;
- c) la compatibilità dei materiali impiegabili, la loro disponibilità, il loro costo;
- d) le limitazioni ecologiche e di sicurezza;

e) i costi di produzione dell'idrogeno.

Un elevato rendimento termico è desiderabile sia per motivi economici che per motivi ecologici.

I processi termochimici per la scissione dell'acqua dal punto di vista termodinamico sono condizionati dal Secondo Principio della Termodinamica. Il rendimento termodinamico del processo, ε , in base all'energia disponibile è dato da:

$$\varepsilon = \frac{T_M - T_m}{T_m} = \beta \frac{\Delta G}{Q} \quad (1)$$

dove β è un fattore minore o uguale a 1 che tiene conto delle perdite di energia e di entropia dovute allo svolgimento delle reazioni in condizioni di non equilibrio, ed alle spese di energia per le esigenze di pompaggio, di separazione e perdite di calore nell'impianto, ΔG la variazione dell'energia libera di Gibbs per la formazione di una mole di acqua e Q il calore totale richiesto dal processo per decomporre una mole di acqua [1].

Il rendimento termico E del processo è dato dal rapporto tra il potere calorifico superiore di una mole di idrogeno (285.9 kJ) e l'input totale di energia termica richiesta per il processo di decomposizione:

$$E = \frac{285.9}{\Sigma Q} \quad (2)$$

Il termine ΣQ include il calore necessario per produrre tutte le forme di lavoro impiegate nella decomposizione, vale a dire

$$\Sigma Q = \Sigma q_i + \frac{W_{in}}{\Sigma \eta} \quad (3)$$

dove q_i sono gli input diretti di calore, W_{in} gli input diretti di lavoro utile ed η il rendimento di conversione del calore in lavoro utile [1].

Tra i parametri presi in considerazione per il confronto tra i cicli termochimici sono stati considerati, oltre ai criteri sopra menzionati, il costo di produzione dell'idrogeno, il numero di moli di idrogeno prodotto per m² di superficie del sistema di captazione, e il numero di moli di idrogeno prodotto per m² di superficie del sistema di captazione al secondo. Quest'ultimo parametro è indice della concentrazione di energia di attivazione della reazione

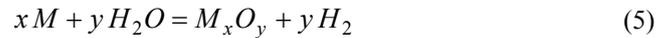
I cicli termochimici basati sulla riduzione degli ossidi metallici

I cicli termochimici basati sulla riduzione degli ossidi metallici sono costituiti da sistemi di reazioni in cui il prodotto finale è l'idrogeno.

In genere il processo termochimico si svolge in due fasi: nella prima fase (endotermica alta temperatura) l'ossido di un metallo M_xO_y è decomposto termicamente nel metallo M e in ossigeno:



nella seconda fase (esotermica a bassa temperatura) il metallo M reagisce con acqua per produrre idrogeno:



L'ossido metallico ottenuto viene riutilizzato di nuovo nella reazione (1).

La temperatura alla quale avviene spontaneamente la reazione di riduzione del metallo è in genere estremamente elevata (ad esempio nel ciclo termochimico dell'ossido di zinco, che sembra essere industrialmente promettente, la temperatura a cui avviene la reazione endotermica di riduzione dell'ossido è circa di 2000 °C) e spesso non compatibile con quella raggiunta per mezzo di pannelli solari anche se dotati di elevati valori del fattore di concentrazione.

Confronto tra i principali processi termochimici

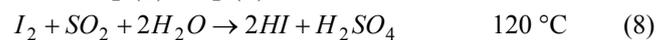
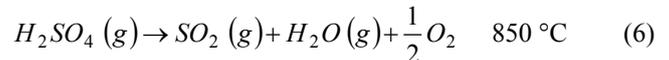
L'idrogeno può essere ottenuto dall'acqua mediante l'impiego di differenti processi: elettrolisi, termolisi e cicli termochimici. L'efficienza dell'elettrolisi (rapporto fra l'energia elettrica necessaria per scindere la molecola d'acqua e l'energia contenuta nell'idrogeno prodotto) è in genere circa 75 – 80 %; tuttavia la generazione di energia elettrica (da energia termica ad elettrica) è in genere 30 – 35 %. Quindi, la conversione di acqua in idrogeno via elettrolisi commerciale ha un'efficienza complessiva di soltanto 20 – 25 %.

La termolisi è un processo in cui l'acqua viene riscaldata a temperature tali da provocare la sua dissociazione in idrogeno ed in ossigeno; le temperature richieste sono molto alte.

Un processo termochimico è una combinazione di reazioni chimiche endotermiche in cui l'acqua è l'elemento di partenza e l'idrogeno e l'ossigeno sono i prodotti finali.

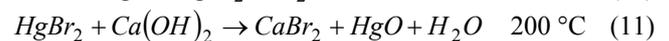
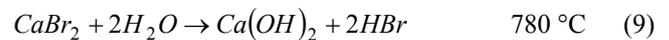
I cicli termochimici messi a confronto per individuare quello più idoneo per la produzione di idrogeno mediante l'impiego di energia termica solare sono:

Ciclo Zolfo-Iodio



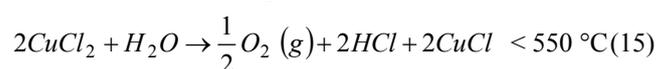
La reazione richiede una sorgente di calore a circa 850 °C per la decomposizione termica di H₂SO₄.

Ciclo Calcio-Bromo



La reazione richiede un input di calore di circa 780 °C per la decomposizione termica di CaBr₂.

Ciclo Rame-Cloro



Il ciclo richiede per la realizzazione delle reazioni di decomposizione termica del CuCl_2 di una sorgente di calore a circa $550\text{ }^\circ\text{C}$ ed utilizza materie prime abbastanza economiche. Il rendimento del ciclo è attorno al 41%.

Ciclo dello zinco



Il grosso vantaggio offerto da questo ciclo è che non si ha consumo di sostanze chimiche ma soltanto circolazione e separazione dei reagenti. Il ciclo dello zinco è il processo concettualmente più semplice poiché prevede esclusivamente l'impiego di zinco ed ossido di zinco, la reazione chimica di dissociazione avviene a $2000\text{ }^\circ\text{C}$; richiede quindi concentratori solari estremamente efficaci [2], [3].

In Tabella 1 è riportato un confronto tra i cicli termochimici esaminati in funzione del rendimento termochimico, calcolato mediante l'espressione (1), e della temperatura massima di processo.

Tabella 1. Confronto cicli termochimici.

	Numero di reazioni	T massima del processo ($^\circ\text{C}$)	Rendimento termochimico (%)
Ciclo Zolfo – Iodio	3	900	38
Ciclo Calcio – Bromo	4	780	36 – 40
Ciclo Rame – Cloro	3	550	41
Ciclo Zinco	2	2000	44

Dall'esame del confronto emerge che il ciclo dello zinco è quello che impiega il numero più basso di reazioni di dissociazione e che presenta il rendimento termochimico più elevato. In compenso l'elevata temperatura richiesta per realizzare la reazione di scissione dell'ossido rappresenta un ostacolo all'attuazione del processo con sistemi di captazione tradizionali. I vantaggi offerti dall'adozione del ciclo suddetto giustificano tuttavia lo sviluppo di sistemi di captazione e concentrazione dell'energia solare ad elevata efficienza.

DECOMPOSIZIONE TERMOCHIMICA MEDIANTE L'IMPIEGO DI CALORE SOLARE

Dallo studio dei cicli termochimici basati sulla riduzione degli ossidi metallici emerge, sia da considerazione termodinamiche sia dall'esperienza pratica, che il numero delle reazioni chimiche di un ciclo di trasformazione del calore in idrogeno diminuisce con l'aumentare della temperatura massima richiesta dal ciclo stesso. Entro i limiti di temperatura ammissibili per il calore di origine solare, è generalmente verificato che per chiudere un ciclo sono necessarie almeno tre reazioni chimiche. Tale numero si riduce a due se la temperatura massima sale a $1300 - 1500\text{ }^\circ\text{C}$; temperature ancora compatibili con l'uso di un forno solare.

Oltre a ridurre il numero delle reazioni necessarie, una temperatura più elevata teoricamente migliora il rendimento della trasformazione del calore in idrogeno. Tuttavia l'impiego dell'energia solare presenta inconvenienti dovuti alla

discontinuità della fornitura di calore.

La prima conseguenza, è l'incidenza del basso fattore di utilizzazione sul costo di produzione dell'idrogeno.

Un secondo problema legato alla discontinuità è dovuto alla natura stessa dell'impianto termochimico, nel quale il recupero termochimico è spinto al massimo possibile, col risultato di ottenere un impianto adatto ad un funzionamento continuo e stazionario, ma probabilmente con un tempo lungo di avviamento. Questo richiede per un impianto a calore solare, un minor riciclaggio di calore (e conseguentemente un minor rendimento) e probabilmente il bisogno di una fonte ausiliaria di calore, o di un adatto sistema di accumulo, capace di mantenere l'impianto in condizioni di stand by, cioè pronto per un rapido ritorno al funzionamento a pieno regime, quando il calore solare è nuovamente disponibile.

Ipotesi di concentratore – reattore solare

La soluzione tecnologica proposta per l'ottenimento dell'energia termica necessaria alla dissociazione dell'ossido di zinco sono i dispositivi di captazione con concentrazione. In particolare, nel presente studio sono analizzate due diverse configurazioni di concentratore solare parabolico - cilindrico: la prima prevede l'impiego di una tubazione rettilinea in carburo di silicio posizionata l'asse focale della superficie parabolica del pannello; nella seconda configurazione sull'asse focale sono collocate due tubazioni coassiali, una tubazione rettilinea esterna in materiale trasparente alla radiazione solare ed una tubazione rettilinea interna in carburo di silicio. In entrambe le configurazioni analizzate l'ossido di zinco è collocato all'interno della tubazioni in carburo di silicio.

I collettori parabolico – cilindrici sono costituiti da una superficie cilindrica appoggiata sopra una direttrice parabolica e rappresentano i dispositivi di captazione con concentrazione attualmente più diffusi. Il vantaggio principale offerto dai concentratori solari parabolici deriva dal fatto che, mentre nei sistemi di captazione piani la superficie captante e quella disperdente coincidono, nei collettori a concentrazione la superficie captante e quella disperdente stanno nel rapporto di $D/\pi d$ (dove D è la corda della parabola e $d = 2r$ è il diametro esterno della tubazione assorbente). In Figura 1 è riportato lo schema di funzionamento del concentratore – reattore proposto.

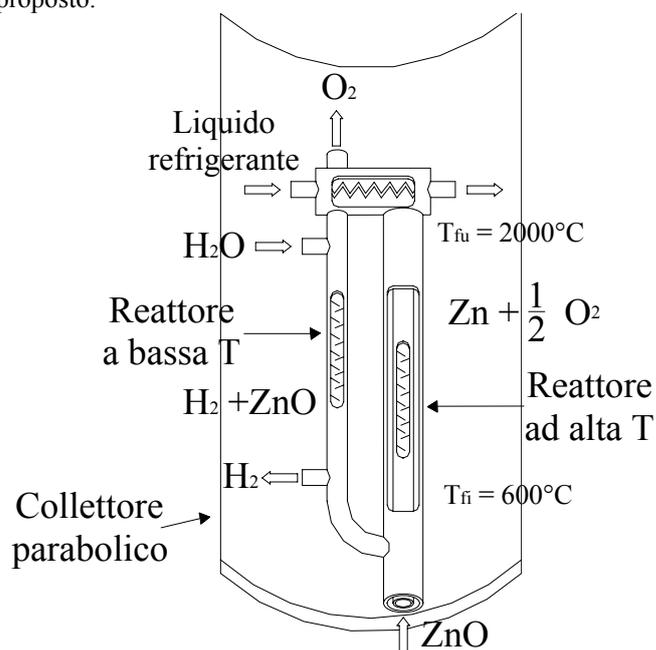


Figura 1. Schema di funzionamento del concentratore solare.

In entrambe le configurazioni la tubazione rettilinea intercetta la radiazione riflessa dalla superficie parabolica e trasmette all'ossido di zinco in essa contenuto un flusso di calore più elevato rispetto a quello dei pannelli piani. L'ossido di zinco, in fase liquida all'ingresso della tubazione, si riscalda fino a 2000 °C scindendosi secondo la reazione (16), in ossigeno e zinco gassoso.

Caso 1, tubazione rettilinea priva di rivestimento esterno.
La sezione del condotto è riportata in Figura 2.

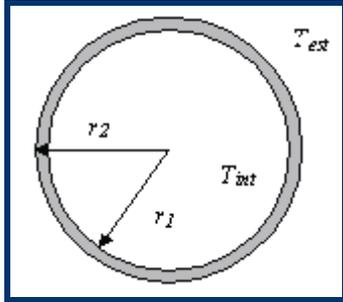


Figura 2. Caso 1. Sezione del reattore.

Lo studio teorico delle prestazioni del reattore è stato effettuato considerando tutti gli apporti di calore e le perdite che si hanno per irraggiamento, conduzione e convezione.

Se W_i è la potenza complessiva incidente sulla tubazione, la porzione assorbita dalla superficie esterna del condotto è data dall'espressione:

$$W_a = W_i \cdot a \quad (18)$$

dove a è il coefficiente di assorbimento nel visibile del materiale con cui è realizzato il condotto. Il valore di W_i è dato da:

$$W_i = W_I \eta_s A_c \quad (19)$$

dove W_I è la radiazione solare incidente sulla superficie di captazione, η_s è il rendimento della superficie riflettente, A_c la superficie di captazione del concentratore parabolico.

Solo una parte di W_a viene trasferita al fluido (W_t), la porzione restante viene dispersa per adduzione nell'ambiente esterno (W_p). Si ha, dunque:

$$W_a = W_t + W_p \quad (20)$$

La potenza persa W_p è costituita da due termini: il primo caratterizza il quantitativo di potenza termica dissipata per irraggiamento mentre il secondo individua il calore perso a causa dello scambio convettivo tra la superficie esterna della tubazione e l'atmosfera.

$$W_p = \sigma_0 a 2\pi r_e L T_{est}^4 + h_{est} 2\pi r_e L (T_{est} - T_a) \quad (21)$$

La potenza trasmessa è calcolata prendendo in considerazione la conduzione di calore attraverso la parete del condotto e lo scambio convettivo tra la superficie interna del tubo e l'ossido di zinco in esso contenuto:

$$W_t = (T_{est} - T_f) \frac{L}{\frac{1}{2\pi r_i h_{int}} + \frac{1}{2\pi \lambda \ln \frac{r_e}{r_i}}} \quad (22)$$

dove con T_f è il valore medio della temperatura dello ZnO all'interno della tubazione. La potenza termica necessaria per innalzare la temperatura dell'ossido di zinco ed operare la reazione di scissione (16) è data da:

$$W_r = \Delta H \dot{m} + (T_{fu} - T_{fi}) \dot{m} \gamma \quad (23)$$

dove il primo termine a secondo membro rappresenta l'energia necessaria per la scissione della molecola di ZnO mentre il secondo termine rappresenta l'energia necessaria per innalzare la temperatura dell'ossido dal valore in ingresso alla tubazione fino a 2000 °C.

Supponendo nota la temperatura di ingresso dell'ossido in fase liquida ed imponendo T_{fu} uguale a 2000 °C, dall'uguaglianza delle espressioni (22) e (23) si ricava il valore della temperatura sulla superficie esterna della tubazione. Sostituendo il valore così ottenuto di T_{est} all'interno dell'espressione (21) si ottiene la potenza persa dalla tubazione verso l'esterno. Note W_t e W_p si può infine ricavare il valore il valore minimo della potenza incidente W_i richiesto per realizzare la reazione di scissione dell'ossido di zinco e di conseguenza l'area della superficie captante A_c .

Caso 2, tubazione rettilinea con rivestimento trasparente esterno.

L'adozione di una tubazione trasparente alla radiazione solare esterna al condotto contenete l'ossido di zinco presenta, rispetto alla configurazione precedentemente analizzata, notevoli vantaggi: ridurre la temperatura della superficie a contatto con l'ambiente esterno e di conseguenza anche le perdite per adduzione, schermare l'energia radiante riemessa verso l'esterno dal reattore, annullare le perdite di calore per convezione sulla superficie esterna del reattore in virtù dell'assenza di aria all'interno dell'intercapedine.

Il materiale con cui è realizzato il condotto esterno deve presentare inoltre un'elevata trasmittanza in corrispondenza della lunghezza d'onda di emissione della radiazione solare ($\lambda = 550$ nm).

La nuova configurazione del reattore è mostrata in Figura 3.

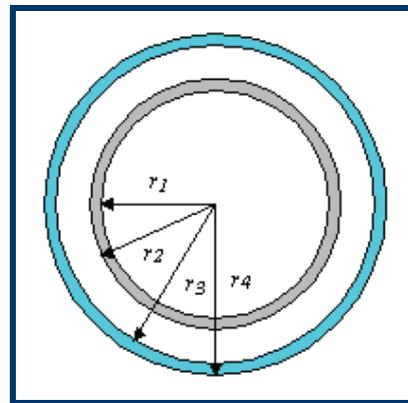


Figura 3. Caso 2. Sezione della tubazione in SiC.

La radiazione solare, riflessa dallo specchio parabolico, incide sulla tubazione in materiale trasparente venendo in parte riflessa dalla superficie esterna, in parte assorbita dal

materiale ed in parte trasmessa verso il reattore. Ipotizzando trascurabile la porzione di energia riflessa ed indicando con W_i la potenza complessivamente incidente sulla tubazione, il bilancio termico sul reattore è dato da:

$$W_i a = W_p + W_t \quad (24)$$

dove il termine a primo membro rappresenta la porzione di potenza incidente trasmessa dalla tubazione esterna ed assorbita dalla parete del reattore, il primo termine a secondo membro è la potenza persa dalla tubazione interna verso l'intercapedine mentre il secondo termine è la potenza termica ceduta all'ossido di zinco. W_t può essere esplicitato come:

$$W_t = (T_{est} - T_f) H 2\pi r_e L \quad (25)$$

Per quantificare la potenza termica persa dal reattore, il sistema tubazione opaca interna – intercapedine – tubazione trasparente esterna può essere schematizzato come un corpo interno ad una cavità. Applicando il metodo della radiosità si ottiene il seguente sistema di 2 equazioni in 2 incognite:

$$\begin{cases} A_1 G_1 = A_1 \sigma_0 a_1 T_{est}^4 + r_1 A_2 F_{21} G_2 \\ A_2 G_2 = A_2 \sigma_0 a_2 T_2^4 + r_2 [A_2 F_{22} G_2 + A_1 F_{12} G_1] \end{cases} \quad (26)$$

dove con il pedice 1 sono individuate le caratteristiche della tubazione interna, con il pedice 2 quelle della tubazione esterna. Se si considera che il reattore non vede se stesso (corpo convesso), si ha:

$$F_{11} = 0 \quad F_{12} = 1 \quad (27)$$

Per la proprietà del fattore di forma espressa dalle seguenti relazioni:

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (28)$$

$$F_{21} + F_{22} = 1 \quad (29)$$

segue

$$F_{21} = \frac{A_1}{A_2} \quad (30)$$

$$F_{22} = 1 - F_{21} = 1 - \frac{A_1}{A_2} \quad (31)$$

Sostituendo le espressioni (27), (30) e (31) all'interno della (26) si ottiene

$$\begin{cases} G_1 = \sigma_0 a_1 T_{est}^4 + r_1 G_2 \\ A_2 G_2 = A_2 \sigma_0 a_2 T_2^4 + r_2 [(A_2 - A_1) G_2 + A_1 G_1] \end{cases} \quad (32)$$

Il flusso netto scambiato dal reattore verso l'intercapedine risulta:

$$W_p = A_1 G_1 F_{12} - A_2 G_2 F_{21} \quad (33)$$

risolvendo il sistema (32) rispetto alle incognite G_1 e G_2 e sostituendo i valori ottenuti nella (33) segue

$$W_p = A_1 \sigma_0 \frac{T_{est}^4 - T_2^4}{\frac{1}{a_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{a_2} - 1 \right)} \quad (34)$$

dove T_2 è la temperatura della superficie interna della tubazione di rivestimento.

Ipotizzando uno spessore ridotto della tubazione in materiale trasparente, le temperature delle superfici interne ed esterne possono essere considerate con buona approssimazione uguali tra di loro. Indicando entrambe con T_2 , tale valore si può ricavare dal seguente bilancio termico:

$$W_i a_t + W_p = \sigma_0 a_t A_2 T_2^4 \quad (35)$$

Il valore della temperatura sulla superficie esterna del reattore può essere ottenuto come nel caso precedente, imponendo l'uguaglianza tra la potenza trasmessa attraverso la parete della tubazione stessa (espressione (25)) e la potenza termica necessaria per innalzare la temperatura dell'ossido di zinco ed operare la reazione di scissione (16).

Sostituendo i valori di T_{est} e di T_2 all'interno dell'espressione (34) si ricava il valore della potenza persa sulla superficie del reattore. Note W_i e W_p , si può infine determinare dalla (24) il valore della potenza solare incidente necessaria per realizzare la reazione di scissione dell'ossido di zinco.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato proposto un dispositivo innovativo per la produzione di idrogeno mediante processi di decomposizione termochimica con impiego di energia solare. Il dispositivo impiega la reazione di riduzione dell'ossido di zinco per la produzione diretta di H_2 alla temperatura di $2000^\circ C$. Il dispositivo si compone di due elementi principali: un sistema per la concentrazione della radiazione solare ed un reattore tubolare all'interno del quale avviene la dissociazione di ZnO .

Un'analisi teorica del funzionamento del dispositivo è stata effettuata per due differenti configurazioni del reattore: la prima configurazione prevede una tubazione rettilinea unica posizionata sul fuoco del concentratore; nella seconda configurazione il reattore è composto da due tubazioni coassiali: una interna con dimensioni analoghe a quelle ipotizzate per la prima configurazione ed una più esterna in materiale trasparente alla radiazione solare.

Sviluppi futuri della ricerca prevedono la realizzazione di un prototipo per la verifica delle prestazioni del dispositivo proposto in diverse condizioni di irraggiamento.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. A. Meier, J. Ganz, A. Steinfeld, Modeling of a Novel High-Temperature Solar Chemical Reactor. *Chemical Engineering Science*, vol. 51, n. 11, pp. 3181-3186, 1996.
2. R. Palumbo, J. Lede, O. Boutin, E. Elorza Ricart, A. Steinfeld, S. Möller, A. Weidenkaff, E. A. Fletcher, J. Bielicki, The Production of Zn from ZnO in a Single Step High Temperature Solar Decomposition Process,

Chemical Engineering Science, vol. 53, pp. 2503-2518, 1998.

3. A. Steinfeld, Solar hydrogen production via a 2-step water-splitting thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 27, pp. 611-619, 2002.

SIMBOLI

γ = calore specifico dello ZnO [J/kg K]
 ΔH = energia di trasformazione della reazione di scissione di ZnO [J/mol]
 η = rendimento di conversione del calore in lavoro utile
 λ = conducibilità termica del materiale costituente il reattore [W/m K]
 σ_0 = costante di Stefan-Boltzmann [W/m² K⁴]
 A_c = superficie di captazione [m²]
 a = coefficiente di assorbimento della superficie del reattore nel visibile
 a_1 = coefficiente di assorbimento della superficie del reattore nell'infrarosso
 a_p = coefficiente di assorbimento della tubazione trasparente
 E = rendimento termico;
 F = fattore di forma
 G = radiosità [W/m²]
 H = trasmittanza della parete del reattore [W/m² K]
 h_{est} = coefficiente di convezione esterno [W/m² K]
 h_{int} = coefficiente di convezione interno [W/m² K]
 L = lunghezza del condotto [m]
 M = metallo
 \dot{m} = portata di ZnO [mol/s]
 q_i = input diretti di calore [J];
 r_1 = coefficiente di riflessione della superficie esterna del reattore
 r_2 = coefficiente di riflessione della tubazione trasparente
 r_e = raggio esterno del reattore [m]
 r_i = raggio interno del reattore [m]
 t = coefficiente di trasmissione della tubazione trasparente
 T_2 = temperatura della tubazione trasparente [K]
 T_a = temperatura ambiente [K]
 T_{est} = temperatura superficie esterna del reattore [K]
 T_f = temperatura media del fluido [K]
 T_{fi} = temperatura fluido in ingresso [K]
 T_{fu} = temperatura fluido in uscita [K]
 W_a = potenza assorbita [W]
 W_i = potenza incidente [W]
 W_l = potenza radiante solare [W/m²]
 W_{in} = input diretti di lavoro utile [J];
 W_p = potenza persa [W]
 W_r = potenza necessaria al riscaldamento e successiva scissione di ZnO all'interno del reattore [W]
 W_t = potenza trasmessa [W]